

Овощи России

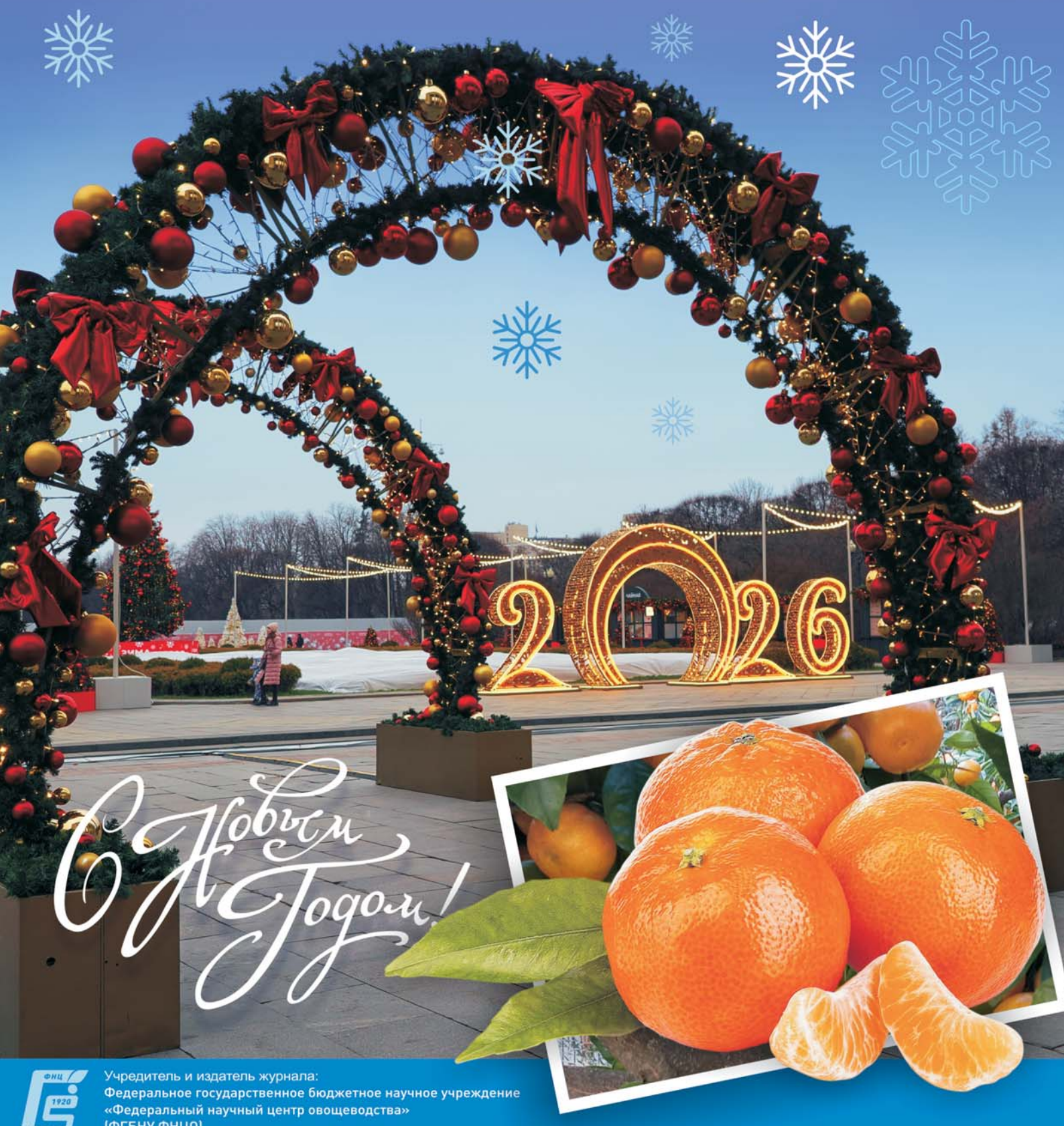
Научно-практический журнал
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» 13168

ISSN 2072-9146 (Print)

ISSN 2618-7132 (Online)

6 2025

VEGETABLE
crops of RUSSIA
Scientific peer-reviewed journal



С Новым
Годом!



Учредитель и издатель журнала:
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр овощеводства»
(ФГБНУ ФНЦО)



ФГБНУ ФНЦО

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО)**

Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

Вот и пролетел 2025 год. Юбилейный для нашего учреждения – год 105-летия. Этот год ознаменовался знаковыми событиями для нас – ФГБНУ ФНЦО стал победителем конкурсных отборов по созданию научных центров: «Селекционно-семеноводческий центр по овощным культурам» и центр мирового уровня «Центр современной селекции сельскохозяйственных растений». Селекционно-семеноводческий центр призван решать задачи создания отечественных конкурентоспособных селекционных достижений и преодоления импортозависимости в семенах и посадочном материале. Научный центр мирового уровня направлен на формирование центра компетенций в области селекции сельскохозяйственных растений на основе коллаборации ведущих отечественных сельскохозяйственных научно-исследовательских, научно-образовательных организаций и реального сектора экономики для обеспечения лидирующих позиций российской аграрной науки и достижения технологического суверенитета. Исследования НЦМУ направлены на решение глобальных задач по разработке важнейших наукоемких технологий современной ускоренной селекции, генетики и семеноводства сельскохозяйственных культур для создания нового, отечественного высокоэффективного, инновационного продукта, обеспечивающего продовольственную безопасность страны. Перед нами стоят важные государственные задачи, при этом лежит большая ответственность, и с этим отчасти подвижническим настроением мы встречаем грядущий Новый 2026 год. Только вместе, только сообща мы можем решать важные задачи и побеждать!

От коллектива сотрудников Федерального научного центра овощеводства поздравляем всех с наступающим Новым годом и Рождеством Христовым!

Пусть наступающий год откроет для всех нас новые горизонты и возможности, будет максимально плодотворным, а научная и производственная деятельность успешной!

Крепкого всем здоровья, мира, благополучия и уверенности в завтрашнем дне!

Счастливого Нового года и светлого Рождества!

**Директор ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»,
доктор с.-х. наук, академик РАН,
лауреат премии Правительства РФ**

А.В. Солдатенко

**Научный руководитель ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»,
доктор с.-х. наук, академик РАН,
лауреат Государственной премии и премий Правительства РФ,
главный редактор журнала «Овощи России»**

В.Ф. Пивоваров

31 декабря 2025 года

С наступающим Новым 2026 годом!

Главный редактор

В.Ф. Пивоваров – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии и премий Правительства РФ, научный руководитель Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО), Москва, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии – **Н.А. Голубкина**, доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник лабораторно-аналитического отдела, Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО), Московская область, Россия

Д. Карузо – зам. председателя, доктор с.-х. наук, Department of Agricultural Sciences, University of Naples Federico II, Неаполь, Италия

А.Н. Игнатов – зам. председателя, доктор биол. наук, профессор Агробиотехнологического департамента РУДН, зам. ген. директора по научной работе Исследовательской лаборатории «ФитоИнженерия», Москва, Россия

Е.З. Кочиева – зам. председателя, доктор биол. наук, проф., МГУ им. М.В. Ломоносова, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия

Агнешка Секара – профессор, Department of Horticulture, Faculty of Biotechnology and Horticulture, University of Agriculture, Краков, Польша

Радхи Шьям Сингх – доцент, Department of Plant Breeding and Genetics Mandan Bharti Agriculture College, Agwanpur, Saharsa-852202, Bihar Agricultural University, Sabour, Bhagalpur, Bihar, Индия

Ж.П. Данаилов – доктор с.-х. наук, проф., Болгарская академия наук, Институт физиологии растений и генетики, София, Болгария

С.Р. Аллахвердиев – доктор биол. наук, проф., Bartin University, Turkey

М.Х. Арамов – доктор с.-х. наук, Сурхандарьинская научно-опытная станция НИИ овоще-бахчевых культур и картофеля, Республика Узбекистан

Л.Ф. Волощук – доктор биол. наук, Институт генетики, физиологии и защиты растений АН Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

И.Г. Джафаров – доктор с.-х. наук, проф.,

член-корр. НАНА, директор, Научно-исследовательский институт защиты растений и технических культур МСХ Азербайджанской Республики

В.П. Прохоров – доктор биол. наук, проф., Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

В.В. Скорина – доктор с.-х. наук, проф., Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Могилевская обл., Республика Беларусь

А.В. Солдатенко – зам. главного редактора, доктор с.-х. наук, академик РАН, директор ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

О.Н. Пышная – зам. главного редактора, доктор с.-х. наук, проф., ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

С.М. Надежкин – зам. главного редактора, доктор биол. наук, проф., ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

С.В. Акимова – доктор с.-х. наук, доцент кафедры плодородия, виноградарства и виноделия ФГБОУ ВО РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

К.Л. Алексеева – доктор с.-х. наук, проф., ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

И.Т. Балашова – доктор биол. наук, ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

Л.Л. Бондарева – доктор с.-х. наук,

ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

М.С. Гинс – доктор биол. наук, член-корр.

РАН, ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

Л.В. Григорьева – доктор с.-х. наук, Мичуринский ГАУ, Мичуринск, Россия

А.С. Домблидес – доктор с.-х. наук, ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

Н.Н. Дубенок – академик РАН, доктор с.-х. наук, проф.,

ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева», Москва, Россия

С.В. Жаркова – доктор с.-х. наук, проф., ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, Барнаул, Россия

Е.В. Журавлева – доктор с.-х. наук, профессор РАН, секретарь научно-технического совета (НТС) Комиссии по научно-технологическому развитию РФ, г. Москва, Россия

Е.А. Калашникова – доктор биол. наук, профессор, Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия

И.М. Куликов – академик РАН, доктор экон. наук, ФГБНУ «Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства», Москва, Россия

Ф.Б. Мусаев – доктор с.-х. наук, ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Россия

В.М. Пизенгольц – доктор экон. наук, проф., Аграрно-технологический институт РУДН, г. Москва, Россия

В.Г. Плющиков – доктор с.-х. наук, проф., РУДН, Москва, Россия

В.В. Пыльнев – доктор с.-х. наук, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

А.К. Раджабов – доктор с.-х. наук, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Н.И. Сидельников – академик РАН, доктор с.-х. наук, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений», Москва, Россия

С.М. Сирота – доктор с.-х. наук, зам. директора по селекции и семеноводству, ООО «Гетерозисная селекция», Челябинская область, Россия

В.И. Старцев – доктор с.-х. наук, проф., ФГБНУ «Всероссийский НИИ фитопатологии», Московская область, Россия

И.Г. Ушачев – доктор экон. наук, академик РАН, проф., ФГБНУ «ФНЦ аграрной экономики и социального развития сельских территорий – Всероссийский НИИ

экономики сельского хозяйства» (ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ), Москва, Россия

П.А. Чекмарев – академик РАН, доктор с.-х. наук, заместитель президента РАН, Российская академия наук, Москва, Россия

Ю.В. Чесноков – доктор биол. наук, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

Ответственный редактор: **Тареева М.М.** – кандидат с. х. наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО), Московская область, Россия

Библиограф: Разорёнова А.Г., ФГБНУ ФНЦО. **Дизайн и верстка:** Янситов К.В., ФГБНУ ФНЦО. **Фото:** Лебедев А.П., ФГБНУ ФНЦО.

© ФГБНУ ФНЦО, оформление макета, 2025

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО)

Адрес учредителя и редакции: 143080, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14

E-mail: vegetables.of.russia@yandex.ru, vegetables.of.russia@vniissok.ru

<http://www.vegetables.ru> Тел: +7(495) 599-24-42

Тираж 50 экземпляров.

Периодичность: 6 раз в год.

Дата выхода в свет: 18.12.2025

Отпечатано в ООО «Издательство «Черноземье»,

394019, г. Воронеж,

ул. Краснодарская, 16И, оф. 6

Телефон: +7 (473) 200-888-0

E-mail: izdat223@yandex.ru

Цена свободная.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-72184 от 15 января 2018 года. Издаётся с декабря 2008 года.

Научная концепция издания предполагает публикацию современных достижений, результатов научных национальных и международных исследований в области овощеводства и садоводства, селекции и семеноводства сельскохозяйственных растений, физиологии и биохимии растений, защиты растений, экономики сельского хозяйства и смежных дисциплин:

биологии, биотехнологии, интродукции и др.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 License

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал в 2016 году включен в базу данных AGRIS (Agricultural Research Information System) –

Международную информационную систему по сельскому хозяйству и смежным с ним отраслям.

Журнал включен в базу данных компании EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost.



Russian Science
Citation Index

OPEN
ACCESS

We are
Crossref
Member

AGRIS

EBSCOhost

Editor in chief

Victor F. Pivovarov – Full Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Agriculture),
Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center"
(FSBSI FSVС), Moscow region, Russia

EDITORIAL BOARD

Editorial Board Chairman: Nadezhda A. Golubkina, Dr. Sci. (Agriculture),
chief scientific researcher of the laboratory analytical department,
Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center" (FSBSI
FSVС), Moscow region, Russia

Gianluca Caruso – Deputy chairman, Dr. Sci. (Agriculture),
Department of Agricultural Sciences, University of Naples Federico II, Napoli, Italy

Alexander N. Ignatov – Deputy chairman, Dr. Sci. (Biology),

Agrobiotechnological Department of RUDN University,
Deputy Director, PhytoEngineering Research Laboratory,
Moscow, Russia, Moscow, Russia

Elena Z. Kochieva – Deputy chairman, Dr. Sci. (Biology), Professor,
Department of Biotechnology of Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University;
Head of the Group of molecular methods of analysis
of the genome, Federal Research Centre "Fundamentals of Biotechnology"
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Agnieszka Sekara – Assoc. Prof., Department of Horticulture, Faculty of
Biotechnology and Horticulture, University of Agriculture, Krakow, Poland
Radhey Shyam Singh – Assistant Professor cum Junior Scientist, Department of
Plant Breeding and Genetics Mandan Bharti Agriculture College, Agwanpur,
Saharsa-852202, Bihar Agricultural University,
Sabour, Bhagalpur, Bihar, India

Zhivko P. Danailov – Professor, Dr. Sci. (Agriculture), Bulgarian
Academy of Sciences, Institute of Plant Physiology and Genetics, Sofia, Bulgaria
Surhay R. Allahverdiev – Dr. Sci. (Biology), Professor, Bartin University, Turkey
Muzaffar H. Aramov – Dr. Sci. (Agriculture),
Surkhandarya region, Republic of Uzbekistan

Leonid F. Volosciuk – Dr. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of phytopathology and
biotechnology, Institute of Genetics, Physiology and Protection of Plants, Academy of
Sciences of Moldova, Chişinău, Republic of Moldova

Ibrahim Hasan oglu Jafarov – Corresponding Member of ANAS,
Professor, Dr. Sci. (Agriculture), Scientific Research Institute of Plant Protection and
Technical Plants of the Ministry of Agriculture Republic of Azerbaijan

Valery N. Prokhorov – Dr. Sci. (Biology), chief scientific officer
of the Laboratory of growth and development of plant, FSSI "V.F. Kuprevich Institute
of experimental botany National academy of Science of Belarus", Minsk, Belarus

Vladimir V. Skorina – Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Department of fruits-vegetables
growing, "Belarusian State Academy of Agriculture", Mogilev, Belarus

Alexey V. Soldatenko – Deputy Chief Editor, Full Member of the Russian Academy of
Sciences, Dr. Sci. (Agriculture), director of Federal State Budgetary Scientific Institution
"Federal Scientific Vegetable Center" (FSBSI FSVС),
Moscow region, Russia

Olga N. Pyshnaya – Deputy Chief Editor, Dr. Sci. (Agriculture), Professor,
Deputy director in scientific work, Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal
Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russia

Sergei M. Nadezhkin – Deputy Chief Editor, Dr. Sci. (Biology), Professor,
Head of the laboratory analytical department, Federal State Budgetary Scientific Institution
"Federal Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russia

Svetlana V. Akimova – Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of
Fruit Growing, Viticulture and Winemaking, Russian State Agrarian University – Moscow
Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Ksenia L. Alekseeva – Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of the Laboratory biological
methods of plant protection, All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing
– Branch of the FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russia

Irina T. Balashova – Dr. Sci. (Biology), chief scientific officer of the laboratory of new tech-

nologies FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russia

Lyudmila L. Bondareva – Dr. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of breeding and
seed production of Cole crops, FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center",
Moscow region, Russia

Murat S. Gins – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of plant physiology and biochemistry, introduction
and functional food, FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russia

Lyudmila V. Grigoryeva – Dr. Sci. (Agriculture),
Professor, Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia

Arthur S. Domblides – Dr. Sci. (Agriculture), Head of Laboratory of Genetics and
Cytology, FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russia

Nikolay N. Dubenok – Full Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of the Department
of agricultural melioration, forestry and land management, Russian State Agrarian
University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Stalina V. Zharkova – Dr. Sci. (Agriculture), Professor,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
The Altai State Agricultural University (ASAU), Barnaul, Russia

Ekaterina V. Zhuravleva – Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Russian Academy of
Sciences, Secretary of the Scientific and Technical Council (STC) of the Commission for
Scientific and Technological Development
of the Russian Federation, Moscow, Russia

Elena A. Kalashnikova – Dr. Sci. (Biology), Professor
of the Timiryazev Institute of Plant Physiology
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Ivan M. Kulikov – Full Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Economy), Professor, director of FSBSI Federal Horticultural
Research Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, Moscow, Russia

Farhad B. Musaev – Dr. Sci. (Agriculture), leading researcher
of the laboratory analytical department,
FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russia

Vadim G. Plushikov – Dr. Sci. (Agriculture), Professor,
RUDN University, Moscow, Russia

Vladimir V. Pylnev – Dr. Sci. (Agriculture), Russian State Agrarian University – Moscow
Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Agamagomed K. Radzhabov – Dr. Sci. (Agriculture), Russian State Agrarian University
– Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Nikolay I. Sidelnikov – Full Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Economy), Professor, director of FSBSI «All-Russian Scientific Research Institute
of Medicinal and Aromatic Plants», Moscow, Russia

Sergey M. Sirota – Dr. Sci. (Agriculture), Deputy Director for Breeding
and Seed Production, LLC Heterosis Selection, Chelyabinsk region, Russia

Viktor I. Startsev – Dr. Sci. (Agriculture), Professor,
FSBSI All-Russian Research Institute of Phytopathology, Moscow region, Russia

Ivan G. Ushachev – Full Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Economy), Honored Scientist of Russian Federation,
scientific director, Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center
for Agrarian Economics and Social Development of Rural Territories – All-Russian
Research Scientific Institution of Economy of Agriculture", Moscow, Russia

Petr A. Chekmarev – Full Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Agriculture), Deputy President
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Yuri V. Chesnokov – Dr. Sci. (Biology), director,
FSBSI "Agrophysical Research Institute", St.-Petersburg, Russia

Responsible Scientific Editor: Marina M. Tareeva – Cand. Sci. (Agriculture),

Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center", (FSBSI FSVС), Moscow, Russia

Bibliographer: Anna G. Razorenova (FSBSI FSVС). **Designer: Konstantin V. Yansitov** (FSBSI FSVС).

Photographing: Alexey P. Lebedev (FSBSI FSVС)

©FSBSI FSVС, Layout Design, 2025

Address of the journal publisher and office: Selektionsnaya St., 14, VNIISOK, Odintsovo district, Moscow region, Russia, 143072

E-mail: vegetables.of.russia@yandex.ru <http://www.vegetables.ru> tel.: +7 (495) 599-24-42

Publication Frequency: 6 issue per year. Free price. 50 copies. Published: 18.12.2025

This issue is registered in the Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

The license ПИ №ФЦ77-72184 of the January, 15, 2018.

Published since 2008. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 License

The scientific concept of the journal involves the publication of modern achievements, the results of scientific national and international research in
the field of vegetable growing and horticulture, breeding and seed growing of agricultural crops, physiology and biochemistry of plants, plant pro-
tection, agricultural economics and related disciplines: biology, biotechnology, introduction, etc.

Russian Science
Citation Index

OPEN
ACCESS

We are
Crossref
Member

AGRIS

EBSCOhost

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

Домблдес Е.А., Заячковская Т.В., Вюртц Т.С., Кулаков Ю.В., Чичварина О.А., Тукусер Я.П., Стебницкая К.С., Фомичева М.Г., Минейкина А.И., Домблдес А.С., Козарь Е.В. Перспективы ускорения селекции корнеплодных культур при использовании биотехнологических методов.	5
Пышная О.Н., Джос Е.А., Мамедов М.И., Матюкина А.А., Енгальчева И.А., Костанчук Ю.Н., Руфина И.В. Экологическое сортоиспытание гибридов F ₁ перца сладкого с различной формой плода.	18
Хрусталева Л.И. Молекулярная генетика и мульти-омиксные технологии в селекции растений.	26
Козарь Е.В., Минейкина А.И., Заячковская Т.В., Белов С.Н., Кулаков Ю.В., Чичварина О.А., Фомичева М.Г., Тукусер Я.П., Стебницкая К.С., Вюртц Т.С., Васильева Д.Д., Домблдес Е.А. Культивирование микроспор на шейкере повышает качество эмбриоидов и эффективность регенерации при получении удвоенных гаплоидов из микроспор белокочанной капусты (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i>).	34
Савенко Е.Г., Глазырина В.А., Шундрин Л.А., Мухина Ж.М., Есаулова Л.В. Влияние генотипа и регуляторов роста на эффективность индукции каллусогенеза и регенерации в культуре пыльников риса <i>in vitro</i>	41
Фролова С.Л., Бондарева Л.Л. Анализ факторов, индуцирующих переход к генеративной фазе развития у представителей семейства Brassicaceae (обзор).	49
Козарь Е.Г., Синиченко Н.А., Пышная О.Н., Енгальчева И.А. Создание исходного материала томата с устойчивостью к альтернариозу и комплексом хозяйственно ценных признаков для создания сортов в условиях Приморского края Дальнего Востока.	60

САДОВОДСТВО, ОВОЩЕВОДСТВО, ВИНОГРАДАРСТВО И ЛЕКАРСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ

Дацюк К.И., Маркарова М.Ю., Надежкин С.М., Химич Г.А. Совершенствование элементов технологии выращивания кабачка в Нечерноземной зоне РФ.	68
Казаков П.О., Акимов С.В., Нечипоренко И.В., Паламарчук Д.П., Соловьев А.В., Зубков А.В., Демидова А.П. Разработка приемов ускоренного размножения зелеными черенками перспективных для защищенного грунта подвоев цитрусовых культур.	78
Горобей В.П., Павлов Л.В., Москалев В.Ю. Выделение семян томата для селекционных исследований.	87
Тукусер Я.П., Надежкин С.М., Байков А.А., Енгальчев М.Р., Кондратьева И.Ю., Пэлий А.Ф., Шафигуллин Д.Р., Гинс М.С. Влияние листовых подкормок AraSil и Apaliqua ЖКУ на урожайность томата (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) при выращивании на капельном поливе в условиях открытого грунта Центрального района Нечерноземной зоны.	95
Янченко А.В., Федосов А.Ю., Иванова М.И., Меньших А.М., Янченко Е.В. Углеродные нанотрубки в овощеводстве (обзор).	105
Кузьмина С.П., Казыдуб Н.Г., Куколева М.Ю. Оценка продуктивности и адаптивной способности сортов гороха овощного в условиях южной лесостепи Западной Сибири.	113

АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ

Иванова М.И., Маркарова М.Ю. Оценка фитопатогенного фона ризосферной зоны некоторых представителей рода <i>Allium</i> L. на аллювиальных луговых почвах Замоскворецкой поймы.	120
Козарь Е.Г., Енгальчева И.А. Влияние разных видов фитопатогенных бактерий на ското- и фотоморфогенез проростков фасоли овощной.	126
Маслова М.В., Шамшин И.Н., Дренова Н.В., Дубровский М.Л. Факторы вирулентности патогена как основа для разработки методов и стратегий борьбы с болезнью растений на примере бактериального ожога яблони (обзор).	138
Казаков О.Г., Поливанова О.Б., Деревягина М.К., Бирюкова В.А., Темирбекова С.К. Выявление устойчивых к фитофторозу гибридов картофеля с использованием маркеров R-генов и искусственного заражения.	146

BREEDING, SEED PRODUCTION AND PLANT BIOTECHNOLOGY

Dombildes E.A., Zayachkovskaya T.V., Vjurtts T.S., Kulakov Yu.V., Chichvarina O.A., Tukuser Ya.P., Stebnitskaya K.S., Fomicheva M.G., Mineykina A.I., Dombildes A.S., Kozar E.V.	
Biotechnological approaches for accelerated breeding of root crops.	5
Pyshnaya O.N., Dzhos E.A., Mamedov M.I., Matyukina A.A., Engalycheva I.A., Kostanchuk Yu.N., Rufina I.V.	
Ecological variety testing of F1 sweet pepper hybrids with different fruit shapes.	18
Khrustaleva L.I.	
Molecular genetics and multi-omics technologies in plant breeding.....	26
Kozar E.V., Mineykina A.I., Zayachkovskaya T.V., Belov S.N., Kulakov Yu.V., Chichvarina O.A., Fomicheva M.G., Tukuser Ya.P., Stebnitskaya K.S., Vjurtts T.S., Vasilieva D.D., Dombildes E.A.	
Shaker-based microspore culture improves embryoid quality and regeneration efficiency in the production of doubled haploids from microspores of white cabbage (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i>)	34
Savenko E.G., Glazyrina V.A., Shundrina L.A., Mukhina Zh.M., Esaulova L.V.	
Effect of genotype and growth regulators on the effectiveness of callusogenesis and regeneration in anther culture of rice <i>in vitro</i>	41
Frolova S.L., Bondareva L.L.	
Analysis of factors inducing the transition to the generative phase of development in the Brassicaceae family (review)	49
Kozar E.G., Sinichenko N.A., Pyshnaya O.N., Engalycheva I.A.	
Creation of tomato source material with resistance to <i>Alternaria</i> and a complex of economically valuable traits for the development of varieties in the conditions of the Primorsky Krai of the Far East.	60

HORTICULTURE, VEGETABLE PRODUCTION, VITICULTURE AND MEDICINAL CROPS

Datsyuk K.I., Markarova M.Yu., Nadezhkin S.M., Khimich G.A.	
Improvement of zucchini cultivation technology in the Non-Black Earth Zone of the Russian Federation	68
Kazakov P.O., Akimova S.V., Nechiporenko I.V., Palamarchuk D.P., Solovyev A.V., Zubkov A.V., Demidova A.P.	
Development of techniques for accelerated propagation of perspective citrus rootstocks for protected ground using green cuttings.....	78
Gorobey V.P., Pavlov L.V., Moskalevich V.Yu.	
Separation of tomato seeds for breeding research	87
Tukuser Ya.P., Nadezhkin S.M., Baikov A.A., Engalychev M.R., Kondratyeva I.Yu., Peliy A.F., Shafigullin D.R., Gins M.S.	
The effect of foliar fertilizers ApaSil and Apaliqua LCF on the yield of tomato (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) when grown on drip irrigation in open ground conditions of the Central district of the Non-Chernozem zone.	95
Yanchenko A.V., Fedosov A.Yu., Ivanova M.I., Menshikh A.M., Yanchenko E.V.	
Carbon nanotubes in vegetable growing (review)	105
Kuzmina S.P., Kazydub N.G., Kukoleva M.Yu.	
Evaluation of productivity and adaptive capacity of vegetable peas varieties in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia	113

AGROCHEMISTRY, SOIL SCIENCE, PLANT PROTECTION AND QUARANTINE

Ivanova M.I., Markarova M.Yu.	
Assessment of phytopathogenic background of the rhizosphere zone of some representatives of the genus <i>Allium</i> L. on alluvial meadow soils of the Zamoskvoretskaya floodplain	120
Kozar E.G., Engalycheva I.A.	
Effects of different phytopathogenic bacteria on the scoto- and photomorphogenesis of vegetable bean seedlings.	126
Maslova M.V., Shamshin I.N., Drenova N.V., Dubrovsky M.L.	
Pathogen virulence factors as a basis for development methods and strategies to control plant disease on the example of fire blight on apple trees (review)	138
Kazakov O.G., Polivanova O.B., Derevyagina M.K., Biryukova V.A., Temirbekova S.K.	
Identification of potato hybrids resistant to late blight using R-gene markers and artificial infection	146

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-5-17>
УДК: 635.1:631.527.8

Е.А. Домблидес*, Т.В. Заячковская,
Т.С. Вюртц, Ю.В. Кулаков, О.А. Чичварина,
Я.П. Туксер, К.С. Стебникая,
М.Г. Фомичева, А.И. Минеикина,
А.С. Домблидес, Е.В. Козарь

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр овощеводства" (ФГБНУ ФНЦО) 143072, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИССОК, ул. Селекционная, д. 14

*Автор для переписки: edomblides@mail.ru

Вклад авторов: Домблидес Е.А.: методология, верификация данных, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация, руководство исследованием. Заячковская Т.В., Вюртц Т.С., Чичварина О.А., Туксер Я.П., Стебникая К.С., Минеикина А.И., Козарь Е.В.: формальный анализ, проведение исследования, ресурсы, визуализация. Кулаков Ю.В.: верификация данных, администрирование данных, создание рукописи и ее редактирование, визуализация. Фомичева М.Г.: формальный анализ, проведение исследования, администрирование данных, визуализация. Домблидес А.С.: верификация данных, администрирование данных, руководство исследованием.

Благодарности. Работа опубликована в рамках участия в конференции «Перспективы развития производства и переработки клубневых и корнеплодных культур (Корнеплоды и клубни – 2025)». Авторы выражают благодарность организационному комитету конференции за включение данной работы в материалы конференции.

Конфликт интересов. Домблидес А.С. является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2023 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Домблидес Е.А., Заячковская Т.В., Вюртц Т.С., Кулаков Ю.В., Чичварина О.А., Туксер Я.П., Стебникая К.С., Фомичева М.Г., Минеикина А.И., Домблидес А.С., Козарь Е.В. Перспективы ускорения селекции корнеплодных культур при использовании биотехнологических методов. *Овощи России*. 2025;(6):5-17. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-5-17>

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Принята к печати: 18.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Elena A. Dombildes*,
Tatiana V. Zayachkovskaya,
Tatiana S. Vjurtts, Yuri V. Kulakov,
Olga A. Chichvarina, Yana P. Tukser,
Ksenia S. Stebnitskaya, Maria G. Fomicheva,
Anna I. Mineykina, Arthur S. Dombildes,
Elena V. Kozar

FSBSI Federal Scientific Vegetable Center
(FSBSI FSVC)
14, Selektionnaya str., VNISSOK,
Odintsovo region, Moscow district, 143072, Russia

*Corresponding Author: edomblides@mail.ru

Authors' Contribution: Dombildes E.A.: methodology, validation, data curation, writing – original draft, visualization, supervision. Zayachkovskaya T.V., Vjurtts T.S., Chichvarina O.A., Tukser Ya.P., Stebnitskaya K.S., Mineykina A.I., Kozar E.V.: formal analysis, investigation, data resources, visualization. Kulakov Yu.V.: validation, data curation, writing – review, visualization. Fomicheva M.G.: formal analysis, investigation, data curation, visualization. Dombildes A.S.: validation, data curation, visualization, supervision.

Acknowledgments. This work was published as part of the conference "Prospects for the Development of Production and Processing of Tuber and Root Crops (Root Crops and Tubers – 2025)." The authors express their gratitude to the conference organizing committee for including this work in the conference proceedings.

Conflict of interest. Dombildes A.S. has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2023, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citation: Dombildes E.A., Zayachkovskaya T.V., Vjurtts T.S., Kulakov Yu.V., Chichvarina O.A., Tukser Ya.P., Stebnitskaya K.S., Fomicheva M.G., Mineykina A.I., Dombildes A.S., Kozar E.V. Biotechnological approaches for accelerated breeding of root crops. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):5-17. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-5-17>

Received: 22.10.2025

Accepted for publication: 18.11.2025

Published: 18.12.2025

Перспективы ускорения селекции корнеплодных культур при использовании биотехнологических методов

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Актуальность ускорения селекции корнеплодов продиктована двумя глобальными вызовами: необходимостью обеспечения продовольственной безопасности для растущего населения в условиях ограниченных ресурсов и неспособностью классических методов, отличающихся длительностью и трудоемкостью, оперативно на них реагировать. Интеграция биотехнологий в селекционный процесс позволяет кардинально ускорить достижение целей селекции.

Материал и методы. В качестве растительного материала использовали перспективные сортообразцы овощных корнеплодных культур селекции ФГБНУ ФНЦО. Отбор бутонов проводили с донорных растений, выращенных как в поликарбонатной теплице, так и в климатической камере из корнеплодов, прошедших яровизацию. В исследованиях использовали общепринятые методы культивирования клеток и тканей *in vitro* согласно разработанным в ФГБНУ ФНЦО протоколам для культуры неопыленных семян, культуры изолированных микроспор *in vitro*, технологии «спасения зародышей» «embryo rescue», клонального микроразмножения корнеплодных культур.

Результаты. Показана эффективность получения линий удвоенных гаплоидов (DH-линий) с использованием культуры изолированных микроспор и неопыленных семян *in vitro*, а также рассмотрены возможности использования в селекционном процессе технологий микроклонального размножения и «спасения зародышей». Для свеклы столовой достигнут выход до 25 эмбрионов, а для моркови столовой до 55 эмбрионов на 100 введенных в культуру *in vitro* неопыленных семян. При использовании культуры изолированных микроспор у представителей семейства Brassicaceae для редиса максимальная эффективность технологии составила – 8 эмбрионов на чашку Петри, для репы – 53 эмбриона, а у представителей семейства Apiaceae для моркови – 161 эмбрион, для пастернака – 20 эмбрионов. С использованием технологии «спасения зародышей» получены межвидовые гибриды между капустой белокочанной (*Brassica oleracea* L.) и устойчивым к киле дайконом (*Raphanus sativus* L.), а также межвидовые гибриды от скрещивания капусты белокочанной с репой (*B. oleracea* L. × *B. rapa*). Для редиса, свеклы и моркови столовой оптимизирован метод клонального микроразмножения, в том числе и для линий с мужской стерильностью. Практическим результатом проведенных исследований стало создание и регистрация новых сортов и DH-линий: моркови столовой Соната, редиса (Жегалов, Веня, Персей), и получение патента на изобретение № 2807444 «Способ изоляции микроспор для получения удвоенных гаплоидов семейства Brassicaceae в культуре микроспор *in vitro*».

Заключение. В работе представлены результаты применения современных биотехнологических методов *in vitro* для ускорения селекционного процесса овощных корнеплодных культур семейства Amaranthaceae Juss. (свёкла столовая), Apiaceae Lindl. (морковь столовая, пастернак), Brassicaceae Burn. (редис, дайкон, репа). Сроки создания сортов и гибридов корнеплодных культур могут быть существенно сокращены за счет внедрения биотехнологических методов в селекционный процесс при тесном содружестве биотехнологов и селекционеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

ускорение селекции, корнеплодные культуры, биотехнологические методы, культура *in vitro*, удвоенные гаплоиды (DH-линии), клональное микроразмножение, «спасение» зародышей, культура изолированных микроспор, культура неопыленных семян, межвидовые гибриды

Biotechnological approaches for accelerated breeding of root crops

ABSTRACT

Relevance. The relevance of accelerating root crop breeding is dictated by two global challenges: the need to ensure food security for a growing population in conditions of limited resources and the inability of classical methods, characterized by their duration and complexity, to respond promptly to them. The integration of biotechnologies into the breeding process makes it possible to dramatically accelerate the achievement of breeding goals.

Materials and Methods. Prospective cultivars of vegetable root crops selected by the Federal Scientific Vegetable Center were used as plant material. Buds were selected from donor plants grown both in a polycarbonate greenhouse and in a climate chamber from vernalized root crops. The research used generally accepted methods of *in vitro* cell and tissue cultivation according to protocols developed at the Federal Scientific Vegetable Center for the culture of unpollinated ovules, culture of isolated microspores *in vitro*, embryo rescue technology, and clonal micropropagation of root crops.

Results. The efficiency of obtaining lines of doubled haploids (DH-lines) using cultures of isolated microspores and pollinated ovules *in vitro* is shown, and the possibilities of using microclonal reproduction and "embryo rescue" technologies in the breeding process are considered. For beetroot, the yield of up to 25 embryos has been achieved, and for carrot, up to 55 embryos per 100 *in vitro* unpollinated ovules introduced into culture. By the use of a culture of isolated microspores from representatives of Brassicaceae family for radishes, the maximum efficiency of the technology was 8 embryos per Petri dish, 53 embryos for turnips, 161 embryos for carrots, and 20 embryos for parsnips. Interspecific hybrids between white cabbage (*Brassica oleracea* L.) and keel-resistant daikon (*Raphanus sativus* L.), as well as interspecific hybrids from crossing white cabbage with turnips (*B. oleracea* L. × *B. rapa*), were obtained using the "embryo rescue" technology. The method of clonal micropropagation has been optimized for radishes, beets and carrots, including for lines with male sterility. The practical result of the research was the creation and registration of new varieties and DH-lines: Sonata table carrots, radishes (Zhegalov, Venya, Persey), and obtaining a patent for invention No. 2807444 "Microspore isolation method for obtaining doubled haploids of the Brassicaceae family in microspore culture *in vitro*."

Conclusion. The paper presents the results of the application of modern biotechnological methods *in vitro* to accelerate the breeding process of vegetable root crops of the Amaranthaceae Juss family. (red beet), Apiaceae Lindl. (carrots, parsnips), Brassicaceae Burn. (radish, daikon, turnip). The time frame for the creation of varieties and hybrids of root crops can be significantly reduced by introducing biotechnological methods into the breeding process with the close cooperation of biotechnologists and breeders.

KEYWORDS:

acceleration of breeding, root crops, biotechnological methods, *in vitro* culture, doubled haploids (DH-lines), clonal micropropagation, "rescue" of embryos, culture of isolated microspores, culture of unpollinated ovules, interspecific hybrids

Введение

Обеспечение продовольственной безопасности Российской Федерации является стратегической государственной задачей, решение которой напрямую связано с развитием отечественной селекции и семеноводства овощных культур. Особое значение в этом процессе принадлежит корнеплодным овощным культурам, относящимся к различным ботаническим семействам: *Amaranthaceae* Juss. (свёкла столовая), *Apiaceae* Lindl. (морковь столовая, пастернак), *Brassicaceae* Burn. (редис, дайкон, репа). Широкая распространённость этих культур в России и за рубежом обусловлена их высокой пищевой ценностью и уникальным биохимическим составом. Морковь служит важнейшим источником каротина (провитамина А) и жизненно необходимых минеральных элементов (калий, кальций, железо, фосфор и др.) [1]; свёкла столовая является ценным источником бетаина и бетанина – физиологически важных веществ для метаболизма человека; пастернак среди овощных корнеплодов отличается наибольшим содержанием сухого вещества (17-33%); а масло его семян является источником эссенциальных моно- (МНЖК) и полиненасыщенных (ПНЖК) жирных кислот омега-9 и омега-6; репа – отличаются высоким содержанием аскорбиновой кислоты. Редис и дайкон являются ценным источником важнейших минеральных элементов – калия, натрия, кальция, железа, фосфора, магния, серы и др. [2]. Все корнеплодные культуры, обеспечивая организм человека необходимыми витаминами, минералами и биологически активными соединениями, обладают лечебными свойствами и сохраняют свою доступность вне зависимости от сезона, что обуславливает необходимость их постоянного выращивания.

В современном овощеводстве сорт выступает центральным элементом технологии, непосредственно влияя на рентабельность производства. Однако аграрии все чаще ориентируются на гибриды F_1 , ценя их за стабильность, высокую урожайность и приспособленность к интенсивным технологиям. Существующее предложение на отечественном семенном рынке, в части сортимента корнеплодных культур, формирует разрыв с запросами практиков: несмотря на формальное разнообразие в Госреестре, многие сорта и гибриды не обладают комплексом хозяйственно-ценных признаков, необходимых для конкурентоспособного производства. Эффективность селекции и семеноводства корнеплодных овощных культур в значительной степени лимитирована их биологическими особенностями. Будучи преимущественно перекрестноопыляемыми растениями с двухлетним циклом развития, они требуют продолжительного периода яровизации (до трёх месяцев) при пониженных температурах (около $+4^{\circ}\text{C}$), что существенно удлиняет селекционный процесс. Современная селекция овощных корнеплодных культур требует системного применения биотехнологических методов. Культура клеток и тканей *in vitro*, первоначально использовавшаяся преимущественно для решения фундаментальных задач генетики, физиологии и молекулярной биологии растений, в настоящее время стала мощным инструментом прикладных сельскохозяйственных исследований. Интеграция биотехнологий в селекционный процесс позволяет кардинально ускорить достижение целей селекции.

Среди наиболее продуктивных направлений можно выделить следующие:

1. Ускоренное создание исходного материала с использованием методов андро- и гиногенеза для получения гомозиготных линий, что является ключевым эта-

пом в схеме гетерозисной селекции. Удвоенные гаплоиды (от англ. Doubled Haploids) характеризуются 100% гомозиготностью, отсутствием эффекта доминирования, обнаружением редких рецессивных аллелей, расширением спектра формообразовательного процесса за счет рекомбинантной изменчивости – все это способствует созданию уникальных форм и повышает эффективность практической селекции. Кроме того, на создание ДН-линии затрачивается 1-2 года, в то время как с использованием классических методов селекции для получения выровненных линий перекрестноопыляемых корнеплодных культур, которые, преимущественно, являются двулетними, необходимо потратить 8-12 лет;

2. Клональное микроразмножение. Помогает обеспечить быстрое тиражирование и сохранение ценных генотипов, включая стерильные и самонесовместимые линии, а также производство оздоровленного безвирусного посадочного материала;

3. Технология «спасение» зародышей (embryo rescue). Позволяет устранить постгамную несовместимость при межвидовой и межродовой гибридизации, что позволяет расширить генетическое разнообразие и передать ценные гены (устойчивость к болезням, стрессам, улучшение качества) от одного вида к другому.

Целью настоящего исследования является обобщение и представление результатов, демонстрирующих эффективность применения биотехнологических подходов для ускорения селекции различных корнеплодных овощных культур (морковь столовая, свёкла, пастернак, редис, дайкон, репа).

Материалы и методы исследований

В качестве растительного материала использовали перспективные сортообразцы овощных корнеплодных культур лаборатории селекции и семеноводства столовых корнеплодов и лаборатории генетики и цитологии ФГБНУ ФНЦО. Корнеплоды донорных растений после пяти месяцев яровизации при $4...6^{\circ}\text{C}$ в темноте, высаживали в пластиковые горшки диаметром 22 см, наполненные смесью торфа и перлита (7:3, v/v). Донорные растения выращивали в вегетационной камере с освещенностью $65\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ при использовании ламп Horturion HPS, 600 W 220 V E40 (Osram, Slovenia) для выращивания при постоянном температурном режиме 25°C и фотопериоде 16 ч/8 ч (день/ночь).

Для введения в культуру *in vitro* растительных эксплантов использовали ступенчатую поверхностную стерилизацию с использованием 70% спирта (30 секунд), 2,5% гипохлорита натрия с 1 каплей Tween 20 на 100 мл дезинфицирующего раствора (15 минут), трехкратную промывку стерильной дистиллированной водой (по 10 минут в каждом растворе). Культивирование эксплантов проводили на стеллажах со смешанным освещением люминесцентными лампами двух типов: OSRAM Fluora L36W/77 (с преобладанием синего и красного спектра) и Philips 36W/54-765 (с преобладанием белого спектра), при общей освещенности $24\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, фотопериоде 16 ч / 8 ч (день/ночь) при температуре 24°C круглосуточно.

Культура неопыленных семян моркови столовой. Оптимальную стадию развития женского гаметофита для индукции гиногенеза определяли по размеру завязи [3]. Для культивирования бутонов моркови (первая индукционная питательная среда) использовали среду MSm [4] с добавлением 20 г/л сахарозы, 7 г/л агар и тремя вариантами содержания регуляторов роста: 0,2 мг/л 2,4-Д, 0,2 мг/л

кинетина и их совместное применение. Через две недели из разросшихся бутонов изолировали семяпочки и помещали на свежие питательные среды (вторая индукционная питательная среда) на основе MSm с аналогичным сочетанием регуляторов роста. Образовавшийся каллус/эмбриониды переносили в пробирки с жидкой средой MSm с 24 г/л сахарозы и 0,1 мг/л кинетина.

Культура неопыленных семяпочек свеклы столовой.

Для индукции гиногенеза использовали питательную среду IMB (Induction Medium for Beta vulgaris) – разработанную в лаборатории биотехнологии ФГБНУ ФНЦО, содержащую 55 г/л сахарозы, 3 г/л фитогеля, 200 мг/л ампициллина и 0,4 мг/л тидиазурина (TDZ) [5]. Семяпочки, индуцирующие эмбриониды и каллусные структуры, переносили на твердую питательную среду MS [6] с 1 мг/л БАП и 0,1 мг/л ГК. Все полученные микропобеги свеклы независимо от исходного экспланта переносили на безгормональную среду MS с 2% сахарозой, 3 г/л фитогеля для формирования хорошо развитых розеток. Для укоренения побегов свеклы столовой использовали их погружение на 10-15 секунд в раствор индолилмасляной кислоты (ИМК) с концентрацией 50 мг/л с последующим их культивированием на твердой среде ½ IMB с 2% сахарозой и 3 г/л фитогеля.

Культура изолированных микроспор моркови столовой и пастернака посевного. Для культивирования микроспор моркови столовой и пастернака использовали среды NLN [7] и MSm с концентрацией сахарозы 13% и с содержанием регуляторов роста: 1 мг/л НУК и 1 мг/л 2,4-Д. Через 40 дней образовавшиеся эмбриониды переносили в пробирки с мостиками из фильтровальной бумаги и жидкой средой MSm с 2% сахарозой и 0,1 мг/л кинетина.

Вторичный эмбриогенез моркови столовой. Для изучения процесса вторичного эмбриогенеза выбирали получившиеся в культуре микроспор эмбриониды длиной 2-3 мм, имеющие возможность для производства вторичных эмбрионидов при продолжении культивирования. Использовали специальные плашки 6-well Culture Plate (Corning, USA) с добавлением 2 мл жидкой питательной среды MSm и 12-well Culture Plate (Corning, USA) с добавлением 1 мл жидкой питательной среды MSm со следующими вариантами добавления регуляторов роста: MSm с 2%-ной сахарозой и 0,2 мг/л кинетина; MSm с 13%-ной сахарозой и 0,2 мг/л кинетина; MSm с 13%-ной сахарозой и 1 мг/л 2,4-Д и 1 мг/л НУК; MSm с 13%-ной сахарозой без добавления регуляторов роста. В каждую ячейку помещали по одному эмбриониду двух генотипов, полученных в культуре изолированных микроспор из сорта Алтайская лакомка и культивировали в течении 30 дней на платформе-шейкер PSU-10i (Biosan) при скорости качания 40 оборотов/мин на свету при освещенности 48 мкмоль*м⁻²*с⁻¹, фотопериоде 16 часов день/8 часов ночь и температуре 22°C. Подсчет образовавшихся вторичных эмбрионидов проводили на 30 день культивирования.

Культура изолированных микроспор корнеплодных культур семейства Brassicaceae Burn. Изолирование микроспор, их культивирование в чашках Петри и регенерацию растений из эмбрионидов проводили согласно разработанным нами протоколам для редиса [8] и репы [9,10]. Для трудноотзывчивых генотипов использовали модифицированный протокол изоляции микроспор, разработанный для культур семейства Brassicaceae [11].

Клональное микроразмножение свеклы столовой. Простерилизованные семена помещали на безгормональ-

ную питательную среду MS с 3 г/л фитогеля для получения асептических проростков в течение 7-10 суток культивирования. Разные типы исходных эксплантов свеклы (фрагменты гипокотилей, верхушки соцветий, нераскрытые и раскрытые бутоны) в культуре соматических клеток и тканей культивировали на питательных средах MS (с 20 г/л сахарозы, 3 г/л фитогеля с 1 мг/л БАП; 0,1 мг/л БАП и 0,1 мг/л НУК. Регенерацию и укоренение хорошо развитых побегов проводили на безгормональной питательной среде MS с 2% сахарозой, 3 г/л фитогеля.

Клональное микроразмножение редиса европейско-го. Простерилизованные семена помещали по 1-2 штуки на мостики из фильтровальной бумаги в пробирки с 4-6 мл безгормональной питательной среды MS с 30 г/л сахарозы. Использовали по 100 семян каждого образца. Первые сутки семена инкубировали в термостате в темноте при температуре 28°C, а затем проращивали при температуре 24°C и фотопериоде 16 ч / 8 ч (день/ночь). Фрагменты гипокотилей длиной 4-5 мм 4 суточных стерильных проростков заглубляли точкой роста вверх и точкой роста вниз в баночки с питательной средой MS с 30 г/л сахарозы, 7 г/л агара, регуляторами роста НУК и БАП в концентрациях 0,2 мг/л. Для индукции морфогенеза применяли погружение исходных эксплантов в 0,01% раствор нитрата серебра на 30-40 минут. Культивирование эксплантов проводили в тех же условиях, что и проращивание семян.

Технология «спасения зародышей» от межвидовой и межродовой гибридизации у капусты белокочанной и дайкона. Стручки на 9, 15 и 18 день после опыления (ДПО) после поверхностной ступенчатой стерилизации разрезались продольно и из них выделялись семяпочки. Семяпочки надрезали скальпелем или разрезали пополам после чего помещали в жидкую среду MS с 80 г/л сахарозы и дополненную 400 мг/л гидролизата казеина. Работа проводилась в стерильных условиях в ламинарном боксе с использованием стереомикроскопа Stemi 305 оснащенного AxioCam 305 color (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Germany) при увеличении 10х. Чашки Петри с семяпочками культивировали при постоянном покачивании 60 об/мин на шейкере при температуре 24°C и естественном комнатном освещении. Доросшие до семядольной стадии зародыши, образовавшиеся в двух вариантах культивирования, переносились на твердую среду MS с сахарозой 10 г/л и 8 г/л агара. Зародыши выращивали на стеллажах при температуре 24°C и 16 ч. фотопериоде.

Результаты исследований и их обсуждение

Семейство Apiaceae (морковь столовая, пастернак).

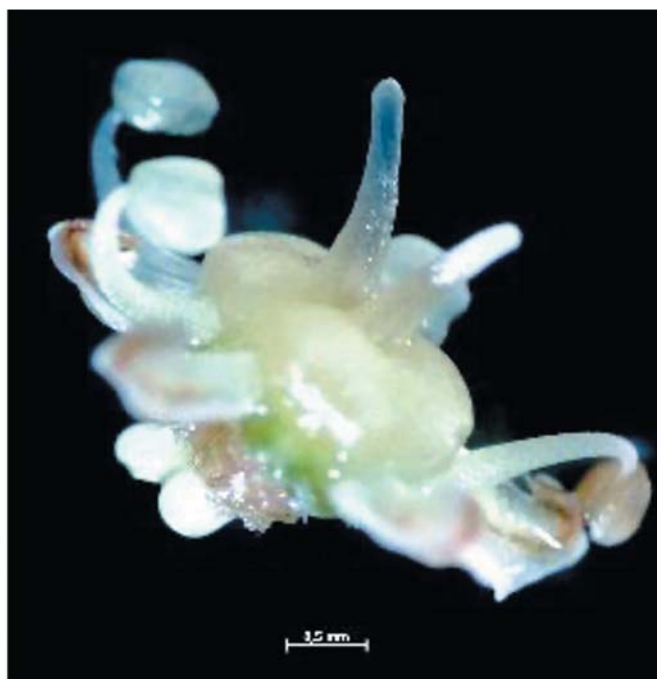
Метод удвоенных гаплоидов является высокоэффективным инструментом ускорения селекционного процесса сельскохозяйственных культур, в том числе относящихся к корнеплодной группе. Первые успехи в получении ДН-растений были достигнуты в лаборатории биотехнологии ВНИИССОК (с 2017 года ФГБНУ ФНЦО) для моркови столовой. Используя метод культивирования пыльников и неопыленных семяпочек, были разработаны не только эффективные протоколы с высоким выходом эмбрионидов, но и на основе полученных за счет этих технологий ДН-линий из сорта Нантская 4, еще в 2000 году был создан сорт моркови столовой «Соната» (при совместном участии с селекционерами на Западно-Сибирской овощной опытной станции – Авторское свидетельство №34702), что подтверждает высокую практическую значимость данных биотехнологий.

Образование удвоенных гаплоидов за счет индукции гиногенеза в культуре неопыленных семязпочек *in vitro* является единственно возможным способом получения ДН-растений от образцов с мужской стерильностью и альтернативой метода культуры пыльников/микроспор в тех случаях, когда у определенного генотипа андрогенез не имеет успеха или малоэффективен. В связи с очень малыми размерами бутонов у моркови (от 0,8 до 1,71 мм в длину в зависимости от генотипа и расположения на соцветии) изолирование

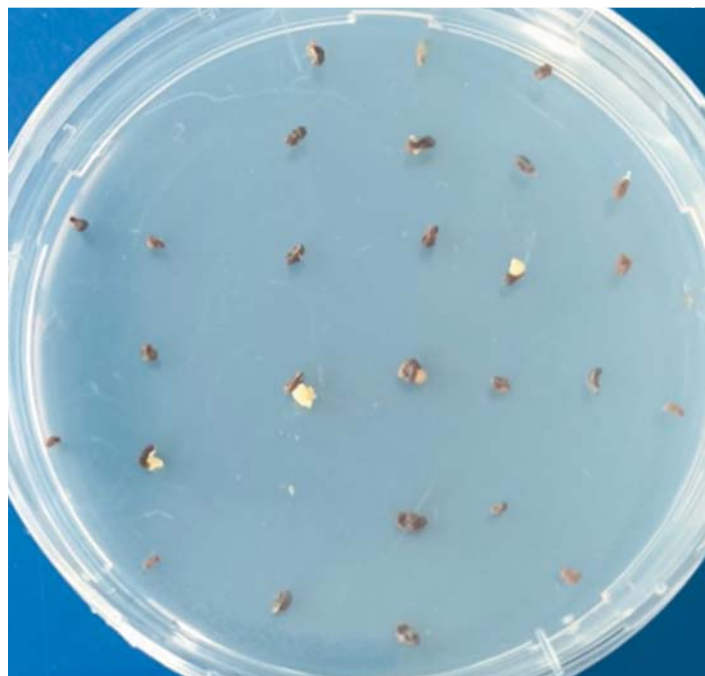
семязпочек размером 0,17-0,53 мм из бутона представляет собой очень трудоемкую операцию. На процесс индукции гиногенеза будет оказывать влияние достаточно большое количество факторов, основными из которых будет генотип и условия выращивания донорного растения, фаза развития бутона, состав индукционной питательной среды и условия культивирования [1,4]. На 8 генотипах, относящихся к разным сортотипам моркови столовой (Berlicum, Нантская, Флакке, Шантане) нами было изучено влияние регуляторов



А



Б



В



Г

Рис. 1. Индукция гиногенного развития в культуре *in vitro* у фертильного образца моркови столовой: бутоны моркови столовой на индукционной питательной среде MSm с 0,2 мг/л 2,4-Д и 0,2 мг/л кинетина через 2 недели культивирования (А); бутон с прорвавшимися через оболочку завязи семязпочками через 3 недели культивирования на среде MSm с 0,2 мг/л 2,4-Д и 0,2 мг/л кинетина (Б); чашка Петри с побуревшими изолированными семязпочками на 6 недели культивирования, у трех семязпочек наблюдается образование белого каллуса (В); образование эмбриоидов из каллуса (Г).
Fig. 1. Induction of gynogenetic development in *in vitro* culture in a fertile accession of carrot (*Daucus carota* L.): carrot buds on the induction MSm nutrient medium supplemented with 0.2 mg/L 2,4-D and 0.2 mg/L kinetin after 2 weeks of cultivation (A); a bud with ovules that have ruptured through the ovary wall after 3 weeks of cultivation on MSm medium with 0.2 mg/L 2,4-D and 0.2 mg/L kinetin (B); a Petri dish with browned isolated ovules at 6 weeks of cultivation, with three ovules showing formation of white callus (B); embryo formation from the callus (Г).

роста (2,4-D и кинетина) и их сочетание в составе индукционной питательной среды, как для культивирования бутонов, так и для культивирования изолированных из бутонов неопыленных семян. Совместное применение регуляторов роста 2,4-D (0,2 мг/л) и кинетина (0,2 мг/л) в составе обоих индукционных питательных сред (для культивирования бутонов и для культивирования изолированных завязей) позволило повысить выход гиногенных эмбриогенных структур у всех исследуемых образцов. Для отдельных генотипов образование гиногенных эмбриогенных структур было в 5,4 раза больше на средах с двумя регуляторами роста по сравнению с контрольной питательной средой, содержащей только 0,2 мг/л 2,4-D. Генотип оказался главным фактором, влияющим на образование эмбриогенных структур (каллуса и эмбриоидов), доля влияния фактора составила 72%. Максимально удалось добиться индукции гиногенного развития у 55,4% введенных в культуру семян для образца НИИОХ 336, относящегося к сортогену Берликум-Нантская, которая составила 54,9 % (в виде индукции каллусообразования) и 0,5% (в виде прямого эмбриогенеза) [12].

Одним из ограничивающих факторов для использования методик получения удвоенных в культуре неопыленных семян и культуре пыльников является присутствие в

культуре *in vitro* помимо гаплоидных клеток еще и соматических тканей, из которых также может образовываться каллус или эмбриоиды. В связи с этим полученные растения-регенеранты необходимо тестировать на гомозиготность с целью подтверждения гаметофитного происхождения с использованием молекулярных маркеров. Культура изолированных микроспор лишена этого недостатка и является менее трудоемким и наиболее эффективным способом получения удвоенных гаплоидов. Первые успешные исследования в культуре микроспор моркови были проведены Matsubara с коллегами в 1995 году [13], однако DH-растения были получены только в конце первого десятилетия 21 века [14,15].

Нами было проведено постадийное изучение процесса эмбриогенеза и показаны возможные пути развития индуцированных микроспор и эмбриоидов [16,17]. Было изучено влияние холодового стресса (предобработка бутонов при 5°C перед введением в культуру) и последующей высокотемпературной обработки (32°C после введения в культуру) и показано преимущество их совместного воздействия на индукцию эмбриогенеза. Впервые было определено влияние β -лактамов антибиотиков (ампициллина, цефотаксима, пенициллина) на индукцию эмбриогенеза в культу-

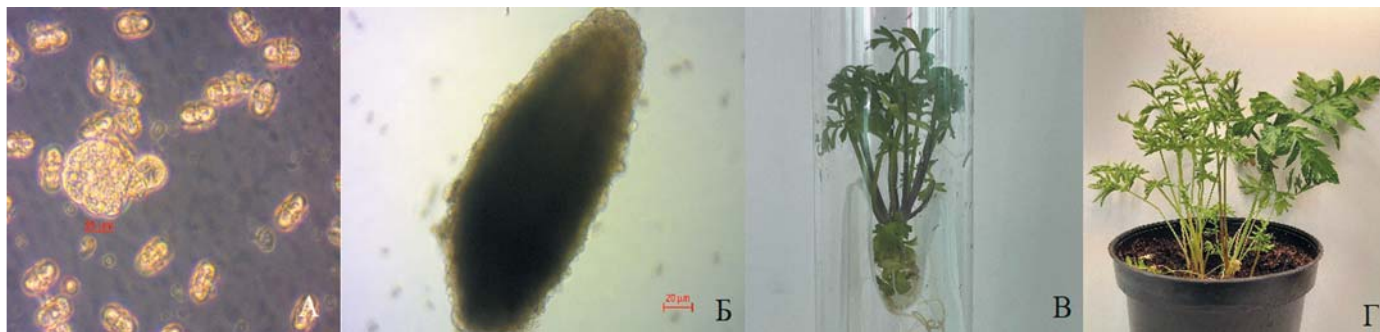


Рис. 2. Этапы технологии получения растений моркови столовой в культуре микроспор: многоклеточные эмбриоидные структуры (А); эмбриоид на торпедовидной стадии развития (Б); регенерация растений R0 из эмбриоидов (В); адаптация растений регенерантов к условиям *ex vitro* (Г)

Fig. 2. Stages of the technology for producing carrot (*Daucus carota* L.) plants via microspore culture: multicellular embryoid structures (A); an embryoid at the torpedo stage of development (B); regeneration of R0 plants from embryoids (B); acclimatization of regenerant plants to *ex vitro* conditions (Г)



Рис. 3. Удвоенные гаплоиды моркови столовой из селекционного образца №10 (из коллекции лаборатории генетики и цитологии ФГБНУ ФНЦО), полученные в культуре изолированных микроспор: растения-регенеранты перед закладкой на яровизацию (А); внешний вид семенного потомства от самоопыления DH-растения (Б)

Fig. 3. Doubled haploid (DH) carrot (*Daucus carota* L.) plants from breeding accession No. 10 (from the collection of the Laboratory of Genetics and Cytology, Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC), produced via isolated microspore culture: Regenerant plants before vernalization (A); The phenotype of the seed progeny from self-pollination of a DH plant (B)

ре изолированных микроспор *in vitro* у моркови столовой в концентрациях 0, 50, 100, 200 и 1000 мг/л и показано, что наиболее эффективным в культуре микроспор оказалось использование ампициллина в концентрации 100 мг/л. Применение цефотаксима в культуре микроспор моркови возможно при меньших концентрациях. Использование пенициллина оказалось неэффективным. Добавление в питательную среду для культивирования 1% суспензии активированного угля в 0,5% агарозе, также способствовало увеличению образования количества эмбриоидов в 1,5 и 1,8 раз у каждого из двух сортообразцов [18] (Romanova et al., 2023). Было изучено влияние антимитотических (колхицина, трифлуралина) агентов на процесс удвоения хромосомного набора и показано, что максимальный процент диплоидных растений наблюдался при обработке гаплоидных эмбриоидов колхицином 1 г/л (34%) и трифлуралином 0,1 г/л (28%) [19] (Fomicheva M., Kozar E., Domblides E., 2025). После оптимизации этапов технологии были получены ДН-растения из генотипов, относящихся к различным сортотипам моркови (Берликум, Амстердамская, Император, Нантская, Валерия, Шантане). Несмотря на то, что для отдельных генотипов эффективность разработанного нами протокола достигла до 167 первичных эмбриоидов моркови столовой на одну чашку Петри диаметром 6 см, данная технология нуждается еще в существенной доработке, так как выход эмбриоидов остается нестабильным и существенно зависит от генотипа. Необходимо дальше проводить изучение факторов, способных повлиять на индукцию эмбриогенеза, регенерацию растений и удвоение хромосомного набора.

При цитологическом изучении процесса эмбриогенеза в культуре изолированных микроспор, нами была выявлена характерная особенность для эмбриоидов моркови - высокая способность к вторичному эмбриогенезу, которую необходимо учитывать при оценке эффективности технологии по количеству полученных генотипов/первичных эмбриоидов в одной чашке Петри. Образовавшиеся эмбриоиды начиная с глобулярной стадии развития, способны формировать на своей поверхности вторичные эмбриоиды. В дальнейшем они могли легко отделяться и развиваться уже независимо. Использование платформы-шейкер значительно ускорило процесс вторичного эмбриогенеза. В связи с этим, для корректности оценки, первичные эмбриоиды необходимо пересаживать в индивидуальные чашки Петри, как только они станут видны невооруженным глазом. Однако способность к вторичному эмбриогенезу можно использовать в селекции также и с целью тиражирования индивидуальных генотипов и для протоколов по микроклональному размножению [20]. Проведенное исследование по изучению влияния генотипа и морфологии индивидуального эмбриоида, концентрации сахарозы (2% и 13%) и регуляторов роста (кинетин, 2,4-Д, НУК) в составе питательной среды MSm на процесс вторичного эмбриогенеза показало, что вне зависимости от генотипа, наиболее интенсивное образование вторичных эмбриоидов происходит на питательных средах с 2% сахарозой и кинетином (табл. 1, рис. 4). При этом вторичный эмбриогенез активно происходит уже спустя 14 суток после пересадки первичного эмбриоида на регенерационную питательную среду на основе MSm.

Таблица 1. Сравнение количества эмбриоидов моркови столовой, полученных от генотипов №7 и №12 из сортообразца «Алтайская лакомка» на четырех вариантах питательных сред спустя 30 дней культивирования
Table 1. Comparison of carrot embryoid yield from genotypes No. 7 and No. 12 of the breeding line «Altayskaya Lakomka» on four different nutrient media variants after 30 days of cultivation.

Питательные среды	Выход эмбриоидов с двух генотипов	
	№7	№12
MSm+0,2 мг/л кин. +2 % сахарозы	27,67±4,41	61,77±2,33
MSm+0,2 мг/л кин. +13 % сахарозы	7,33±0,88	18,33±1,2
MSm б/г+13 % сахарозы	5,67±2,67	3,33±1,33
MSm+1 мг/л НУК+1 мг/л 2,4-Д +13 % сахарозы	4±1,73	8±0,58

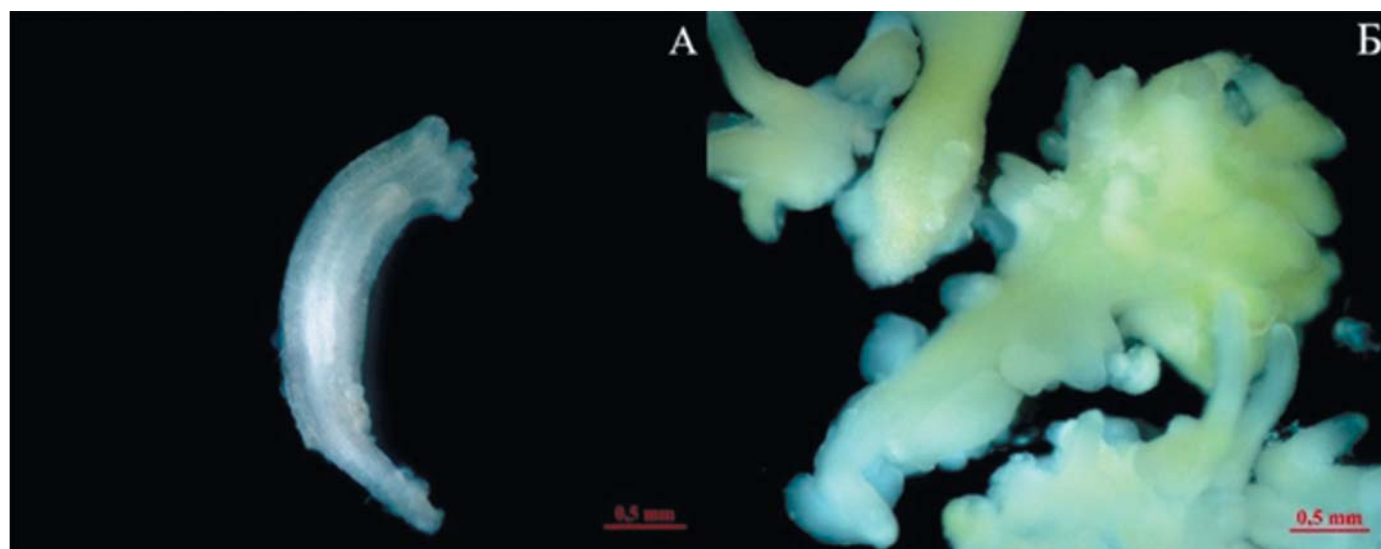


Рис. 4. Эмбриоиды моркови, размноженные на питательной среде MSm с 2% сахарозой с добавлением 0,2 мг/л кинетина: первичный эмбриоид (А); вторичные эмбриоиды, полученные от первичного спустя 14 суток культивирования (Б)
Fig. 4. Embryoids proliferated on MSm nutrient medium with 2% sucrose supplemented with 0.2 mg/L kinetin: primary embryoid (A); secondary embryoids derived from the primary embryoid after 14 days of cultivation (B)

Технология получения удвоенных гаплоидов в культуре изолированных микроспор была опробована нами и на других представителях семейства *Aricaceae*. Наилучшие результаты были получены для такой популярной и востребованной корнеплодной культуры, как пастернак (*Pastinaca sativa* L.). Было отмечено, что развитие микроспор пастернака посевного происходит аналогично развитию микроспор моркови столовой. Для успешной индукции эмбриогенеза в культуре изолированных микроспор *in vitro* необходимо отбирать плотно закрытые бутоны из крайнего ряда зонтичков центрального соцветия, имеющего слабо вогнутую, либо почти плоскую форму и содержащих преимущественно микроспоры на поздней вакуолизированной стадии развития. Размер микроспор пастернака на этой стадии развития составляет 22-29 мкм в длину (в зависимости от генотипа, положения соцветия и условий выращивания донорного растения), в то время как у моркови столовой микроспоры на аналогичной стадии достигали 18-22 мкм. Для индукции эмбриогенеза можно культивировать микроспоры как на модифицированных питательных средах NLN, так и на MSm с 13% сахарозой. Процесс регенерации растений из эмбриоидов пастернака посевного на регенерационной питательной среде, разработанной для моркови (MSm с 2% сахарозой и 0,1 мг/л кинетина) протекает на 2-3 недели дольше по сравнению с морковью. Необходимо учитывать, что в отличие от моркови столовой, развивающийся проросток необходимо переносить на свежую питательную среду каждые 14 дней, иначе достаточно быстро происходит побурение и гибель эксплантов. Максимальная эффективность эмбриогенеза у пастернака наблюдалась на индукционной среде MSm-13, составив 20 эмбриоидов на чашку Петри (диаметр 6 см). Однако лишь 40% эмбриоидов успешно регенерировали и развивались до растений (рис. 5), готовых к адаптации к условиям *ex vitro*. Среди исследованных растений-регенерантов были обнаружены как гаплоидные, так и диплоидные формы. Присутствие диплоидных растений подтверждает вероятность спонтанной диплоидизации у этого вида, индуцированной длительным культивированием *in vitro*.

Семейство *Amaranthaceae* (свёкла столовая). В настоящее время единственным способом получения удвоенных гаплоидов (DH) у свеклы столовой является индукция гиногенеза в культуре неопыленных семяпочек *in vitro*, поскольку сообщения об использовании метода андрогенеза в мире отсутствуют. В лаборатории биотехнологии ФГБНУ ФНЦО исследования по разработке протокола создания удвоенных гаплоидов свеклы столовой в культуре гиногенеза начаты с 2010 года. На первоначальном этапе по результатам экспериментальных исследований определены стадии развития женского гаметофита (семяпочек) как фертильных линий-опылителей,

выделенных из сортопопуляций разных сортотипов, так и гибридных популяций свеклы столовой из коллекции лаборатории селекции и семеноводства столовых корнеплодов. Для успешной индукции гиногенеза у свеклы использовали семяпочки, содержащие зрелый зародышевый мешок, что соответствовало бутону, расположенным на участке колосовидного цветоноса донорных растений сразу за недавно раскрытым бутонном. Выявлено, что для успешной индукции гиногенеза у свеклы оптимально использовать семяпочки со зрелым зародышевым мешком, отобранные из бутонов, расположенных на колосовидном цветоносе растений сразу за раскрывшимся бутонном. Разработанная в ходе проведенных экспериментов питательная среда IMB с 0,4 мг/л тидиазулона (TDZ) и культивирование в условиях 28°C, в темноте в течение 4 недель позволило добиться эффективности индукции гиногенеза у наиболее отзывчивого генотипа Нежность до 25 штук на 100 культивируемых [21]. В эксперименте удалось индуцировать образование каллуса у шести из 11 включенных в исследование образцов свеклы столовой. В зависимости от генотипа среднее количество семяпочек, индуцирующих гиногенез, варьировало от 1,2±0,37 до 7,4±0,23 штук на одну чашку Петри. У трех генотипов максимально получено от шести до девяти индуцированных семяпочек с одной чашки Петри. В экспериментах с добавлением нитрата серебра для всех генотипов наблюдалось незначительное увеличение количества индуцированных семяпочек на 1-2 шт. в одной чашке Петри. Отмечено, что в присутствии нитрата серебра семяпочки более длительное время не изменяли свою окраску до темно-коричневой и оставались белыми или бледно-розовыми [21]. У пяти изученных генотипов индукционная активность семяпочек вообще не выявлена. Эффективность индукции гиногенеза свеклы сахарной с использованием такого же состава индукционной питательной среды составила максимально у наиболее отзывчивого генотипа № 37130 – 27,3%, а в жидкой питательной среде того же состава – до 8%. Увеличение в индукционной питательной среде концентрации тидиазулона до 0,8 мг/л приводило к ингибированию гиногенеза, либо снижению индукции в 1,5-1,9 раза в зависимости от генотипа. В экспериментах со свеклой сахарной установлено, что наибольшая эффективность индукции гиногенеза достигнута при концентрации сахарозы 5%; снижение концентрации до 20 г/л, либо увеличение до 80 г/л не было эффективно. Отличительной особенностью процесса гиногенеза свеклы столовой на твердой питательной среде стало преимущественное развитие по пути каллусогенеза, тогда как у свеклы сахарной – через прямой эмбриогенез, часто с одновременным образованием эмбриоидных и каллусных структур, а в редких случаях сросшихся эмбриоидов в результате полиэмбрионии [5].

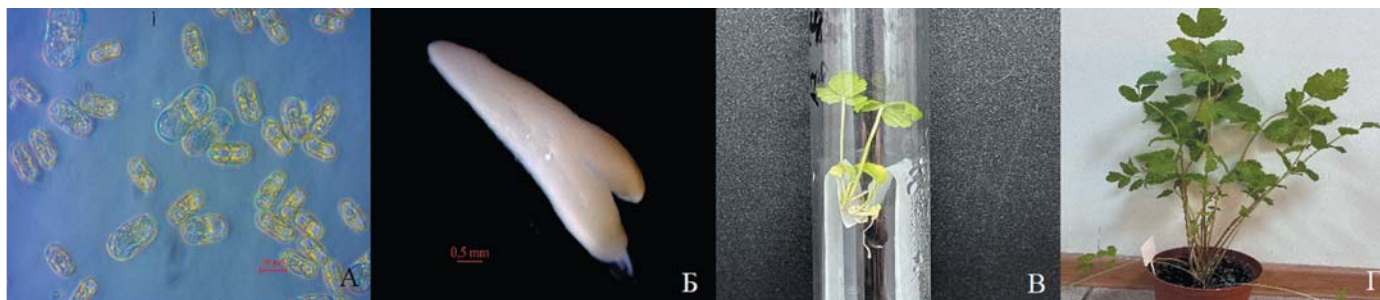


Рис. 5. Этапы технологии получения растений пастернака в культуре микроспор: многоклеточные эмбриоидные структуры (А); эмбриоид на семядольной стадии развития (Б); регенерация растений R0 из эмбриоидов (В); адаптация растений регенерантов к условиям *ex vitro* (Г)
Fig. 5. Stages of the technology for producing parsnip (*Pastinaca sativa* L.) plants via microspore culture: multicellular embryoid structures (A); an embryoid at the cotyledonary stage of development (B); regeneration of R0 plants from embryoids (B); acclimatization of regenerant plants to *ex vitro* conditions (Г)

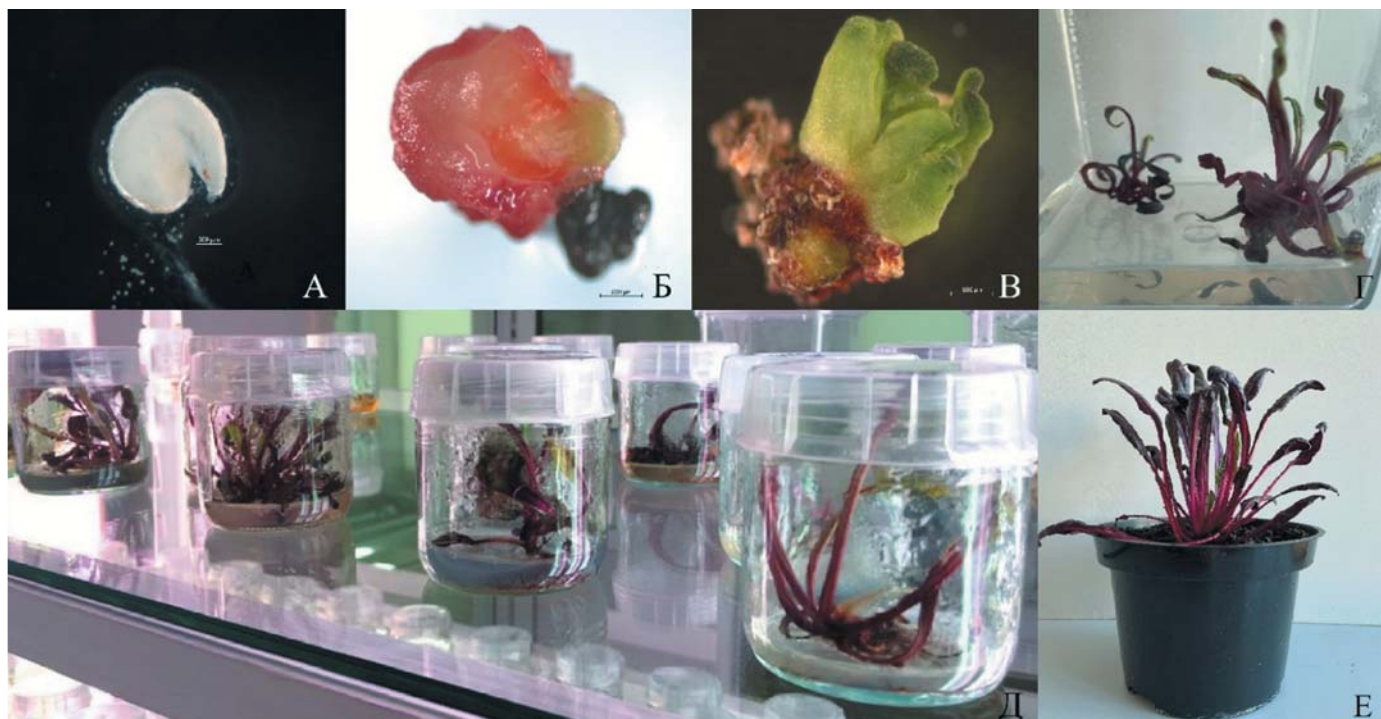


Рис. 6. Разработка технологии получения гиногенных растений свеклы столовой в культуре неопыленных семязпочек *in vitro*: семязпочки свеклы столовой на подходящей стадии развития сразу после выделения на индукционную питательную среду ИМВ с 0,4 мг/л ТДЗ (А); образование гиногенной структуры в результате разрыва микропиллярной части семязпочки через 4-6 недель культивирования (Б); образование зелёных меристематических участков, инициирующих регенерацию побегов на регенерационной питательной среде MS с 1 мг/л БАП и 0,1 мг/л ГК (В); регенерация побегов (Г); развитие растений-регенерантов с формированием корневой системы на безгормональной питательной среде MS после обработки эксплантов раствором индолмасляной кислоты (ИМК) с концентрацией 50 мг/л в условиях *in vitro* (Д); гаплоидное растение свеклы столовой, акклиматизированное к условиям *ex vitro* (Е)

Fig. 6. Development of a technology for producing gynogenic plants of table beet (*Beta vulgaris* L.) in unfertilized ovule culture *in vitro*: table beet ovules at the appropriate developmental stage immediately after isolation on the induction nutrient medium IMB with 0.4 mg/L TDZ (A); formation of a gynogenic structure resulting from the rupture of the micropylar part of the ovule after 4-6 weeks of cultivation (B); formation of green meristematic areas initiating shoot regeneration on the regeneration nutrient medium MS with 1 mg/L BAP and 0.1 mg/L GA (B); shoot regeneration (Г); development of regenerant plants with root system formation on hormone-free MS nutrient medium after treatment of explants with a 50 mg/L indole-3-butyric acid (IBA) solution under *in vitro* conditions (Д); a haploid table beet plant acclimatized to *ex vitro* conditions (E)

Успешное развитие гиногенных структур свеклы столовой, также как и свеклы сахарной наблюдалось на твердой регенерационной питательной среде MS с 1 мг/л БАП и 0,1 мг/л ГК. Регенерация листовых розеток свеклы столовой из образовавшихся в индуцированных семязпочках эмбриоидов наблюдалась в результате разрастания семядольных и гипокотильных участков. Регенерационная способность каллусных структур, развившихся из одной индуцированной семязпочки, определялась генотипом и варьировала от 0 до 27,3%. У свеклы столовой отмечена низкая регенерационная способность, только у четырех из шести генотипов удалось инициировать побегообразование и получить микророзетки/микропобеги. Наибольшая морфогенетическая активность каллусных структур и выход растений-регенерантов в количестве 24 штук отмечены у сорта Нежность, у которого все семязпочки индуцировали развитие морфогенного каллуса и эмбриоидов и с одной семязпочки получено $4,9 \pm 1,8$ микропобегов. Регенерационная способность каллусных структур из индуцированных семязпочек сорта Добрыня составила 12,5%, получено 16 растений-регенерантов в условиях *in vitro*. В отличие от свеклы столовой, у всех исследуемых генотипов свеклы сахарной удалось инициировать регенерацию и получить микророзетки/микропобеги, до семи побегов из одной индуцированной семязпочки у наиболее отзывчивого генотипа № 37130. Процесс укоренения полученных регенерантов свеклы столовой являлся трудоемким и проходил с осложнениями. Развитие корневой системы у 80% микропобегов свеклы столовой было достигнуто только в

случае обработки оснований побегов раствором индолмасляной кислоты (ИМК) в концентрации 50 мг/л в течение 10-15 с. в отличие от свеклы сахарной, у которой дополнительного этапа укоренения для микропобегов не требовалось. С использованием проточной цитометрии, прямого подсчета хромосом в меристемных клетках гиногенных растений свеклы сахарной и столовой показано, что все полученные растения-регенеранты были гаплоидами ($n=x=9$) [5].

В современной селекции свеклы столовой, особенно для создания гетерозисных гибридов, помимо получения удвоенных гаплоидов, большое значение для ускоренного размножения и длительного сохранения селекционных генотипов приобретает клональное микроразмножение, базирующееся на использовании культуры соматических клеток и тканей *in vitro*. Применение микроразмножения в практической селекции свеклы, как двулетней, трудоемкой культуры, позволит сохранить в культуре, размножить и включить в селекционный процесс целый ряд исходных линий с признаками ЦМС, закрепительной способностью и другими хозяйственно-ценными признаками. В связи с этим в лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений ФГБНУ ФНЦО проводятся исследования по разработке технологии клонального микроразмножения свеклы столовой. В результате этих исследований выявлено, что оптимальными эксплантом для введения в культуру соматических клеток и тканей *in vitro* являются гипокотильные экспланты, выделенные из

асептических проростков, а также верхние участки колосовидных соцветий, образованные еще не сформированными бутонами. Использование в качестве исходных эксплантов верхних участков соцветий свеклы и культивирование их на питательной среде MS с 1 мг/л БАП позволяет достичь выхода регенерантов с коэффициентом размножения 1,9. Наибольший практический выход растений-регенерантов свеклы получен при использовании в качестве исходных эксплантов фрагментов гипокотилей длиной 4-5 мм, выделенных из верхней части асептических проростков, выращенных из семян, и захватывающих ткани апикальной меристемы. Такого типа экспланты, культивируемые на питательной среде MS с 0,1 мг/л БАП и 0,1 мг/л НУК обладали высокой способностью к органогенезу и демонстрировали высокую эффективность размножения с коэффициентом размножения – до 10 микропобегов с одного экспланта.

Семейство Brassicaceae (редис, дайкон, репа). В отличие от рапса для большинства овощных культур семейства Капустные, эффективные протоколы получения удвоенных гаплоидов до сих пор не созданы. Это в полной мере относится к таким важным корнеплодным культурам, как репа, редис и дайкон. Среди них редис демонстрирует наибольшую сложность, характеризуясь минимальной отзывчивостью и считаясь одной из наиболее проблемных культур для данного биотехнологического подхода. В ФГБНУ ФНЦО были разработаны протоколы получения удвоенных гаплоидов в культуре изолированных микроспор для редиса [8] и

репы [9,10]. Для трудноотзывчивых генотипов предлагается использовать новый способ изоляции микроспор, разработанный для культур семейства Brassicaceae [11]. Этот технологический прием повышает чистоту препарата, расширяет диапазон линейных размеров бутонов, пригодных для технологии, увеличивает процент микроспор на восприимчивой к эмбриогенезу стадии развития, увеличивает выход эмбриоидов и позволяет получить удвоенные гаплоиды даже у ранее неотзывчивых генотипов (Патент на изобретение № 2807444 «Способ изоляции микроспор для получения удвоенных гаплоидов семейства Brassicaceae в культуре микроспор *in vitro*». Патентообладатель - ФГБНУ ФНЦО). Эффективность метода была доказана экспериментальным путем на капусте белокочанной, капусте краснокочанной, рапсе яровом, горчице сарептской, редисе и репе. Выход эмбриоидов при использовании данной модификации технологии увеличивался в несколько раз (у отдельных генотипов в 7,5 раз) и позволял получить эмбриоиды даже у неотзывчивых ранее генотипов. При использовании культуры изолированных микроспор для редиса максимальная эффективность технологии составила – 8 эмбриоидов на чашку Петри, а для репы – 53 эмбриоида [9]. Полученные ДН-линии были переданы селекционерам и включены в селекционный процесс.

Из полученного семенного потомства R0 растений-регенерантов редиса европейского по хозяйственно ценным признакам было выделено три ДН-линии редиса.



Рис. 7. ДН-линия редиса европейского «Веня»
Fig. 7. A DH-line of European radish «Venya»



Рис. 8. ДН-линия редиса европейского «Персей»
Fig. 8. A DH-line of European radish «Persey»



Рис. 9. ДН-линия редиса европейского «Жегалов»
Fig. 9. A DH-line of European radish «Zhegalov»

Иммунологическая оценка этих линий выявила более высокую их устойчивость к бактериальной гнили относительно исходных родительских форм. Данные линии уже включены в процесс гибридизации селекционерами ФГБНУ ФНЦО и получены авторские свидетельства на селекционные достижения: ДН-линия редиса европейского Жегалов (заявка

№7754534 от 17.08.2023), ДН-линия редиса европейского Венья (заявка №7754535 от 17.08.2023), ДН-линия редиса европейского Персей (заявка №7754533 от 17.08.2023).

Перспективным направлением, позволяющим значительно расширить генетическое разнообразие является межродовая (intergeneric) и межвидовая (interspecific) гибридиза-

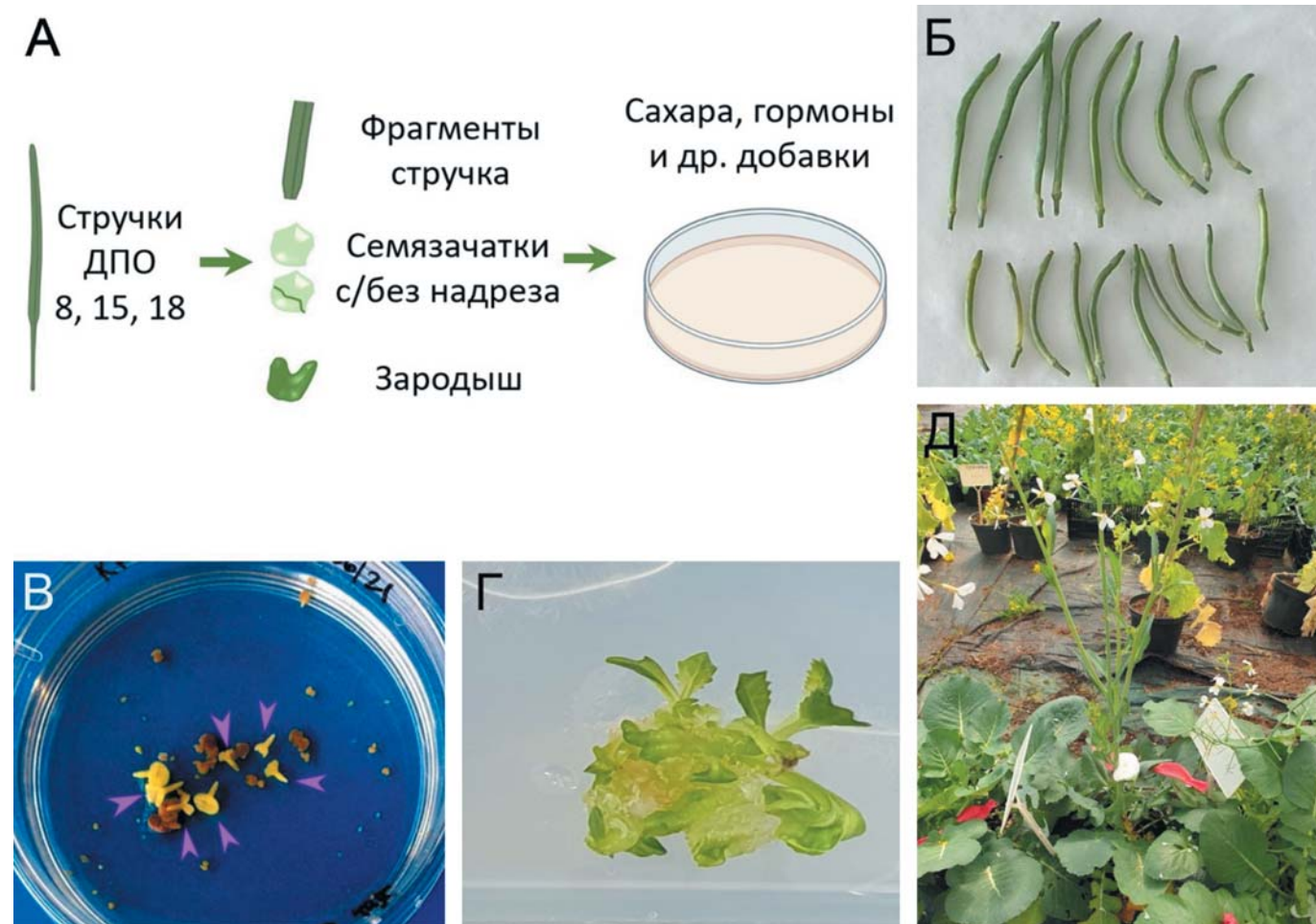


Рис. 10. Спасение зародышей, полученных при отдаленной гибридизации : на 9, 15 и 18 ДПО собирали стручки от скрещивания капусты белокачанной и дайкона, стручки подвергали поверхностной стерилизации, после чего в стерильных условиях выделялись и высаживались на различные среды фрагменты стручков, надрезанные и интактные семязачатки, а также изолированные зародыши (А); внешний вид стручков от гибридизации (Б); выделенные и надрезанные семяпочки, из которых вымывались развивающиеся зародыши (В); вторичный эмбриогенез и формирование полноценных растений из зародышей на агаризованной среде для регенерации (Г); адаптированные к условиям ex vitro растения, выращенные в условиях теплицы, растения проявляли промежуточные фенотипические характеристики относительно обоих родителей: слаборассечённый лист и восковой налет (от капусты белокачанной), при этом белая окраска цветков и наличие опушения у листьев (от дайкона) (Д)

ция. Отдельные представители семейства Brassicaceae обладают уникальными адаптивными характеристиками, включая устойчивость к патогенам, толерантность к абиотическим стрессам и повышенное содержание биоактивных соединений. Однако успешное получение межвидовых/межродовых гибридов часто лимитировано наличием презиготических барьеров, постгамной несовместимостью, приводящей к абортации зародыша на ранних стадиях развития, а также стерильностью полученных гибридных форм. Технология «спасения зародышей *in vitro*» позволяет преодолевать барьеры несовместимости путем изоляции и культивирования незрелых гибридных зародышей на искусственных питательных средах. Последующее удвоение хромосомного набора за счет обработки антимитотическими веществами *in vivo* и *in vitro* позволит получить фертильные аллополиплоидные и амфидиплоидные формы.

В результате проведенных исследований был оптимизирован протокол технологии «спасение зародышей» для получения гибридов от отдаленной гибридизации. Методика была применена для создания межродовых гибридов между капустой белокочанной (*Brassica oleracea* L.) и устойчивым к киле дайконом (*Raphanus sativus* L.), а также межвидовых гибридов при скрещивании капусты белокочанной с репой (♀ *B. oleracea* L. × ♂ *B. rapa*). В результате было получено 28 гибридных растений. Эффективность технологии составила 4,6% развившихся зародышей от числа введенных в культуру семяпочек. Наилучшим эксплантом оказались надрезанные скальпелем семяпочки, которые изолировали из стерилизованных стручков на 15–18 день после опыления (ДПО). Наивысшая эффективность развития зародышей была достигнута при культивировании семяпочек в чашках Петри на жидкой питательной среде MS с 80 г/л сахарозы и 400 мг/л гидролизата казеина при постоянном покачивании на шейкере (60 об/мин), температуре 24°C и естественном комнатном освещении.

При фенотипической оценке межвидовых гибридов был выявлен широкий спектр проявления родительских признаков. Такие особенности, как рассеченность листьев, восковой налет и опушенность, проявлялись у разных растений в различных комбинациях и с разной степенью выраженности, что отражает смешение признаков обоих родителей. Несмотря на то, что все генотипы зацвели в первый год, получить семена от самоопыления смогли только от растения одного генотипа (рис. 10). Остальные межвидовые гибриды были обработаны колхицином (0,02% раствор в течение 24 и 48 часов) в культуре *in vitro* и культуре *ex vitro* с целью удвоения генома, которое позволит преодолеть стерильность растений.

Микроклональное размножение служит ключевым инструментом в современной селекции, применяясь как в качестве самостоятельной технологии (для размножения ценных образцов и форм с мужской стерильностью), так и в качестве отдельного этапа в технологиях получения удвоенных гаплоидов и «спасения» зародышей для последующего тиражирования растений-регенерантов. Проведенные исследования на редисе позволили разработать оптимизированный протокол клонального микроразмножения для корне-

плодных культур *R. sativus* L. Установлено, что наиболее эффективными эксплантами являются гипокотили с участком меристематических тканей эпикотилия. Прямая регенерация на питательной среде с НУК и БАП в концентрациях 0,2 мг/л обеспечивала развитие до 17 адвентивных побегов с одного экспланта при частоте регенерации 25%. Существенное увеличение выхода побегов – в пять раз – достигалось при ориентации гипокотилей точкой роста вверх. Предобработка эксплантов 0,1% раствором нитрата серебра в течение 1 часа способствовала повышению коэффициента размножения в 1,2–5 раз [22]. На этапе укоренения наибольшая эффективность была достигнута на безгормональной питательной среде MS, при этом критически важной являлась техника высадки микропобегов строго на поверхность среды без заглубления. Альтернативный высокоэффективный метод заключался в использовании жидкой среды MSm с добавлением 0,1 мг/л кинетина в пробирках с мостиками из фильтровальной бумаги. Для преодоления аномального морфогенеза у части растений, проявляющегося в образовании корнеплодоподобных структур и вторичных опухолевидных разрастаний, применялась многократная диссекция аномалий с последовательными пересадками. В результате модификации этапа укоренения процент успешной адаптации растений-удвоенных гаплоидов к условиям *in vivo* был повышен с 0–14% до 95–98%, что подтверждает высокую эффективность разработанного протокола для целей ускоренной селекции [23].

Заключение

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность применения комплекса биотехнологических методов для значительного ускорения селекционного процесса корнеплодных культур. Разработанные и оптимизированные протоколы получения удвоенных гаплоидов через культуру изолированных микроспор и неопыленных семяпочек, технологии спасения зародышей и клонального микроразмножения показали воспроизводимые результаты на представителях ключевых семейств: *Amaranthaceae* (свёкла столовая и свекла сахарная), *Apiaceae* (морковь, пастернак) и *Brassicaceae* (редис, репа, дайкон). Полученные количественные показатели по эффективности ДН-технологий, такие как выход до 161 эмбриоида у моркови и 53 эмбриоида у репы, демонстрируют практическую значимость методик. Успешное создание межвидовых гибридов с использованием «embryo rescue» и регистрация новых сортов и перспективных ДН-линий (таких как морковь «Соната» и редис «Жегалов», «Веня», «Персей») являются прямым доказательством успешной интеграции биотехнологических подходов в практическую селекцию. Таким образом, реализованный в работе комплексный подход, основанный на тесном взаимодействии биотехнологов и селекционеров, позволяет преодолеть ключевые ограничения традиционной селекции. Внедрение этих методов открывает возможность существенного сокращения сроков создания новых конкурентоспособных сортов и гибридов корнеплодных культур, что является весомым вкладом в решение задачи обеспечения продовольственной безопасности.

• Литература

1. Тюкавин Г.Б. Основы биотехнологии моркови. Под общ. ред. и с предисл. В.Ф. Пивоварова. Москва, 2007. 479 с. ISBN 978-5-901695-19-7.
2. Федорова М.И., Степанов В.А. Корнеплодные овощные растения, направления селекции, результаты. *Овощи России*. 2017;(4):16–22. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-4-16-22>
<https://www.elibrary.ru/zfbfmb>
3. Домблидес А.С. Разработка лабораторной технологии получения гиногенных растений моркови *in vitro*. Москва, 2001. 140 с. <https://www.elibrary.ru/qdkcsp>
4. Masuda K., Kikuta Y., Okazawa Y. A revision of the medium for somatic embryogenesis in carrot suspension culture. *Journal of the Faculty of Agriculture*. 1981. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-REVISION-OF-THE-MEDIUM-FOR-SOMATIC-EMBRYOGENESIS-Masuda-Kikuta/940c4aca79be26d0f0011e82d1c5b132da818119>
5. Zayachkovskaya T., Alyokhina K., Mineykina A., Romanova O., Vjurtts T., Tukuser Y., et al. Optimizing Different Medium Component Concentration and Temperature Stress Pretreatment for Gynogenesis Induction in Unpollinated Ovule Culture of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). *Horticulturae*. 2023;9(8):900. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9080900>
6. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
7. Lichter R. Induction of Haploid Plants From Isolated Pollen of *Brassica napus*. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*. 1982;105(5):427–434. [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(82\)80040-8](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(82)80040-8)
8. Kozar E., Domblides E. Protocol of European Radish (*Raphanus sativus* L.) Microspore Culture for Doubled Haploid Plant Production. In: Segui-Simarro JM (ed.) Doubled Haploid Technology: Volume 2: Hot Topics, Apiaceae, Brassicaceae, Solanaceae. New York, NY: Springer US; 2021. p. 217–232. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1335-1_13
9. Shumilina D., Kozar E., Chichvarina O., Korottseva K., Domblides E. *Brassica rapa* L. ssp. *chinensis* Isolated Microspore Culture Protocol. In: Segui-Simarro JM (ed.) Doubled Haploid Technology: Volume 2: Hot Topics, Apiaceae, Brassicaceae, Solanaceae. New York, NY: Springer US; 2021. p. 145–162. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1335-1_9
10. Shumilina D., Kornukhin D., Domblides E., Soldatenko A., Artemyeva A. Effects of Genotype and Culture Conditions on Microspore Embryogenesis and Plant Regeneration in *Brassica Rapa* ssp. *Rapa* L. *Plants*. 2020;9(2):278. <https://doi.org/10.3390/plants9020278>
11. Kozar E.V., Kozar E.G., Domblides E.A. Effect of the Method of Microspore Isolation on the Efficiency of Isolated Microspore Culture *In Vitro* for Brassicaceae Family. *Horticulturae*. 2022;8(10):864. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100864>
12. Domblides A.S. Anther and ovule *in vitro* culture in carrot (*Daucus carota* L.). *Acta Horticulturae*. 2017;(1153):55–60. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1153.9>
13. Matsubara S., Dohya N., Murakami K. Callus formation and regeneration of adventitious embryos from carrot, fennel and mitsuba microspores by anther and isolated microspore cultures. *Acta Horticulturae*. 1995;(392):129–138. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.392.15>
14. Górecka K., Kowalska U., Krzyżanowska D., Kiszczak W. Obtaining carrot (*Daucus carota* L.) plants in isolated microspore cultures. *Journal of Applied Genetics*. 2010;51(2):141–147. <https://doi.org/10.1007/BF03195722>
15. Li J.R., Zhuang F.Y., Ou C.G., Hu H., Zhao Z.W., Mao J.H. Microspore embryogenesis and production of haploid and doubled haploid plants in carrot (*Daucus carota* L.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2013;112(3):275–287. <https://doi.org/10.1007/s11240-012-0235-5>
16. Вюртц Т.С., Домблидес Е.А., Шмыкова Н.А., Федорова М.И., Кан Л.Ю., Домблидес А.С. Получение ДН-растений в культуре изолированных микроспор моркови. *Овощи России*. 2017;(5):25–30. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-25-30>
<https://www.elibrary.ru/orxrrl>
17. Shmykova N., Domblides E., Vjurtts T., Domblides A. Haploid Embryogenesis in Isolated Microspore Culture of Carrots (*Daucus carota* L.). *Life*. 2021;11(1):20. <https://doi.org/10.3390/life11010020>
18. Romanova O., Vjurtts T., Mineykina A., Tukuser Y., Kulakov Y., Akhramenko V., et al. Embryogenesis induction of carrot (*Daucus carota* L.) in isolated microspore culture. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(1):25–34. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-548>
19. Fomicheva M., Kozar E., Domblides E. Carrot (*Daucus carota* L.) Haploid Embryo Genome Doubling with Colchicine and Trifluralin. *Horticulturae*. 2025;11(5):505. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050505>
20. Fujimura T., Komamine A. Synchronization of Somatic Embryogenesis in a Carrot Cell Suspension Culture. *Plant Physiology*. 1979;64(1):162–164. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.162>
21. Zayachkovskaya T., Domblides E., Zayachkovsky V., Kan L., Domblides A., Soldatenko A. Production of Gynogenic Plants of Red Beet (*Beta vulgaris* L.) in Unpollinated Ovule Culture *In Vitro*. *Plants*. 2021;10(12):2703. <https://doi.org/10.3390/plants10122703>
22. Заячковская Т.В. Оценка исходного материала вида *Raphanus sativus* L. с использованием методов репродуктивной биологии для селекции на гетерозис. Москва, 2005. 26 с. <https://www.elibrary.ru/nibstz>
23. Kozar E.V., Kozar E.G., Soldatenko A.V., Domblides E.A. Rooting technique of double haploids obtained in culture of microspore *in vitro* for European radish. *Vegetable crops of Russia*. 2020;(5):3–15. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-5-3-15>
<https://elibrary.ru/dsqppo>

• References

1. Tyukavin G.B. Fundamentals of Carrot Biotechnology: monograph. under the general editorship and with a preface by V.F. Pivovarov. Moscow: All-Russian Research Institute of Breeding and Seed Production of Vegetable Crops, 2007. 479 p. ISBN 978-5-901695-19-7. (In Russ.)
2. Fedorova M.I., Stepanov, V.A. Root vegetable crops, breeding directions, results. *Vegetable crops of Russia*. 2017;0(4):16–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-4-16-22>
<https://www.elibrary.ru/zfbfmb>
3. Domblides A.S. Development of a laboratory technology for producing gynogenic carrot plants *in vitro*. Moscow, 2001. 140 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qdkcsp>
4. Masuda K., Kikuta Y., Okazawa Y. A revision of the medium for somatic embryogenesis in carrot suspension culture. *Journal of the Faculty of Agriculture*. 1981. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-REVISION-OF-THE-MEDIUM-FOR-SOMATIC-EMBRYOGENESIS-Masuda-Kikuta/940c4aca79be26d0f0011e82d1c5b132da818119>
5. Zayachkovskaya T., Alyokhina K., Mineykina A., Romanova O., Vjurtts T., Tukuser Y., et al. Optimizing Different Medium Component Concentration and Temperature Stress Pretreatment for Gynogenesis Induction in Unpollinated Ovule Culture of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). *Horticulturae*. 2023;9(8):900. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9080900>
6. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
7. Lichter R. Induction of Haploid Plants From Isolated Pollen of *Brassica napus*. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*. 1982;105(5):427–434. [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(82\)80040-8](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(82)80040-8)
8. Kozar E., Domblides E. Protocol of European Radish (*Raphanus sativus* L.) Microspore Culture for Doubled Haploid Plant Production. In: Segui-Simarro JM (ed.) Doubled Haploid Technology: Volume 2: Hot Topics, Apiaceae, Brassicaceae, Solanaceae. New York, NY: Springer US; 2021. p. 217–232. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1335-1_13
9. Shumilina D., Kozar E., Chichvarina O., Korottseva K., Domblides E. *Brassica rapa* L. ssp. *chinensis* Isolated Microspore Culture Protocol. In: Segui-Simarro JM (ed.) Doubled Haploid Technology: Volume 2: Hot Topics, Apiaceae, Brassicaceae, Solanaceae. New York, NY: Springer

- US; 2021. p. 145–162. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1335-1_9
10. Shumilina D., Korniyukhin D., Domblides E., Soldatenko A., Artemyeva A. Effects of Genotype and Culture Conditions on Microspore Embryogenesis and Plant Regeneration in *Brassica Rapa* ssp. *Rapa* L. *Plants*. 2020;9(2):278. <https://doi.org/10.3390/plants9020278>
 11. Kozar E.V., Kozar E.G., Domblides E.A. Effect of the Method of Microspore Isolation on the Efficiency of Isolated Microspore Culture *In Vitro* for Brassicaceae Family. *Horticulturae*. 2022;8(10):864. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100864>
 12. Domblides A.S. Anther and ovule *in vitro* culture in carrot (*Daucus carota* L.). *Acta Horticulturae*. 2017;(1153):55–60. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1153.9>
 13. Matsubara S., Dohya N., Murakami K. Callus formation and regeneration of adventitious embryos from carrot, fennel and mitsuba microspores by anther and isolated microspore cultures. *Acta Horticulturae*. 1995;(392):129–138. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.392.15>
 14. Górecka K., Kowalska U., Krzyżanowska D., Kiszczak W. Obtaining carrot (*Daucus carota* L.) plants in isolated microspore cultures. *Journal of Applied Genetics*. 2010;51(2):141–147. <https://doi.org/10.1007/BF03195722>
 15. Li J.R., Zhuang F.Y., Ou C.G., Hu H., Zhao Z.W., Mao J.H. Microspore embryogenesis and production of haploid and doubled haploid plants in carrot (*Daucus carota* L.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2013;112(3):275–287. <https://doi.org/10.1007/s11240-012-0235-5>
 16. Vjurtts, T.S., Domblides, E.A., Shmykova, N.A., Fedorova, M.I., Kan, L.Yu., Domblides, A.S. Production of DH-plants in isolated microspore culture of carrot. *Vegetable crops of Russia*. 2017;(5):25–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-25-30>
<https://www.elibrary.ru/orxrrl>
 17. Shmykova N., Domblides E., Vjurtts T., Domblides A. Haploid Embryogenesis in Isolated Microspore Culture of Carrots (*Daucus carota* L.). *Life*. 2021;11(1):20. <https://doi.org/10.3390/life11010020>
 18. Romanova O., Vjurtts T., Mineykina A., Tukuser Y., Kulakov Y., Akhramenko V., et al. Embryogenesis induction of carrot (*Daucus carota* L.) in isolated microspore culture. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(1):25–34. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-548>
 19. Fomicheva M., Kozar E., Domblides E. Carrot (*Daucus carota* L.) Haploid Embryo Genome Doubling with Colchicine and Trifluralin. *Horticulturae*. 2025;11(5):505. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050505>
 20. Fujimura T., Komamine A. Synchronization of Somatic Embryogenesis in a Carrot Cell Suspension Culture. *Plant Physiology*. 1979;64(1):162–164. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.162>
 21. Zayachkovskaya T., Domblides E., Zayachkovsky V., Kan L., Domblides A., Soldatenko A. Production of Gynogenic Plants of Red Beet (*Beta vulgaris* L.) in Unpollinated Ovule Culture *In Vitro*. *Plants*. 2021;10(12):2703. <https://doi.org/10.3390/plants10122703>
 22. Zayachkovskaya T.V. Evaluation of the initial material of the species *Raphanus sativus* L. using methods of reproductive biology for heterosis breeding. Moscow, 2005. 26 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/nibstz>
 23. Kozar E.V., Kozar E.G., Soldatenko A.V., Domblides E.A. Rooting technique of double haploids obtained in culture of microspore *in vitro* for European radish. *Vegetable crops of Russia*. 2020;(5):3–15. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-5-3-15>
<https://elibrary.ru/dsqppo>

Об авторах:

Елена Алексеевна Домблидес – кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-2695-190X>, SPIN-код: 4733-7540, автор для переписки, edomblides@mail.ru

Татьяна Владимировна Заячковская – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0001-8435-8197>, SPIN-код: 8777-2919, taivka34@mail.ru

Татьяна Сергеевна Юртц – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <http://orsid.org/0000-0003-3956-4172>, SPIN-код: 5482-3921, tajtza@yandex.ru

Юрий Владимирович Кулаков – младший научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-3718-3854>, SPIN-код: 1070-4035, ykulakov12@yandex.ru

Ольга Александровна Чичварина – младший научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0001-5297-2969>, SPIN-код: 1013-5493, chichvarina07@rambler.ru

Яна Петровна Туксер – младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>, SPIN-код: 8520-1999, yana-tukuser@mail.ru

Ксения Станиславовна Стебницкая – младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0000-0002-2284-0532>, SPIN-код: 1152-1934, k-korottseva@yandex.ru

Мария Григорьевна Фомичева – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-0281-0467>, SPIN-код: 3219-3462, maria.fomicheva.1@yandex.ru

Анна Игоревна Минейкина – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0000-0001-9864-1137>, SPIN-код: 7179-7360, anna-batmanova@mail.ru

Артур Сергеевич Домблидес – доктор с.-х. наук, зав. лабораторией молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0000-0002-5617-9498>, SPIN-код: 3884-5069, arthurdorm@inbox.ru

Елена Викторовна Козарь – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0001-5447-5341>, SPIN-код: 4950-0540, koz.leno4ek@gmail.com

About the Authors:

Elena A. Domblides – Cand. Sci. (Agriculture), Head of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0002-2695-190X>, SPIN-code: 4733-7540,

Corresponding Author, edomblides@mail.ru
Tatyana V. Zayachkovskaya – Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0001-8435-8197>, SPIN-code: 8777-2919, taivka34@mail.ru

Tatyana S. Vjurtts – Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <http://orsid.org/0000-0003-3956-4172>, SPIN-code: 5482-3921, tajtza@yandex.ru

Yuri V. Kulakov – Junior Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0002-3718-3854>, SPIN-code: 1070-4035, ykulakov12@yandex.ru

Olga A. Chichvarina – Junior Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0001-5297-2969>, SPIN-code: 1013-5493, chichvarina07@rambler.ru

Yana P. Tukuser – Junior Researcher, Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>, SPIN-code: 8520-1999, yana-tukuser@mail.ru

Ksenia S. Stebnitskaya – Junior Researcher of Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0000-0002-2284-0532>, SPIN-code: 1152-1934, k-korottseva@yandex.ru

Maria G. Fomicheva – Cand. Sci. (Biology), Researcher at the Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0002-0281-0467>, SPIN-code: 3219-3462, maria.fomicheva.1@yandex.ru

Anna I. Mineykina – Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0000-0001-9864-1137>, SPIN-code: 7179-7360 anna-batmanova@mail.ru

Artur S. Domblides – Dr. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0000-0002-5617-9498>, SPIN-code: 3884-5069, arthurdorm@inbox.ru,

Elena V. Kozar – Cand. Sci. (Biology), Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0001-5447-5341>, SPIN-code: 4950-0540, koz.leno4ek@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-18-25>
УДК: 635.649:631.526.32-048.24

О.Н. Пышная¹, Е.А. Джос^{2*}, М.И. Мамедов¹,
А.А. Матюкина¹, И.А. Енгальчева¹,
Ю.Н. Костанчук³, И.В. Руфина³

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО)
143072, Россия, Московская область,
Одинцовский район, п. ВНИИССОК,
ул. Селекционная, д.14

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Научно-исследовательский институт
сельского хозяйства Крыма»
295453, Россия, Республика Крым,
г. Симферополь, ул. Киевская, 150

³Лаборатория северного овощеводства
ВНИИО – филиала ФГБНУ ФНЦО
610913, Россия, Кировская область,
Кировский район, п. Костино, д. Зубари, дом 10

*Автор для переписки: elenadzhos@mail.ru

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания FGGF-2024-0010 «Создать конкурентоспособные сорта и гибриды овощных, бахчевых и цветочных культур с комплексом хозяйственно ценных признаков для открытого и защищенного грунта для различных регионов РФ»; FGGF-2025-0003 «Разработка эффективных технологий предбридингового скрининга и выделения ген-источников для создания сортов и гибридов овощных и бахчевых культур с групповой устойчивостью к доминирующим фитопатогенам на основе иммунологических и молекулярно-генетических методов».

Вклад авторов. Пышная О.Н.: концептуализация, методология, верификация и администрирование данных. Джос Е.А.: проведение исследований, визуализация, верификация данных, формальный анализ, создание черновика рукописи. Мамедов М.И.: концептуализация, методология. Енгальчева И.А.: методология, создание рукописи и ее редактирование, верификация данных, формальный анализ. Матюкина А.А., Костанчук Ю.Н., Руфина И.В.: проведение исследований, визуализация.

Конфликт интересов. Пышная О.Н. является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2008 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Пышная О.Н., Джос Е.А., Мамедов М.И., Матюкина А.А., Енгальчева И.А., Костанчук Ю.Н., Руфина И.В. Экологическое сортоиспытание гибридов F₁ перца сладкого с различной формой плода. *Овощи России*. 2025;(6):18-25. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-18-25>

Поступила в редакцию: 27.09.2025

Принята к печати: 07.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Olga N. Pyshnaya¹, Elena A. Dzhos^{2*},
Mubaris I. Mamedov¹, Anna A. Matyukina¹,
Irina A. Engalycheva¹, Yulia N. Kostanchuk²,
Irina V. Rufina³

¹FSBSI Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC)
14, Selektionnaya str., VNIISOK, Odintsovo region, Moscow district,
143072, Russia

²Federal State Budgetary Institution of Science "Research Institute of
Agriculture of Crimea"
150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia

³Laboratory of Northern Vegetable Growing of the VBVS – branch of
the FSBSI FSVC
10, Kostino village, Zubari village, Kirov region, Kirovsky district,
610913, Russia

*Corresponding Author: elenadzhos@mail.ru

Funding. The work was carried out within the framework of the State Task FGGF-2024-0010 "Creating competitive varieties and hybrids of vegetable, melon, and flower crops with a complex of economically valuable traits for open and protected ground for various regions of the Russian Federation" and FGGF-2025-0003 "Development of effective technologies for prebreeding screening and isolation of gene sources for creating varieties and hybrids of vegetable and melon crops with group resistance to dominant phytopathogens based on immunological and molecular genetic methods."

Authors' Contribution: Pyshnaya O.N.: conceptualization, methodology, verification and data curation. Dzhos E.A.: investigation, visualization, validation, formal analysis, writing – original draft. Mamedov M.I.: conceptualization, methodology. Engalycheva I.A.: methodology, writing – review & editing, formal analysis. Matyukina A.A., Kostanchuk Yu.N., Rufina I.V.: investigation, visualization, visualization.

Conflict of interest. Pyshnaya O.N. has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2008, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citation: Pyshnaya O.N., Dzhos E.A., Mamedov M.I., Matyukina A.A., Engalycheva I.A., Kostanchuk Yu.N., Rufina I.V. Ecological variety testing of F₁ sweet pepper hybrids with different fruit shapes. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):18-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-18-25>

Received: 27.09.2025

Accepted for publication: 07.11.2025

Published: 18.12.2025

Экологическое сортоиспытание гибридов F₁ перца сладкого с различной формой плода

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В промышленных масштабах перец сладкий выращивается на юге РФ. В последние годы отмечается расширение площадей под этой культурой и возрастает потребность в новых гибридах для открытого грунта различного направления использования, более устойчивых к стрессорам, с высоким качеством продукции. Одним из наиболее важных этапов селекции является экологическое испытание, позволяющее определить приспособленность селекционного достижения к условиям конкретного региона.

Цель исследований. Провести экологическое испытание гибридов перца сладкого селекции ФГБНУ ФНЦО с различной формой плода.

Материалы и методы. Исследования по сортоиспытанию 6 гибридов F₁ перца сладкого селекции ФГБНУ ФНЦО проводили в 2021 году на опытных участках в трех эколого-географических зонах России: ФГБНУ «НИИСК Крыма» (Республика Крым (Р. Крым)), ФГБНУ ФНЦО (Московская область) и Лаборатории северного овощеводства ВНИИО – филиала ФГБНУ ФНЦО (Кировская область). Наблюдение и статистическую обработку материалов проводили согласно общепринятым методикам.

Результаты. В экологическом пункте Московской области формируются условия, наиболее благоприятные для выявления стабильных гибридов, размножение константных форм и экологическое сортоиспытание на адаптивность по урожайности на заключительных этапах селекции ($d_k=1,74$; $t_k=0,50$; $S_{ek}=20,65$). По межфазному периоду «всходы-техническая спелость», массе плода, толщине перикарпия испытанные регионы характеризовались средними значениями продуктивности ($d_k=1,57-4,84$), средней величиной относительной стабильности ($S_{ek}=14,23-17,21$), высокой типичностью ($t_k=0,71-0,95$), что дает возможность проводить экологическое испытание гибридов на заключительных этапах селекции по адаптивности и устойчивости к пониженным положительным температурам (Кировская и Московская области), а также высоким температурам и засухе (Р. Крым). Оценка по комплексу хозяйственно ценных признаков позволила выделить скороспелый гибрид с конусовидной формой плода VS-12-21 F₁ с максимальными значениями урожайности при выращивании в Московской и Кировской областях (5,2 и 4,0 кг/м² соответственно), обладающий высокой стабильностью проявления признаков и адаптационной способностью ($S_{gi}=12,92$; $OAC_i=17,68$; $bi=0,73$; $SCG_i=12,65$).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

перец сладкий, гибрид, экологическое сортоиспытание, форма плода, адаптивность, стабильность

Ecological variety testing of F₁ sweet pepper hybrids with different fruit shapes

ABSTRACT

Relevance. *Capsicum annuum* L. are grown on an industrial scale in the south of the Russian Federation. In recent years, there has been an increase in the area under this crop, and there is a growing need for new hybrids for open field use that are more resistant to stress and have high-quality products. One of the most important stages of breeding is environmental testing, which allows for the determination of the adaptability of a breeding achievement to the conditions of a particular region.

The Aim of the Research. Conduct an environmental test of sweet pepper hybrids bred by the FSBSI FSVC with different fruit shapes.

Materials and Methods. Research on the variety testing of 6 F₁ sweet pepper hybrids bred by the Federal Scientific Vegetable Center was carried out in 2021 on experimental plots in three ecological and geographical zones of Russia: the "Research Institute of Agriculture of Crimea" (Republic of Crimea), the Federal Scientific Vegetable Center (Moscow Region), and the Laboratory of Northern Vegetable Growing – branch of the FSBSI FSVC (Kirov Region). The observation and statistical processing of the materials were carried out according to generally accepted methods.

Results. In the ecological point of the Moscow region, conditions are formed that are most favorable for identifying stable hybrids, propagating constant forms, and conducting ecological variety testing for adaptability in terms of yield at the final stages of breeding ($d_k=1.74$; $t_k=0.50$; $S_{ek}=20.65$). According to the interphase period "shoots-technical ripeness", fruit weight, pericarp thickness, the tested regions were characterized by average productivity values ($d_k=1.57-4.84$), average relative stability ($S_{ek}=14.23-17.21$), high typicity ($t_k=0.71-0.95$), which makes it possible to conduct ecological testing of hybrids at the final stages. stages of breeding for adaptability and resistance to low positive temperatures (Kirov and Moscow regions), as well as high temperatures and drought (Republic of Crimea). Evaluation of a set of economically valuable traits allowed us to select an early-ripening hybrid with a cone-shaped fruit, VS-12-21 F₁, with the highest yield values when grown in the Moscow region.

KEYWORDS:

sweet pepper, hybrid, ecological variety testing, fruit shape, adaptability, and stability

Check for updates



Введение

Перца сладкий (*Capsicum annuum* L.), благодаря своим питательным и вкусовым свойствам, является одной из самых распространенных овощных культур в мире и широко используемой в пищевой промышленности. Плоды перца играют важную роль в питании, благодаря содержанию полезных биологически активных веществ и антиоксидантов. Они служат источником макро-, микроэлементов, витаминов А и С, различных кислот, сахаров, алкалоидов, богаты полифенольными соединениями и каротиноидами, обладающими антиоксидантными свойствами, потребление которых снижает риск воспалительных процессов, рака, сердечно-сосудистых заболеваний, диабета и ожирения [1–3].

Перец – культура теплолюбивая, очень требовательная к плодородию почвы, влажности почвы и воздуха. В связи с чем, в промышленных масштабах эта культура, в основном, выращивается на юге РФ. В последние годы отмечается расширение площадей под этой важной культурой, возрастает потребность в получении новых гибридов для открытого грунта различного направления использования, более устойчивых к стрессорам, с более высоким качеством продукции. Увеличивается сортимент перца в России, в том числе за счет создания гетерозисных гибридов. В Государственном реестре селекционных достижений РФ зарегистрировано более 980 сортов и гибридов перца сладкого. Большинство селекционных учреждений расположены в Центральном регионе нашей страны, где почвенно-климатические условия отличаются от южных регионов. Поэтому, одним из наиболее важных этапов селекции является экологическое испытание, позволяющее определить приспособленность селекционного достижения к условиям конкретного региона.

Экологическая пластичность и стабильность подразумевают способность сорта к формированию стабильных показателей, особенно подверженных изменчивости в процессе онтогенеза хозяйственно ценных признаков (урожайность, масса плода, товарность, устойчивость к болезням), в различных условиях произрастания [4–7]. Учитывая современные глобальные изменения климата, создание пластичного сорта имеет приоритетное значение, так как стремится использовать его способность давать оптимальный урожай при минимальных затратах [8, 9].

Исследования по оценке создаваемых сортов и гибридов и выявлению лучших из них с сочетанием комплекса хозяйственно ценных признаков, устойчивости к абиотическим и биотическим стрессорам, адаптивных возможностей, экологической отзывчивости на различные условия окружающей среды и стабильности проявления данных признаков является актуальной задачей.

Цель работы – изучение реакции перспективных образцов перца сладкого на изменение условий выращивания для выделения рекомендуемых регионов возделывания и определения экологической устойчивости.

Материалы и методы исследований

Место проведения исследований. Научные исследования по экологическому сортоиспытанию гибридов перца сладкого проводили в 2021 году в трех эколого-географических зонах России на опытных участках ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского

хозяйства Крыма» – ФГБУН «НИИСХ Крыма» (Р. Крым, Симферопольский район, с. Укромное), ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» – ФГБНУ ФНЦО (Московская область, Одинцовский район, п. ВНИИССОК) и Лаборатории северного овощеводства ВНИИО – филиала ФГБНУ ФНЦО (Кировская область, Кировский район, п. Костино, д. Зубари).

Материал для исследований: шесть гибридов F_1 перца сладкого селекции лаборатории селекции и семеноводства пасленовых культур ФГБНУ ФНЦО, из них два – с конусовидной формой плода (VS-23-20 F_1 , VS-12-21 F_1) и четыре гибрида F_1 – с кубовидной формой плода (VS-19-17 F_1 , VS-40-17 F_1 , VS-11-20 F_1 , VS-12-19 F_1). В качестве стандарта (St) использовали гибрид перца селекции ФГБНУ ФНЦО Гусар F_1 , рекомендованный для выращивания в испытанных регионах России.

Условия проведения исследований. Исследования в Предгорной зоне Р. Крым осуществляли в условиях открытого грунта. Посев семян перца сладкого проводили в конце третьей декады марта в пленочной необогреваемой теплице, далее в открытый грунт рассаду высаживали в третьей декаде мая. Плотность посадки – 4,7 растений на 1 м^2 .

Исследования в Кировской и Московской областях проводили в условиях пленочных необогреваемых теплиц. Выращивание рассады осуществляли в обогреваемых поликарбонатных теплицах. Посев производили в начале второй декады марта, пикировку – в конце третьей декады марта. Посадку рассады в грунт пленочных необогреваемых теплиц в данных регионах осуществляли в начале мая. Плотность посадки – 4,4 растения на 1 м^2 .

Растения на опытных делянках во всех зонах размещали согласно полной блочной схемы в трехкратной повторности с размещением в каждой повторности стандарта. Размер учетной делянки в защищенном грунте – 5 м^2 , в открытом – 10 м^2 . Предшествующей культурой в севооборотах всех регионов являлся лук репчатый.

Территория опытного участка ФГБУН «НИИСХ Крыма» относится к нижнему Предгорному агроклиматическому району Крыма, климат является резко континентальным, отличается неустойчивым увлажнением. Почва – южный карбонатный чернозём, по гранулометрическому составу тяжелосуглинистая с содержанием гумуса в пахотном слое 4,3 % (по Тюрину И.В.), содержание подвижного фосфора (P_2O_5) – 8,9 мг/100 г, обменного калия (K_2O) – 64,8 мг/100 г почвы (по Мачигину), реакция pH – 8,3 (потенциометрический метод).

Грунт опытной необогреваемой пленочной теплицы Лаборатории северного овощеводства в Кировской области имеет в своем составе одну часть дерновой почвы и одну часть торфа с добавлением 0,7 кг/ м^2 доломитовой муки с содержанием органического вещества – 8,2%, содержание подвижного фосфора – 203 мг/кг почвы, обменного калия – 99 мг/кг, минерального азота ($N-NO_3+N-NH_4$) – 93 мг/кг, реакция pH – 6,1. Грунт опытной необогреваемой пленочной теплицы ФГБНУ ФНЦО в Московской области имеет в своем составе одну часть дерновой почвы и одну часть торфа с добавлением 0,5 кг/ м^2 доломитовой муки с содержанием органического вещества – 5,2 %, содержание обменного калия – 108 мг/кг почвы, содержание подвижного фосфора – 184 мг/кг, минерального азота ($N-NO_3+N-NH_4$) – 78 мг/кг, реакция pH – 6,5.

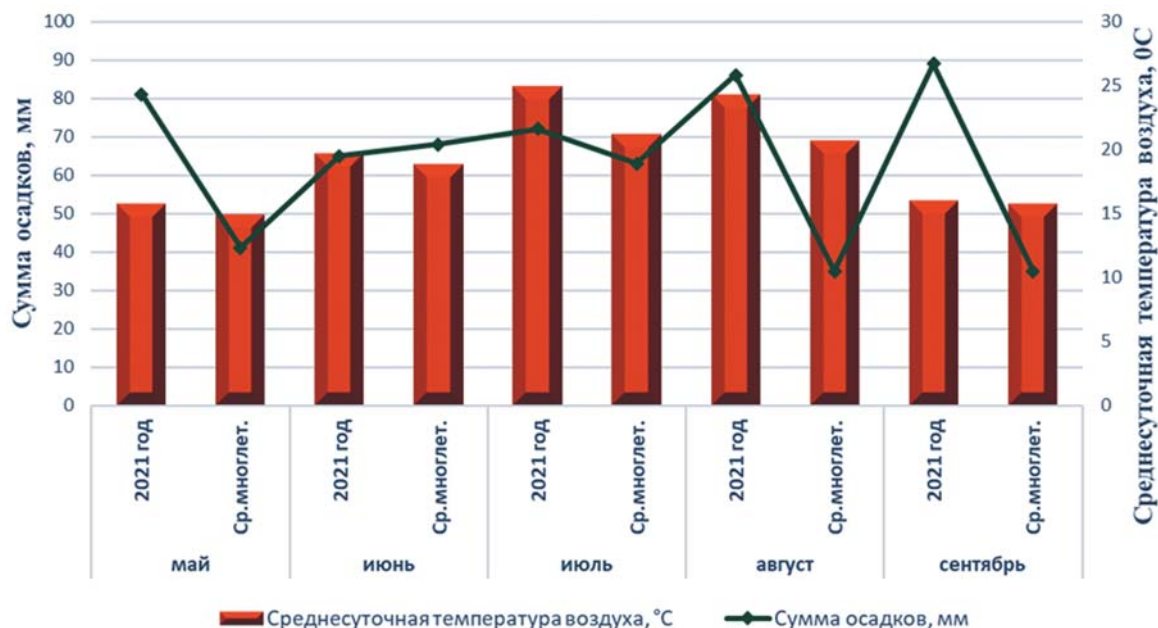


Рис. 1. Климатические характеристики периода вегетации в условиях открытого грунта (Республика Крым, Симферопольский район, 2021 год). Данные по станции АМСГ Симферополь подготовлены с использованием базы данных – NCDC, США и погодного информера RP5.ru

Fig. 1. Climatic characteristics of the vegetation period in open ground conditions (Republic of Crimea, Simferopol District, 2021). Data for the AMSG Simferopol station was prepared using the NCDC database, USA, and the RP5.ru weather informer

Погодные условия Р. Крым в 2021 году в целом были близки к уровню средних многолетних данных. Летние месяцы были достаточно влажными и умеренно жаркими: температурный режим июня превышал норму в среднем на 0,8–1,5°C, при достаточном количестве влаги, что способствовало хорошей приживаемости рассады перца после высадки в открытый грунт. Среднесуточные температуры воздуха в июле соответствовали значениям от 23,0 до 27,1°C, при норме 20,5...21,6°C. Однако во время массового цветения перца максимальная температура воздуха поднималась выше 36°C, что привело к низкой завязываемости плодов. В течении всех летних месяцев, с мая по сентябрь, количество осадков было в 2 раза выше нормы, в целом за вегетацию выпало 558,4 мм против нормы 276 мм (рис. 1).

Температурный режим пленочных необогреваемых

теплиц в условиях Кировской и Московской областей представлен в таблице 1. Условия для развития растений перца сладкого в пленочных необогреваемых теплицах с мая по сентябрь в 2021 году в двух зонах можно охарактеризовать как благоприятные. В летние месяцы среднесуточная температура была выше среднемноголетней на 10,7-13,0°C. В весенне-осенний период температура была выше многолетней на 4,4-6,3°C. Значимо средняя температура воздуха в условиях Кировской области по сравнению с Московской была ниже в июле и сентябре на 3,0 и 2,4°C соответственно. В мае в период высадки рассады в грунт наиболее благоприятные условия сложились в условиях Кировской области, температура была выше на 2,0°C по сравнению с Московской.

Таблица 1. Температурный режим периодов вегетации в условиях пленочных необогреваемых теплиц (Московская и Кировская области, 2021 год)
Table 1. Temperature conditions during the growing season in unheated film greenhouses (Moscow Region and Kirov Region, 2021)

Регион	Месяц				
	май	июнь	июль	август	сентябрь
Московская область	17,0	27,2	29,2	29,4	16,7
Ср. темп, °C	12,6	16,5	18,2	16,4	10,4
Кировская область	19,0	26,9	26,2	28,8	14,3
Ср. темп, °C	11,2	16,5	18,9	15,9	10,2

¹ Данные метеостанции АМС ВНИИССОК, Одинцовский район
ФГБУ Верхне-Волжское УГМС, данные Кировского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Методика исследований

В течение вегетации в испытанных экологических регионах проводили фенологические наблюдения в период бутонизации, цветения, начала плодообразования, технической и биологической спелости плодов [10–12]. В период биологической спелости плодов изучали основные морфологические и биометрические признаки: габитус растения, средняя масса плода, толщина стенки перикарпия, окраска и форма плода по методике UPOV [13]. Во время уборки проводили учет продуктивности испытанных гибридов и рассчитывали урожайность. Сортоиспытание во всех регионах проводили согласно «Методики государственного сортоиспытания овощных, сельскохозяйственных культур» [14].

Экологическую оценку анализируемых регионов как фонов для оценки и адаптивной способности сортов проводили по методике А.В. Кильчевского и Л.В. Хотылевой с использованием соответствующих показателей [15]. Для характеристики экологических сред использовали показатели: продуктивность среды (d_k), типичность среды (t_k), дифференцирующей способности среды (S_{ek}). При оценке адаптивной способности и экологической стабильности сортов рассчитывали показатели – селекционная ценность генотипа (СЦГ), отзывчивость (b_i), относительная стабильность (S_{gi}), общая (OACi) и специфическая адаптивная способность (CACi).

Анализ экспериментальных данных и статистическая оценка проведены с использованием пакета программ Microsoft Excel 2016 для Windows 10 [16].

Результаты исследований

Различная зональная расположенность регионов исследования при испытании гибридов перца сладкого позволила представить комплексную оценку испытанных сред по методу А.В. Кильчевского и Л.В. Хотылевой [15]. Анализ данных показывает, что главные параметры оценки среды – продуктивность (d_k), типичность (t_k), дифференцирующая способности среды (S_{ek}) – значительно изменяются в зависимости от зоны испытания (таблица 2). Возможность реализовать потенциал урожайности

сорта или гибрида возможен только на фоне продуктивной среды с высоким значением d_k [4]. В наших исследованиях в 2021 году ни в одном из экологических пунктов не сформировались условия, способствующие проявлению потенциала всех изучаемых хозяйственно ценных признаков у перца сладкого. Но наиболее высокие параметры продуктивности среды отмечены в Московской области для урожайности ($d_k=1,77$), периода «всходы-техническая спелость» и массы плода ($d_k=4,86$). Возможности для включения в сеть экологического испытания по урожайности пунктов в Р. Крым и Кировской области ограничены в связи с тем, что среды низкопродуктивны ($d_k=-0,70-1,04$) и малотипичны ($t_k=0,04-0,51$), хотя и обладают анализирующим эффектом ($S_{ek}=26,44-29,28$).

Для поиска гибридов перца сладкого со стабильным проявлением признаков в различных географических пунктах большое значение имеет дифференцирующая способность фона (S_{ek}). В наших исследованиях сравнительная характеристика зон по данному параметру показала, что по признаку «урожайность» анализирующее действие фона ($S_{ek}>20$) выражено во всех регионах ($S_{ek}=20,65-29,28$). Тогда как для периода «всходы-техническая спелость» и массы плода все три анализируемых региона обладали также анализирующим эффектом – показатель S_{ek} для данных признаков был сопоставим и составил 14,23-17,21.

При экологическом сортоиспытании гибридов перца сладкого важную значимость приобретает также показатель типичности среды, значения которого характеризовались наибольшими различиями в наших исследованиях. Для урожайности экологические зоны в Московской области и Р. Крым в 2021 году были аналогичны и характеризовались средними показателями типичности ($t_k=0,50-0,51$). По нашим исследованиям наиболее типичным фоном для проявления признаков «всходы-техническая спелость», «масса плода» и «толщина стенки перикарпия» в 2021 году являются условия Московской и Кировской областей ($t_k=0,71-0,99$).

Оценка гибридов перца сладкого в различных эколого-географических условиях выявила изменение средних пока-

Таблица 2. Параметры среды как фона для оценки на адаптивность перспективных гибридов перца сладкого (2021 год)
Table 2. Environmental parameters as a background for assessing the adaptability of promising sweet pepper hybrids (2021)

Фон (регион)	$\bar{x}$	d_k	S_{ek}	t_k
Урожайность				
Московская область	5,01	1,74	20,65	0,50
Республика Крым	2,23	-1,04	29,28	0,51
Кировская область	2,57	-0,7	26,44	0,04
Период «всходы-техническая спелость»				
Московская область	123,57	4,86	14,23	0,95
Р. Крым	112,29	6,43	15,21	0,27
Кировская область	120,29	1,57	17,21	0,71
Масса плода				
Московская область	123,57	4,86	4,23	0,95
Республика Крым	112,29	6,43	5,21	0,27
Кировская область	120,29	1,57	7,21	0,71
Толщина стенки перикарпия				
Московская область	8	0,76	13,01	0,99
Республика Крым	6,86	-0,38	10,06	0,55
Кировская область	6,86	-0,38	13,12	0,80

зателей важных хозяйственно ценных признаков (урожайность, скороспелость, масса плода и толщина стенки перикарпия) в зависимости от зоны (табл. 3,4). В условиях 2021 года наиболее оптимальные условия для развития растений перца сладкого сложились в Московской области, где растения изученных гибридов сформировали наиболее высокую урожайность – 5,0 кг/м² и массу плода – 159,4 г. Урожайность стандартного гибрида Гусар F₁ в Московской области составила 3,2 кг/м², масса плода – 95 г. Причем у всех изученных гибридов перца в данном регионе отмечено статистически значимое превышение урожайности на 0,5–3,2 кг/м² и средней массы плода – на 17–135 г. Наибольшей урожайностью и массой плода относительно стандарта из группы с конусовидной формой плода обладал гибрид VS-12-21 F₁ (5,2 кг/м² и 131 г соответственно), с кубовидной – гибрид VS-11-20 F₁ (6,4 кг/м² и 230 г соответственно). Необходимо отметить, что в условиях Московской области все гибриды с кубовидной формой плода сформировали наибольшую урожайность по сравнению с конусовидной, превышая данный показатель на 1,1–2,9 кг/м². Рост урожайности у образцов с кубовидной формой плода обусловлен увеличением средней массы на 107–145 г по отношению к конусовидным.

Наиболее критические условия для роста и развития растений перца сформировались в Р. Крым и Кировской области, средние значения урожайности и массы плода в Московской области превышали аналогичные показатели в других регионах на 2,8 и 2,4 кг/м² (для урожайности) и на 50,8 и 23,3 г (для массы плода) соответственно. Получению невысокой урожайности плодов перца в Р. Крым, особенно у среднеспелых гибридов с кубовидной формой плода, способствовали высокие температуры воздуха в период массового цветения плодов (выше 35°C), что приводило к опадению завязи в этот период. Урожайность стандартного гибрида Гусар F₁ в данных регионах была низкой, составляя 2,2 кг/м² (Р.Крым) и 2,5 кг/м² (Кировская область). Высокую урожайность относительно стандарта в этих регионах формировали гибриды с конусовидной формой плода: у гибрида VS-23-20 F₁ данный параметр статистически не отличался от стандарта (2,7 и 2,6 кг/м²). Тогда как у гибрида VS-12-21 F₁ урожайность не только превысила стандарт в Кировской

области на 1,5 кг/м², но и была самой высокой относительно других гибридов в данном регионе – 4,0 кг/м². В Р. Крым также, как и в Московской области, отмечено превышение массы плода у всех изученных гибридов на 12,5–72,5 г относительно стандарта, тогда как в Кировской только у гибридов VS-19-17 F₁ и VS-12-19 F₁ данный показатель превысил стандарт.

Ситуация с гибридами из группы с кубовидной формой плода в Р. Крым и Кировской области была неоднозначна. У гибрида VS-11-20 F₁ отмечено статистически значимое превышение урожайности относительно стандарта Гусар F₁ на 0,3 кг/м² в Р. Крым, а в Кировской области данный показатель был несколько ниже, но статистически не отличался от контроля. У гибридов VS-40-17 F₁ и VS-12-19 F₁ в Кировской области урожайность была на уровне стандарта (2,4 и 2,3 кг/м²), тогда как в Р. Крым данные гибриды сформировали самую низкую урожайность как в данном регионе, так и по сравнению со всеми экологическими пунктами в целом – 1,2 и 1,7 кг/м² соответственно. Параметр урожайности у гибрида VS-19-17 F₁ был сопоставим и являлся низким в обоих анализируемых регионах – 1,8 кг/м².

Наибольшей скороспелостью изученные гибриды обладали в Р. Крым, где межфазный период «всходы – техническая спелость» наступил на 112 сутки, опережая данный показатель на 11 суток в Московской области и на 8 суток – в Кировской.

При оценке изученных гибридов перца по признаку скороспелости установлены как общие тенденции, так и специфические различия между изученными гибридами. В условиях Московской и Кировской областей, отличающихся меньшей суммой активных температур в течение вегетации, у гибридов с конусовидной формой плода VS-23-20 F₁ и VS-12-21 F₁ длина межфазного периода «всходы-техническая спелость» или статистически не отличалась от стандарта Гусар F₁ (Московская область), или наступала на 5-6 суток раньше (Кировская область). Наибольшей скороспелостью в данных регионах обладал гибрид VS-12-21 F₁, сформировав урожай на 109 суток даже в экстремальных условиях Кировской области. Необходимо отметить, что у всех гибридов перца с кубовидной формой плода данный межфазный период был

Таблица 3. Хозяйственно ценные признаки перспективных гибридов перца сладкого (2021 год)
Table 3. Economic value indicators of promising sweet pepper hybrids (2021)

Гибрид, (фактор А)	Форма плода	Урожайность, кг/м ²			Среднее по фактору А (гибрид), кг/м ²	Период «всходы-техническая спелость», сутки			Среднее по фактору А (гибрид), сутки
		МО	РК	КО		МО	РК	КО	
Гусар F ₁ (St)	конус	3,2	2,6	2,5	2,8	119,0	112,0	115,0	115,3
VS-23-20 F ₁	конус	3,7	2,7	2,6	3,0	119,5	120,0	110,0	116,5
VS-12-21 F ₁	конус	5,2	2,7	4,0	4,0	117,0	110,0	109,0	112,0
VS-19-17 F ₁	куб	6,1	1,8	1,8	3,2	130,0	117,0	125,0	124,0
VS-40-17 F ₁	куб	5,3	1,2	2,4	3,0	125,0	110,0	128,0	118,3
VS-11-20 F ₁	куб	6,4	2,9	2,4	3,9	129,0	102,0	126,0	121,7
VS-12-19 F ₁	куб	5,3	1,7	2,3	3,1	126,0	115,0	129,0	123,3
Среднее по фактору В (фон)		5,0	2,2	2,6		123,6	112,3	120,3	

Урожайность: НСР 05 по фактору А - 0,2; В - 1,9; АВ - 0,3.

Период "всходы-техническая спелость": НСР 05 по фактору А - 2,1; В - 7,3; АВ - 1,8.

Примечание. МО – Московская область, РК – Республика Крым, КО – Кировская область.

более растянут и наступал позже относительно стандарта на 6-11 суток в Московской области и на 11-14 суток в Кировской. В условиях Р. Крым различия между сортами наблюдались вне зависимости от формы плода и варьировали от 102 до 120 суток. Наиболее скороспелым был гибрид VS-40-17 F₁ с кубовидной формой плода, у которого фаза «всходы – техническая спелость» наступала на 10 суток раньше, чем у стандарта Гусар F₁, тогда как наиболее позднеспелыми в условиях Р. Крым были гибриды VS-23-20 F₁ с конусовидной формой плода (120 суток) и VS-19-17 F₁ с кубовидной (117 суток).

При оценке гибридов перца большое значение имеет такой показатель, как толщина стенки перикарпия, которая влияет на качество и массу плода (табл. 4). Этот признак имеет высокую сортоспецифичность. При сравнении двух групп образцов отмечено, что в условиях года толщина стенки испытываемых гибридов с конусовидной формой была несколько ниже, чем в группе с кубовидными плодами. Однако колебание этого показателя наблюдается и в зависимости от места выращивания. Наиболее высокое значение признака получено в условиях Московской области.

Нами проведена оценка адаптивной способности и экологической стабильности гибридов перца сладкого по комплексу хозяйственно ценных признаков. Определена пригодность гибридов перца сладкого к выращиванию в различных эколого-географических регионах и расширение их районирования (табл. 5).

После проведения экологического испытания гибридов производству рекомендуют наиболее высокоадаптированные, характеризующиеся высокой урожайностью, параметром отзывчивости (bi) менее 1, относительной стабильностью (Sgi) ниже 10%, высокой селекционной ценностью генотипа (СЦГ), имеющие стабильно высокую урожайность в неблагоприятных условиях. В наших исследованиях выявлено, что для урожайности значение параметра экологической изменчивости (Sgi) у анализируемых гибридов сильно варьирует от 12,92 до 76,78%. Только гибриды VS-12-21 F₁ и VS-23-20 F₁ с конусовидной формой плода (Sgi=12,92 и 14,28% соответственно) являются стабильными, т.е. формируют высокую урожай-

ность независимо от экологического пункта выращивания. У гибридов с кубовидной формой плода экологическая устойчивость не присутствует (Sgi=55,08-76,78%). Высокостабильными по признаку «масса плода» и «толщина стенки перикарпия» оказались все изучаемые гибриды, так как значение параметра экологической изменчивости (Sgi) у них было низким и варьировало от 3,04 до 17,32%.

Дифференциация анализируемых гибридов по параметру отзывчивости (bi), который определяет реакцию генотипа на улучшение условий среды, позволила выявить гибриды с высокой отзывчивостью на улучшение условий произрастания – это все гибриды с кубовидной формой плода (VS-19-17 F₁, VS-40-17 F₁, VS-11-20 F₁ и VS-12-19 F₁) с bi=1,37-1,62. Тогда как гибриды с конусовидной формой плода с bi=0,23-0,73 в меньшей степени подвержены изменениям условий выращивания. Аналогичная ситуация наблюдалась при оценке параметра отзывчивости (bi) по признакам «масса плода» и «толщина стенки перикарпия»: все гибриды с кубовидной формой плода имели bi>1.

Для выявления гибридов, показывающих максимальную среднюю урожайность по всей совокупности сред, использовали показатель общей адаптивной способности (OACi). Максимальная общая адаптивная способность выявлена у гибридов с конусовидной формой плода: стандарта Гусар F₁ (OACi=5,52), VS-23-20 F₁ (OACi=4,27) и максимальное значение (OACi=17,68) у гибрида VS-12-21 F₁. По приспособленности генотипа и возможности давать максимальный урожай только в определенных условиях среды выделились все изучаемые гибриды с кубовидной формой плода – VS-19-17 F₁, VS-40-17 F₁, VS-11-20 F₁ и VS-12-19 F₁, имеющие максимальный параметр специфической адаптивной способности генотипа (CACi=3,65-6,02). По признаку «масса плода» наблюдалась аналогичная тенденция: у гибридов с конусовидной формой плода, включая стандарт, максимальное значение общей адаптивной способности (OACi=12,33-30,33), тогда как у гибридов с кубовидной – максимальное значение специфической адаптивной способности (CACi=43,00-202,33).

Среди изученных гибридов перца сладкого по признаку

Таблица 4. Хозяйственно ценные признаки перспективных гибридов перца сладкого (2021год)
Table 4. Economic value indicators of promising sweet pepper hybrids (2021)

Гибрид, (фактор А)	Форма плода	Масса плода, г			Среднее по фактору А (гибрид), кг/м ²	Толщина стенки перикарпия, мм			Среднее по фактору А (гибрид), кг/м ²
		МО	РК	КО		МО	РК	КО	
Гусар F ₁ (St)	конус	95,0	74,5	145,0	104,8	6,0	7,0	6,0	6,3
VS-23-20 F ₁	конус	131,0	128,0	128,0	129,0	8,0	7,0	7,0	7,3
VS-12-21 F ₁	конус	131,0	95,0	121,0	115,7	7,5	6,0	6,0	6,5
VS-19-17 F ₁	куб	112,0	112,0	158,0	127,3	8,5	7,0	8,0	7,8
VS-40-17 F ₁	куб	202,0	87,0	128,0	139,0	8,0	6,0	6,0	6,7
VS-11-20 F ₁	куб	230,0	147,0	110,0	162,3	9,0	8,0	7,0	8,0
VS-12-19 F ₁	куб	215,0	117,0	163,0	165,0	9,0	7,0	8,0	8,0
Среднее по фактору В (фон)		159,4	108,6	136,1		8,0	6,9	6,9	
Масса плода: НСР 05 по фактору А - 10,4; В - 31,6; АВ - 9,2.									
Толщина стенки перикарпия: НСР 05 по фактору А - 0,3; В - 0,8; АВ - 0,2.									

Примечание. МО – Московская область, РК – Республика Крым, КО – Кировская область.

Таблица 5. Параметры адаптивности гибридов перца сладкого с различной формой плода по хозяйственно ценным признакам (2021 год)
Table 5. Adaptability parameters of sweet pepper hybrids with different fruit shapes based on economically valuable characteristics (2021)

Гибриды	Форма плода	$\bar{x}$	OACi	CACi	Sgi	bi	СЦГi
Урожайность, кг/м ²							
Гусар F1(St)	конус	2,75	5,52	0,13	31,13	0,23	2,38
VS-12-21 F ₁	конус	3,95	17,68	1,51	12,92	0,73	12,65
VS-23-20 F ₁	конус	3,00	4,27	0,37	14,28	0,39	12,35
VS-19-17 F ₁	куб	3,23	-0,04	6,02	76,78	1,62	0,60
VS-40-17 F ₁	куб	2,97	-0,30	4,44	71,05	1,37	0,73
VS-11-20 F ₁	куб	3,90	0,63	4,75	55,08	1,40	10,59
VS-12-19 F ₁	куб	3,09	-0,18	3,65	61,86	1,26	1,06
Масса плода, г							
Гусар F1(St)	конус	115,33	12,33	-3,38	3,04	0,57	86,98
VS-12-21 F ₁	конус	112,00	19,00	-6,71	3,89	0,48	76,81
VS-23-20 F ₁	конус	116,33	30,33	-2,38	4,73	-0,31	71,87
VS-19-17 F ₁	куб	124,00	-5,29	43,00	5,29	1,12	71,06
VS-40-17 F ₁	куб	118,33	-0,38	202,33	12,02	2,26	3,49
VS-11-20 F ₁	куб	121,67	-2,95	104,33	8,40	1,74	39,20
VS-12-19 F ₁	куб	123,33	4,62	54,33	5,98	1,12	63,82
Толщина стенки, мм							
Гусар F1(St)	конус	6,33	-0,90	0,33	9,12	-0,44	3,88
VS-12-21 F ₁	конус	6,50	-0,74	0,75	13,32	1,31	2,82
VS-23-20 F ₁	конус	7,33	0,10	0,33	7,87	0,88	4,86
VS-19-17 F ₁	куб	7,83	0,60	0,58	9,75	0,88	4,59
VS-40-17 F ₁	куб	6,67	-0,57	1,33	17,32	1,75	1,76
VS-11-20 F ₁	куб	8,00	0,76	1,00	12,50	1,31	3,75
VS-12-19 F ₁	куб	8,00	0,76	1,00	12,50	1,31	3,75

«толщина стенки перикарпия» по параметрам общей (OACi) и специфической адаптивной способности (CACi), селекционной ценности генотипа (СЦГi) различий между изучаемыми образцами не наблюдалось, данные параметры были низкими. По параметрам экологической изменчивости (Sgi) и отзывчивости (bi) выделились два гибрида с конусовидной формой плода (стандарт Гусар F₁ и VS-23-20 F₁) с Sgi=9,12 и 7,87 % соответственно, а также гибрид с кубовидной формой – VS-19-17 F₁ с Sgi=9,75.

Таким образом, в результате проведенной комплексной оценки адаптивной способности и экологической стабильности изученных гибридов перца сладкого выделились скороспелые гибриды VS-12-21 F₁ и VS-23-20 F₁. Обладая самой высокой урожайностью в условиях Московской области, они отличались максимальными значениями данного параметра в критических условиях Р. Крым и Кировской области.

Заключение

Проведенная нами оценка в системе экологического сортоиспытания шести перспективных гибридов F₁ перца сладкого в трех регионах России позволила установить, что в сформировавшихся условиях 2021 года ни в одном из экологических пунктов не сформировались условия, способствующие проявлению потенциала урожайности у перца сладкого. В экологическом пункте Московской области формируются условия, наиболее благоприятные для выявления стабильных гибридов, размножение константных форм и экологическое сортоиспытание на адаптивность по урожайности на заключительных этапах селекции (dk=1,74; tk=0,50; Sek=20,65). По межфазному периоду «всходы – техническая спелость», массе плода, толщине стенки перикарпия испытанные регионы характеризовались средними значениями продуктивности (dk=1,57-4,84), средней величиной относи-

тельной стабильности (Sek=14,23-17,21), высокой типичностью (tk=0,71-0,95), что дает возможность проводить экологическое испытание гибридов на заключительных этапах селекции по адаптивности и устойчивости к пониженным положительным температурам (Кировская и Московская области), а также высоким температурам и засухе (Р. Крым).

Установлено, что в 2021 году наиболее оптимальные условия для развития растений перца сладкого сложились в Московской области, где растения изученных гибридов сформировали наиболее высокую урожайность – 5,0 кг/м² и массу плода – 159,4 г. Выявлено, что, хотя гибриды с кубовидной формой плода в Московской области формировали наибольшую урожайность относительно стандарта (5,3-6,4 кг/м²), они обладали низкой экологической стабильностью (Sgi=55,08-76,78 %), более подвержены изменениям хозяйственно ценных признаков от условий выращивания (bi>1), способностью давать максимальный урожай только в определенных условиях среды (CACi=3,65-6,02).

Оценка адаптивной способности и экологической стабильности гибридов перца сладкого по комплексу хозяйственно-ценных признаков позволила выделить скороспелый гибрид с конусовидной формой плода – VS-12-21 F₁ с максимальными значениями урожайности при выращивании в Московской и Кировской областях (5,2 и 4,0 кг/м² соответственно), обладающий высокой стабильностью проявления признаков и адаптационной способностью (Sgi=12,92; OACi=17,68; bi=0,73; СЦГi=12,65).

По результатам эксперимента определены возможности использования различных агроклиматических зон при экологическом испытании перца сладкого и дана оценка гибридов по адаптивности. Для более корректной оценки и заключения планируется включить гибрид VS-12-21 F₁ в экологическое сортоиспытание в последующие годы.

• Литература

1. Kantar M.B., Anderson J.E., Lucht S.A., Mercer K., Bernau V., Case K.A., Le N.C., Frederiksen M.K., DeKeyser H.C., Wong Zen-Zi, Hastings J.C., Baumler D.J. Vitamin variation in *Capsicum* spp. provides opportunities to improve nutritional value of human diets. *PLoS One*. 2016;11(8):e0161464. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161464>
2. Fathima S.N. A systemic review on phytochemistry and pharmacological activities of *Capsicum annuum*. *Int J Pharm Pharm Sci*. 2015;4(3):51-68.
3. Тоцкий И.В., Гордеева Е.И., Кукоева Т.В., Петров А.Ф., Юдина Р.С., Хлесткина Е.К., Шоева О.Ю. Генетическое разнообразие и антиоксидантный потенциал сортов перца сладкого (*Capsicum annuum* L.) сибирской селекции. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;5(1):35-43. <https://doi.org/10.18699/Letters2019-5-4> <https://elibrary.ru/lirapa>
4. Ветрова С.А., Степанов В.А., Заячковский В.А. Экологическое испытание сортов свёклы столовой селекции ФГБУ ФНЦО. *Овощи России*. 2023;(1):60-68. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-1-60-68> <https://elibrary.ru/sijrrh>
5. Сирота С.М., Пинчук Е.В., Козарь Е.Г., Беспалько Л.В., Степанов В.А. Перспективы использования многоярусной узкостеллажной установки (МУГ) в селекции редиса европейского. *Овощи России*. 2021;(2):26-33. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-2-26-33> <https://elibrary.ru/qcilkh>
6. Sran T.S., Jindal S.K., Chawla N. Genotype by environment interaction for quality traits in chilli pepper (*Capsicum annuum* L.). *Genetika*. 2021;53:23-49. <https://doi.org/10.2298/GENSR2101023S>
7. Прахова Т.Я. Оценка адаптивности сортов и гибридов рапса в условиях лесостепной зоны Среднего Поволжья. *Пермский аграрный вестник*. 2024;2(46):68-76. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2024_46_68
8. Вилконов С.Д., Сидоренко В.С. Адаптивность и стабильность мультилинейного сорта проса посевного Квартет, в сравнении с сортами традиционной селекции. *Земледелие*. 2021;(4):35-39. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2021-10409> <https://elibrary.ru/nrwpbj>
9. Николаев П.Н., Юсова О.А., Сафонова И.В., Анисков Н.И. Адаптивность нового сорта ярового ячменя Омский 102 в условиях Западной Сибири. *Таврический вестник аграрной науки*. 2022;1(29):103-111. <https://elibrary.ru/jlshtg>
10. Белик В.Ф., Андреева Р.А., Косококов Г.И. Методика физиологических исследований в овощеводстве и бахчеводстве. М., 1970. 210 с.
11. Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. М.: Россельхозакадемия, 2011. 649 с.
12. Методические указания по селекции сортов и гибридов перца сладкого, баклажана для открытого и защищенного грунта. М., 1997. 38 с.
13. Методика проведения испытаний на отличимость, однородность и стабильность (RTG/0076/2) UPOV.
14. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (картофель, овощные и бахчевые культуры). М.: ФГБУ «Госсорткомиссия», 2015. 61 с.
15. Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Метод оценки адаптивной способности и стабильности генотипов, дифференцирующей способности среды. Сообщение I. Обоснование метода. *Генетика*. 1985;21(9):1481-1490.
16. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: «Агропромиздат», 1985. 351 с.

• References

1. Kantar M.B., Anderson J.E., Lucht S.A., Mercer K., Bernau V., Case K.A., Le N.C., Frederiksen M.K., DeKeyser H.C., Wong Zen-Zi, Hastings J.C., Baumler D.J. Vitamin variation in *Capsicum* spp. provides opportunities to improve nutritional value of human diets. *PLoS One*. 2016;11(8):e0161464. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161464>
2. Fathima S.N. A systemic review on phytochemistry and pharmacological activities of *Capsicum annuum*. *Int J Pharm Pharm Sci*. 2015;4(3):51-68.
3. Totsky I.V., Gordeeva E.I., Kukoeva T.V., Petrov A.F., Yudina R.S., Khlestkina E.K., Shoeva O.Yu. Genetic diversity and antioxidant properties of the bellpepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars bred for Siberia. *Letters to Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;5(1):35-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.18699/Letters2019-5-5> <https://elibrary.ru/lirapa>
4. Vetrova S.A., Stepanov V.A., Zayachkovsky V. Ecological testing of varieties beetroot selection of FSBSI FSVC. *Vegetable crops of Russia*. 2023;(1):60-68. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-1-60-68> <https://elibrary.ru/sijrrh>
5. Sirota S.M., Pinchuk E.V., Kozar E.G., Bespalko L.V., Stepanov V.A. Prospects for the use of a multi-tier narrow-stack installation in the selection of European radish. *Vegetable crops of Russia*. 2021;(2):26-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-2-26-33> <https://elibrary.ru/qcilkh>
6. Sran T.S., Jindal S.K., Chawla N. Genotype by environment interaction for quality traits in chilli pepper (*Capsicum annuum* L.). *Genetika*. 2021;53:23-49. <https://doi.org/10.2298/GENSR2101023S>
7. Prakhova T.Ya. Assessment of adaptability of rapeseed varieties and hybrids in the conditions of the forest-steppe zone of the middle Volga region. *Perm Agrarian Journal*. 2024;2(46):68-76. (In Russ.) https://doi.org/10.47737/2307-2873_2024_46_68
8. Vilyunov S.D., Sidorenko V.S. Adaptability and stability of the multilinear millet variety Quartet in comparison to the varieties of traditional breeding. *Zemledelie*. 2021;(4):35-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2021-10409> <https://elibrary.ru/nrwpbj>
9. Nikolaev P.N., Yusova O.A., Safonova I.V., Aniskov N.I. Adaptability of a new spring barley variety 'Omskiy 102' under conditions of Western Siberia. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2022;1(29):103-111. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jlshtg>
10. Belik V.F., Andreeva R.A., Kosobokov G.I. Methods of Physiological Research in Vegetable and Melon Growing. Moscow, 1970. 210 p. (In Russ.)
11. Litvinov S.S. Methods of field experience in vegetable growing. M. 2011. 649 p. (In Russ.)
12. Guidelines for the selection of sweet pepper and eggplant varieties and hybrids for open and protected soil. Moscow, 1997. 38 p. (In Russ.)
13. Test method for distinguishability, uniformity, and stability (RTG/0076/2) UPOV.
14. Methodology for State Variety Testing of Agricultural Crops (Potatoes, Vegetables, and Melons). Moscow: FGBU "Gossortkomissiya", 2015. 61 p. (In Russ.)
15. Kilchevsky A.V., Khotyleva L.V. A method for assessing the adaptive capacity and stability of genotypes, and the differentiating capacity of the environment. Report I. Justification of the method. *Genetics*. 1985;21(9):1481-1490. (In Russ.)
16. Dospekhov B.A. Methods of field research (with the basics of statistical processing of research results). M., 2012. 352 p. (In Russ.)

Об авторах:

Ольга Николаевна Пышная – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9744-2443>, SPIN-код: 7967-8504, pishnaya_o@mail.ru

Елена Алексеевна Джос – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, зав. лаб. селекции и семеноводства пасленовых культур, <https://orcid.org/0000-0002-2216-0094>, SPIN-код: 3677-0025, автор для переписки, elenadzhos@mail.ru

Мубариз Иса оглы Мамедов – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8974-6295>, SPIN-код: 3641-0679, tomatvniissok@mail.ru

Анна Алексеевна Матюкина – научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства пасленовых культур, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7430>, tomatvniissok@mail.ru

Ирина Александровна Енгальчева – кандидат с.-х. наук, <https://orcid.org/0000-0003-4843-111X>, SPIN-код: 2084-2830, engirina1980@mail.ru

Юлия Николаевна Костанчук – старший научный сотрудник отдела селекции и семеноводства овощных и бахчевых культур, <https://orcid.org/0000-0002-3410-6634>, Researcher ID AAD-2541-2019, Scopus ID 57208166002, SPIN-код: 3312-9473, kostanyulya@mail.ru

Ирина Викторовна Руфина – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории иммунитета и селекции пасленовых культур, SPIN-код: 1298-6175, rufina@e-kirov.ru

About the Authors:

Olga N. Pyshnaya – Dr. Sci. (Agriculture), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9744-2443>, SPIN-code: 7967-8504, pishnaya_o@mail.ru

Elena A. Dzhos – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2216-0094>, SPIN-code: 3677-0025, Corresponding Author, elenadzhos@mail.ru

Mubaris I. Mamedov – Dr. Sci. (Agriculture), Chief Scientific Officer, <https://orcid.org/0000-0001-8974-6295>, SPIN-code: 3641-0679

Anna A. Matyukina – Researcher at the Laboratory of Breeding and Seed Production of Solanaceae Crops, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7430>, tomatvniissok@mail.ru

Irina A. Engalycheva – Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Molecular Immunological Research, <https://orcid.org/0000-0003-4843-111X>, SPIN-code: 2084-2830, engirina1980@mail.ru

Yulia N. Kostanchuk – Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3410-6634>, Researcher ID AAD-2541-2019, Scopus ID 57208166002, SPIN-code: 3312-9473, kostanyulya@mail.ru

Irina V. Rufina – Cand. Sci. (Agriculture), Researcher at the Laboratory of Immunity and Breeding of Solanaceae Crops, SPIN-code: 1298-6175, rufina@e-kirov.ru

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-26-33>
УДК: 631.52:577.21

Л.И. Хрусталева^{1,2*}

¹ ФГБОУ ВО Российский Государственный
Аграрный Университет-МСХА
имени К.А. Тимирязева,
127550, Россия, Москва, Тимирязевская ул., 49

² ФГБНУ "Всероссийский
Научно-Исследовательский Институт
Сельскохозяйственной Биотехнологии"
(ФГБНУ ВНИИСБ)
127550, Россия, Москва, Тимирязевская ул., 42

***Автор для переписки:**
khrustaleva@rgau-msha.ru

Финансирование. Исследование выполнено
при финансовой поддержке Российского
научного фонда, грант № 24-76-10037.

Вклад автора. Хрусталева Л.И.: концептуализация, методология, проведение исследований, создание рукописи и ее редактирование.

Благодарности: Я благодарю Н.А. Кудрявцеву, А.С. Ермолаева и С.В. Одинцова, моих учеников, которые стали успешными учеными, за поддержку и вдохновение.

Конфликт интересов. Автор заявляет
об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хрусталева Л.И.
Молекулярная генетика и мульти-омиксные технологии в селекции растений. *Овощи России*. 2025;(6):26-33.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-26-33>

Поступила в редакцию: 10.11.2025
Принята к печати: 25.11.2025
Опубликована: 18.12.2025

Ludmila I. Khrustaleva^{1,2*}

¹ Russian State Agrarian University-Moscow
Timiryazev Agricultural Academy (RSAU-MTAA)
49, Timiryazevskaya Str.,
127550 Moscow, Russia

² All-Russian Research Institute of Agricultural
Biotechnology
Timiryazevskaya 42 Str., 127550 Moscow, Russia

***Corresponding Author:**
khrustaleva@rgau-msha.ru

Funding. The research was funded by Russian Science Foundation, grant number 24-76-10037. Author's Contribution: Khrustaleva L.I.: conceptualization, methodology, writing – review & editing.

Acknowledgments: I thank N.A. Kudryavtseva, A.S. Ermolaev, and S.V. Odintsov, my students who became successful scientists, for their support and inspiration.

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

For citation: Khrustaleva L.I. Molecular genetics and multi-omics technologies in plant breeding. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):26-33. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-26-33>

Received: 10.11.2025
Accepted for publication: 25.11.2025
Published: 18.12.2025

Молекулярная генетика и мульти-омиксные технологии в селекции растений

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Успехи в молекулярной генетике растений и мульти-омиксных технологиях стали возможны благодаря достижениям в области секвенирования, сборки геномов на уровне хромосом, биоинформатики и редактирования генома, которые углубляют наше понимание биологии растений и выводят селекцию сельскохозяйственных культур на новый уровень. Рекомбинация является ключевым генетическим процессом для создания новых, превосходящих сортов растений с желаемыми характеристиками, такими как более высокая урожайность, улучшенное качество и устойчивость к вредителям и болезням. Современные вычислительные методы облегчают эффективный синтез и интерпретацию мультиомиксных данных. Несмотря на такие осязаемые достижения в молекулярных технологиях, все ещё остаются проблемы, связанные с применением новых методов в практической селекции и на более широком спектре сельскохозяйственных культур. Цель данного обзора — привлечь внимание селекционеров к последним достижениям в области молекулярной генетики и омиксных технологий для улучшения селекции растений.

Результаты. В данном обзоре рассматриваются недавно опубликованные статьи в высокорейтинговых международных журналах, которые вносят важный вклад в расширение и уточнение наших знаний и значительно продвигают передовые исследования. В обзор включены статьи по успешному применению мульти-омики в селекции растений, что привело к многообещающим результатам по идентификации ключевых генов и регуляторных элементов, определяющих стрессоустойчивость, урожайность и семенную продуктивность. Представлен подробный анализ разработки HRM-маркеров на тип цитоплазматической мужской стерильности. HRM (high-resolution melting) анализирует кривые плавления ДНК для обнаружения различий в последовательностях, что позволяет ускорить и повысить эффективность селекционного процесса. В обзоре освещаются оригинальные экспериментальные подходы, направленные на изучение контроля локализации рекомбинации для успешной интрогрессии ценных генов в программах межвидовой гибридизации.

Заключение. Стратегия дальнейшего развития селекции растений будет сосредоточена на интеграции омиксных технологий, редактирования генома и искусственного интеллекта в биоинформатике. Более того, интеграция редактирования генома и углубленного изучения мейотической рекомбинации позволят управлять возникновением кроссинговера в целевых участках гамет. Все усилия по повышению точности и скорости селекции растений служат главной цели – обеспечению изобилия и разнообразия растительных продуктов питания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

сборка генома de novo, HRM-маркеры, луковые, цитоплазматическая мужская стерильность, мейотическая рекомбинация, мульти-омика, G-квадруплекс, редактирование генома, биоинформатика, искусственный интеллект



Molecular genetics and multi-omics technologies in plant breeding

ABSTRACT

Relevance. Progress in plant molecular genetics and multi-omics technology is driven by advancements in high-throughput sequencing, chromosome scaffold genome assembly, bioinformatics skills and genome editing which deepen our understanding of plant biology and improve crop breeding. The fundamentals of plant breeding involve recombination as a key genetic process to create new, superior plant varieties with desirable traits like higher yield, improved quality, and resistance to pests and diseases. Modern computational methodologies facilitate the effective synthesis and interpretation of multi-omics data. Challenges remain in applying new techniques to a wider range of crops. The aim of this review is to draw the attention of plant breeders to the latest advances in molecular genetics and omics technologies for improving plant breeding.

Results. This review examines recently published articles in high-ranking international journals that make important contributions to expanding and refining our knowledge and significantly advance cutting-edge research. The review includes articles on the successful application of multi-omics to plant breeding, which yielded promising results in identifying key genes and regulatory elements underlying stress tolerance, crop yield, and seed production. A detailed analysis of the development of markers for types of cytoplasmic male sterility based on high-resolution melting (HRM) is given. This review highlights original experimental approaches aimed at studying the control of recombination localization for the successful introgression of valuable genes in interspecific hybridization programs.

Conclusion. The strategy for the further development of plant breeding will focus on integrating omics technologies, genome editing, and artificial intelligence in bioinformatics. Moreover, the integration of genome editing and an in-depth study of meiotic recombination could facilitate crossovers at target sites within gametes. All efforts to improve the accuracy and speed of plant breeding serve the main goal of ensuring the abundance and diversity of plant foods.

KEYWORDS:

de novo genome assemblies, HRM-markers, Alliums, cytoplasmic male-sterility, meiotic recombination, multi-omics, G-quadruplex, genome editing, bioinformatics, artificial intelligence

Введение

Приступая к написанию этой статьи, я стремилась привлечь внимание селекционеров к последним достижениям в области молекулярной генетики и омиксных технологий, направленных на совершенствование селекции растений. Недавно в международном журнале молекулярной науки (International Journal of Molecular Science) вышел специальный выпуск "Genetics and Multi-Omics for Crop Breeding" («Генетика и мульти-омика для селекции сельскохозяйственных культур»). Будучи приглашенным редактором этого специального выпуска, я познакомилась с множеством статей как подаваемых для принятия в публикацию, так и уже опубликованных по данной тематике. В этом небольшом обзоре рассматриваются статьи, недавно опубликованные в высокорейтинговых международных журналах, которые вносят важный вклад в расширение и уточнение наших знаний и значительно продвигают передовые исследования.

Достижения в области молекулярной генетики и мульти-омиксного анализа способствуют нашему пониманию сложных биологических процессов. Эти исследования обеспечивают всестороннее изучение биологических систем посредством интеграции данных геномики, транскриптомики, протеомики, метаболомики и других омиксных технологий. Цель молекулярно-генетических и мультиомиксных исследований — раскрытие сложных взаимодействий и регуляторных механизмов, обеспечивающих жизнедеятельность как отдельной клетки, так и организма в целом. Современные вычислительные методы способствуют эффективному синтезу и интерпретации мультиомиксных данных, стимулируя прогресс в интегративном биологическом анализе. Разработка высокотехнологичного автоматизированного оборудования сыграла решающую роль в получении мультиомиксных данных, способствуя быстрому прогрессу биологических исследований. Oxford Nanopore Technologies, секвенаторы PacBio Revio и Illumina, а также масс-спектрометры для анализа белков, метаболитов и других биомолекул позволяют раскрывать функции и механизмы регуляции и взаимодействия этих сложных биологических процессов. Технология РНК-секвенирования позволяет выявлять профили экспрессии генов в определённых условиях и в определённое время, в то время как протеомика занимается изучением экспрессии, функций и взаимодействий белков. Эти данные имеют большое практическое значение для селекции растений. Так, например, понимание механизмов взаимодействия паразит-хозяин способствуют созданию эффективных методов борьбы с фитопатогенами. А самым экологичным способом борьбы является селекция растений, устойчивых к фитопатогенам. Применение мультиомиксных технологий в селекции растений показало многообещающие результаты, поскольку позволяет идентифицировать ключевые гены и регуляторные элементы, определяющие урожайность и семенную продуктивность. Исследования, представленные в данном обзоре, демонстрируют применение этих технологий и подходов в различных биологических контекстах.

Полногеномное секвенирование и проблемы верификации сборок геномов *de novo*

Стремительное развитие технологий секвенирования ДНК позволило получать полногеномные последовательности многих организмов. Стоимость секвенирования генома человека упала с 3 миллиардов долларов в 1990 году до 600 долларов сегодня и, как ожидается, снизится до 100 долларов в ближайшем будущем, причём некоторые прогнозируют, что цена генома в 100 долларов уже не за горами [1]. Согласно данным

NCBI (05 ноября 2025 г.) уже секвенировано 3 600 геномов высших растений. Однако полностью собрано в хромосомные скэффолды только 16 видов. Если секвенирование геномов не является проблемой благодаря таким технологиям как PacBio, Illumina и Oxford Nanopore, то сборка геномных последовательностей *de novo* на уровне хромосом остается сложной задачей и особенно для видов с крупными геномами [2]. Основными источниками проблем при сборке является то, что растительные геномы содержат большую долю повторов, часто являются полиплоидами и имеют высокую гетерозиготность. Все эти факторы усложняют сборку даже с использованием нескольких технологий секвенирования и высоким покрытием. Первыми из крупных растительных геномов, секвенированных и собранных на уровне хромосом, стали пшеница [3], размер генома 15,8 Gb и чеснок [4], размер генома 15,9 Gb. Авторы проектов по секвенированию применили несколько технологий секвенирования, включая SMRT-секвенирование (PacBio Sequel), секвенирование Oxford Nanopore Technology, Illumina HiSeq paired-end, 10× Genomics и высокопроизводительное секвенирование с захватом конформации хромосомы (Hi-C) для построения референсных геномов на уровне хромосом. Хотя современные инструменты позволяют получать очень длинные риды, сборка на уровне хромосом по-прежнему остаётся серьёзным препятствием в проектах по секвенированию геномов. Полногеномное секвенирование намного более информативно, если последовательности ДНК связаны и правильно ориентированы в хромосоме, чем не связанные разрозненные и плохо собранные скэффолды (остовы). Имеющиеся биоинформатические инструменты и технологии прочтения последовательностей ДНК длинными ридами не обеспечивают рутинной сборки геномов без пробелов от теломеры до теломеры.

Статья Ermolaev et al. [5] рассматривает проблему верификации сборок геномов *de novo* для видов с большими геномами. В работе используется метод Tyr-FISH для физического картирования коротких уникальных последовательностей ДНК на хромосомах, что позволяет исправить ошибки сборки в псевдохромосомных матрицах и проверить порядок и ориентацию контигов — критически важный шаг для создания надёжной высококачественной референсной сборки генома. Метод Tyr-FISH был адаптирован и впервые применен в молекулярно-цитогенетических исследованиях на растениях Khurstaleva and Kik [6]. Метод в 100 раз чувствительнее обычной флуоресцентной *in situ* гибридизации (FISH), поэтому позволяет детектировать на физической хромосоме короткие ДНК последовательности. При сборке геномов обычно используются генетические карты, поскольку они упорядочивают и ориентируют собранные контиги/скэффолды [7-10]. Генетическая карта — это диаграмма, показывающая относительное расположение генов и генетических маркеров на хромосоме на основе частоты рекомбинации во время мейоза и не несет информации о физическом расстоянии между генами/маркерами. Даже высоко-насыщенные карты сцепления не покрывают области подавления рекомбинации, например, в прицентромерном и субтеломерном гетерохроматине [11-13]. Другими словами, два близко стоящих маркера на генетической карте могут быть расположены на расстоянии сотни миллионов пар нуклеотидов и даже в разных плечах хромосом. Ermolaev et al. [5] в своей работе провели уточнение сборки генома лука репчатого (*Allium cepa* L.), проведенной впервые Finkers et al. в 2021 году [14]. В результате были выявлены серьезные ошибки сборки. Визуализация маркеров на физической хромосоме 6 показала, что из 11 проанализированных маркеров 4 маркера

были размещены в неправильном положении на генетической карте хромосомы 6, и 3 на карте псевдохромосомы 6. На физической хромосоме 2 в неправильном положении были размещены 3 маркера из 12 проанализированных маркеров на генетической карте, и 3 маркера из 13 маркеров на картах псевдохромосомы 2. Результаты этих исследований с использованием Tug-FISH показали, что 23,1% (хромосома 2) и 27,3% (хромосома 6) позиций тестируемых генов различались между физическими хромосомами и псевдохромосомами. Это может указывать на то, что до четверти остовов в сборках генома лука могут быть организованы неправильно. Оценка сборки генома томата с помощью FISH и оптического картирования выявила схожий (30%) уровень ошибок в порядке остовов [15].

Молекулярное маркирование с высоким разрешением

Недавние прорывные исследования в молекулярной генетике и новых технологиях дают ценную информацию об их практическом применении для более быстрой и точной селекции. Анализ методом плавления высокого разрешения (HRM) – мощный новый ПЦР-метод, используемый для выявления генетической изменчивости в последовательностях нуклеиновых кислот. Система HRM в закрытой пробирке снижает риск контаминации, сокращает время анализа и не требует пост-ПЦР-обработки образцов, а именно, постановки электрофореза [16-17]. Такое сочетание высокой чувствительности и производительности значительно облегчает работу селекционеров. Khrustaleva et al. [18] разработали двухэтапную систему маркеров HRM для идентификации различных типов мужской стерильной цитоплазмы (ЦМС) и фертильной N-цитоплазмы в луке репчатом. Открытие ЦМС у растений позволяет селекционерам избежать трудоемкую работу по удалению пыльников при подготовке к ручному опылению и добиться значительного повышения урожайности за счет гетерозиса. Кроме этого семенное размножение линий ЦМС стало важным инструментом для селекционеров, создающих коммерческие гибриды F_1 , что обеспечивает надежную защиту авторских прав селекционеров и семеноводов. Для защиты патентов на коммерческие гибриды F_1 , селекционеры используют ЦМС, чтобы сделать семена F_1 невоспроизводимыми для фермеров. Это вынуждает покупателей приобретать новые семена каждый сезон, тем самым сохраняя коммерческую ценность гибридной генетики, не полагаясь исключительно

на патентное право. Для получения семян коммерческих гибридов F_1 нужны закрепители стерильности и восстановители фертильности. Успех в правильном отборе закрепителей стерильности и восстановителей фертильности зависит от надежных молекулярных маркеров на тип цитоплазмы и генотип ядерных генов восстановителей фертильности.

ЦМС определяется aberrантными митохондриальными генами и связана с нарушением образования функциональной пыльцы. Благодаря достижениям в молекулярной биологии растительных клеток, знания, полученные за последнее десятилетие, прояснили роль митохондрий в гибели мужских репродуктивных органов. Митохондрии – энергетические станции клеток. Созревание пыльцы – энергозатратный процесс, поэтому нарушения в работе митохондрий могут иметь серьезные последствия для мужской фертильности [19-21]. Секвенирование NGS и новая технология сборки митохондриального генома выявили кольцевые формы, которые могут быть промежуточными звеньями в репликации или рекомбинации [22]. Множественные рекомбинационные события с участием известных митохондриальных генов, а также последовательностей неизвестного происхождения создают новые открытые рамки считывания (*orf*), связанные с цитоплазматической мужской стерильностью у высших растений [21,23]. Такие *orf*, ассоциированные с ЦМС, были использованы для создания молекулярных маркеров для идентификации типа ЦМС у лука репчатого [18].

S-цитоплазма, открытая Henry A. Jones еще в 1925 году на сорте 'Italian Red' лука репчатого [24] широко используется семеноводами благодаря стабильной мужской стерильности, отсутствию снижения женской фертильности и относительно частому наличию рецессивного аллеля (*ms*) в ядерном локусе, восстанавливающего мужскую фертильность (*Ms*), что позволяет семенное размножение линий с мужской стерильностью [25]. T-цитоплазма, обнаруженная Berninger [26] в сорте «Jaune paille des Vertus» используется реже, чем S-цитоплазма [27], и, предположительно, представляет собой относительно недавний цитоплазматический вариант, тесно связанный с N-цитоплазмой лука [28]. В недавно опубликованной статье, авторы Havey и Kim [29] сделали важный вывод о существовании четвертого типа цитоплазмы, который они предложили обозначить как цитоплазму «R», поскольку она, возможно, произошла от сорта лука «Rijnsburger» в Нидерландах.

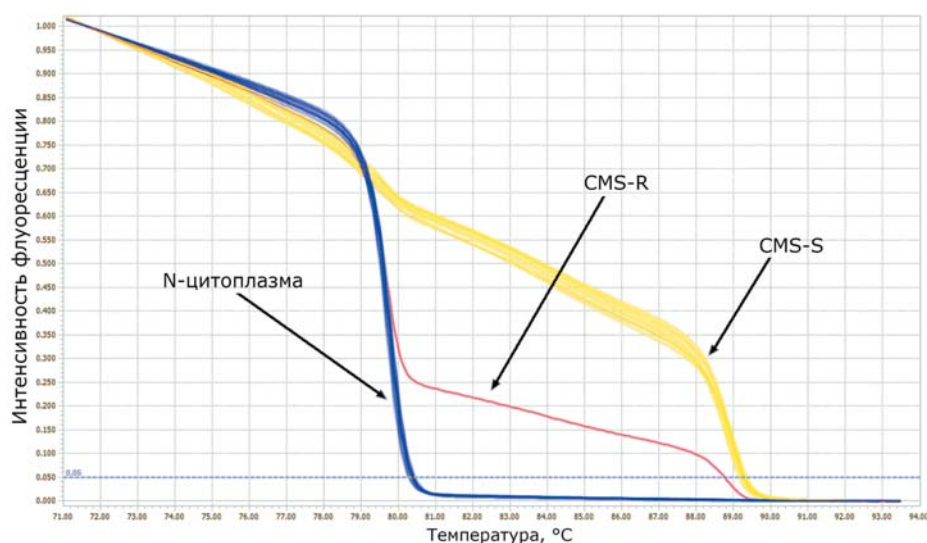


Рис. 1. Кривые плавления ампликонов разных типов цитоплазмы лука репчатого, полученные с помощью HRM-анализа с использованием трех праймеров AcM-HRM на основе митохондриальных генов *cox1* и *orf725*
Fig. 1. Normalized melting curve of amplicons from different types of onion cytoplasm obtained by HRM analysis using three AcM-HRM primers based on the mitochondrial genes *cox1* and *orf725*

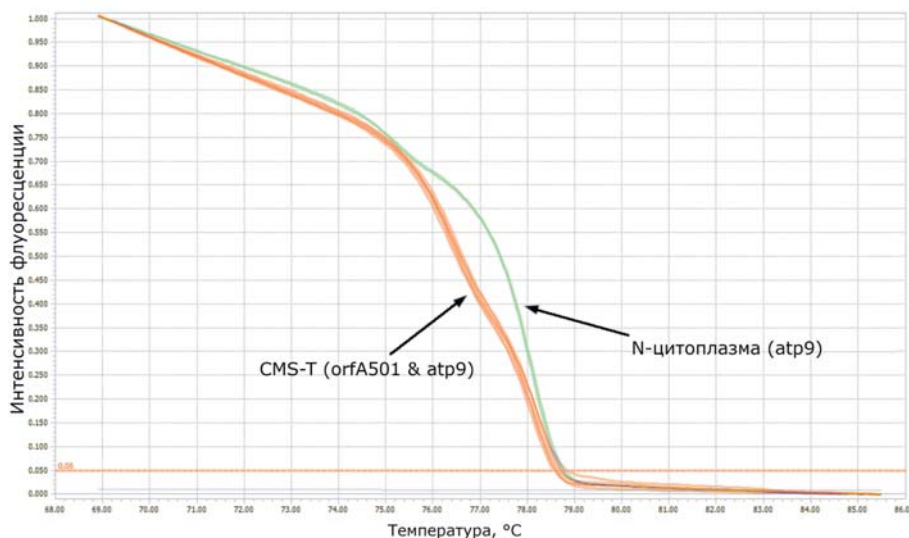


Рис.2. Различия кривых плавления ампликонов между фертильной N- и стерильной T-цитоплазмой, выявленные с использованием праймеров T-HRM на последовательность orfA501 и atp9-HRM на ген atp9
Fig. 2. Normalized melting curve of amplicons revealed differences between N- and T-cytoplasms detected using T-HRM primers on orfA501, and atp9-HRM primers on the atp9 gene

Khrustaleva et al. [18] разработала двухэтапную систему HRM-маркеров для идентификации N-, S-, R- и T-цитоплазм лука. На первом этапе для идентификации N-, S- и R-цитоплазм был разработан один прямой праймер к идентичным последовательностям генов *sox1* и *orf725*, а также два обратных праймера, специфичных к полиморфным последовательностям генов *sox1* и *orf725* (рис. 1). На втором этапе селекционные линии с N-цитоплазмой были оценены с помощью праймеров, разработанных на основе последовательности *orfA501*, для различия N- и T-цитоплазм (рис. 2). Идентификация цитоплазмы одного растения по фенотипу занимает от 4 до 8 лет. Система на основе HRM позволяет быстро и легко различать четыре типа цитоплазмы лука репчатого за несколько часов.

Kim and Kim [30] разработали HRM-маркеры для генотипирования локуса восстановления фертильности (Ms) у лука репчатого. Авторы сконструировали маркеры Rf-HRM7 на основе InDels в последовательностях аллелей *AcPMS1*. Ген *AcPMS1*, кодирующий белок PMS1, участвующий в репарации неспаренных нуклеотидов ДНК у других видов растений, был предложен как ген, ответственный за восстановление мужской фертильности [31].

Мейотическая рекомбинация – фундаментальная основа селекции растений

Рекомбинация (кроссинговер) – это обмен ДНК между материнскими и отцовскими хромосомами во время мейоза с образованием новых комбинаций аллелей, наследуемых в следующем поколении. Каждый селекционер при скрещивании донора и реципиента хотел бы, чтобы обмен ценными аллелями происходил чаще в целевом участке хромосомы. Однако мейотические рекомбинации распределены неслучайно и строго контролируются. Какие факторы влияют на распределение кроссинговеров вдоль физической хромосомы и можно ли манипулировать этим процессом? Kudryavtseva et al. [32] попытались найти ответы в своей работе по изучению контроля локализации рекомбинаций в мейозе у луковых. С этой целью авторами был использован уникальный растительный материал с диаметрально противоположным ландшафтом рекомбинаций: у *Allium cepa* (лук репчатый), как и у подавляющего большинства растений и животных, рекомбинации преимущественно возникают в дистальных 2/3 плеча хромосомы, тогда как у *Allium fistulosum* (лук батун) рекомбинации строго локализованы в

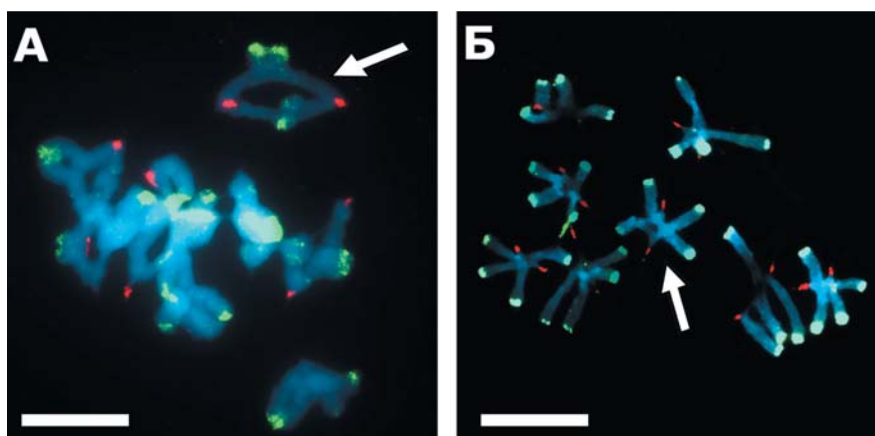


Рис. 3. Флуоресцентная in situ гибридизация на бивалентах Allium cepa (А) и Allium fistulosum (Б) с ДНК-зондом на центромерный (красный сигнал) и субтеломерный повторы (зеленый сигнал). Хроматин окрашен DAPI. Стрелки указывают на кольцевой бивалент с дистальной локализацией хиазм/рекомбинаций у Allium cepa (А) и крест бивалент с перичентромерной локализацией хиазм/рекомбинаций у Allium fistulosum (Б). Масштаб линейки 10 мкм.
Fig. 3. Fluorescence in situ hybridization of Allium cepa (A) and Allium fistulosum (B) bivalents with a DNA probe for centromeric (red signal) and subtelomeric repeats (green signal). Chromatin is stained with DAPI. Arrows indicate the ring bivalent with distal chiasmata/recombinations in Allium cepa (A) and the cross bivalent with pericentromeric chiasmata/recombinations in Allium fistulosum (B). Scale bar, 10 μ m.

проксимальной области, где супрессия рекомбинаций обнаружена у подавляющего большинства эукариот. Данная работа наряду с изучением ключевых фундаментальных процессов имеет важное практическое значение. Дело в том, что лук батун является богатым источником ценных генов в селекции лука репчатого. *A. fistulosum* имеет гены устойчивости к таким заболеваниям, как фитофтороз листьев лука (*Botrytis squamosa*) [33] розовая корневая гниль (*Pyrenochaeta terrestris*) [34] и антракноз (*Colletotrichum gloeosporioides*) [35]. Также отмечена устойчивость к экономически важному вредителю лука – луковой мухе (*Delia antiqua*) [36]. Кроме того, *A. fistulosum* отличается более высоким содержанием сухого вещества, более острым запахом и зимостойкостью, цветет раньше, имеет более короткий период цветения и обладает большей привлекательностью для опылителей, чем лук репчатый [37]. Попытки использовать *A. fistulosum* как донора ценных генов для интрогрессии в геном лука репчатого *A. cepa* были сделаны еще в 1935 году Emsweller and Jones [38]. Однако до сих пор не было получено лука репчатого с перенесенными генами от *A. fistulosum*, так как ВС1 гибриды между *A. cepa* и *A. fistulosum* были стерильны. Причины такого барьера скрещиваемости этих двух близкородственных видов остаются не выясненными. Kudryavtseva et al. [32] создали F₁ гибриды между *A. cepa* и *A. fistulosum* и провели тщательный анализ родительских генотипов и полученных гибридов с использованием молекулярно-цитогенетических методов. Было подтверждено диаметрально противоположное распределение рекомбинаций у этих двух видов (рис. 3).

Геномная *in situ* гибридизация (GISH) F₁ гибридов выявила растения диплоидные, несущие 8 хромосом *A. cepa* и 8 *A. fistulosum* ($2n=2x=8F+8C$), а также триплоидные растения, у которых был полный диплоидный набор хромосом и *A. fistulosum* и гаплоидный *A. cepa* ($2n=3x=16F+8C$). Получение триплоидных растений может указывать на возможность образования $2n$ гамет в пыльце *A. fistulosum*. Такой растительный материал позволил изучить процессы, происходящие в мейозе при конъюгации хромосом *A. fistulosum* и *A. cepa* в гомеологичных бивалентах F₁ диплоидных гибридов, и в гомологичных бивалентах *A. fistulosum* в присутствии гаплоидного набора *A. cepa* (рис.4). Благодаря интеграции GISH с иммунолокализацией ключевых рекомбинационных белков (ASY1, ZYP1, MLH1, MUS81) у *A. cepa*, *A. fistulosum* и их диплоидных и триплоидных гибридов, авторы выявили сдвиг распределения рекомбинаций в дистальную область хромосом в диплоидных и триплоидных F₁ гибридах, что указывает на наличие генетического контроля распределения рекомбинаций. По-видимому, существует ген/гены, контролирующей локализацию рекомбинаций. Судя по тому, что сдвиг рекомбинаций произошел в дистальную область плеч хромосом, а не в проксимальную, доминантный ген несет *A. cepa*. Эти результаты указывают на генетически контролируемую систему формирования паттернов рекомбинации, имеющую значение для управления генетической изменчивостью в размножающихся популяциях. Учитывая биологическую важность и сложность рекомбинаций, контроль их локализации необходимо рассматривать на многих уровнях, выходящих за рамки генетики, включая эпигенети-

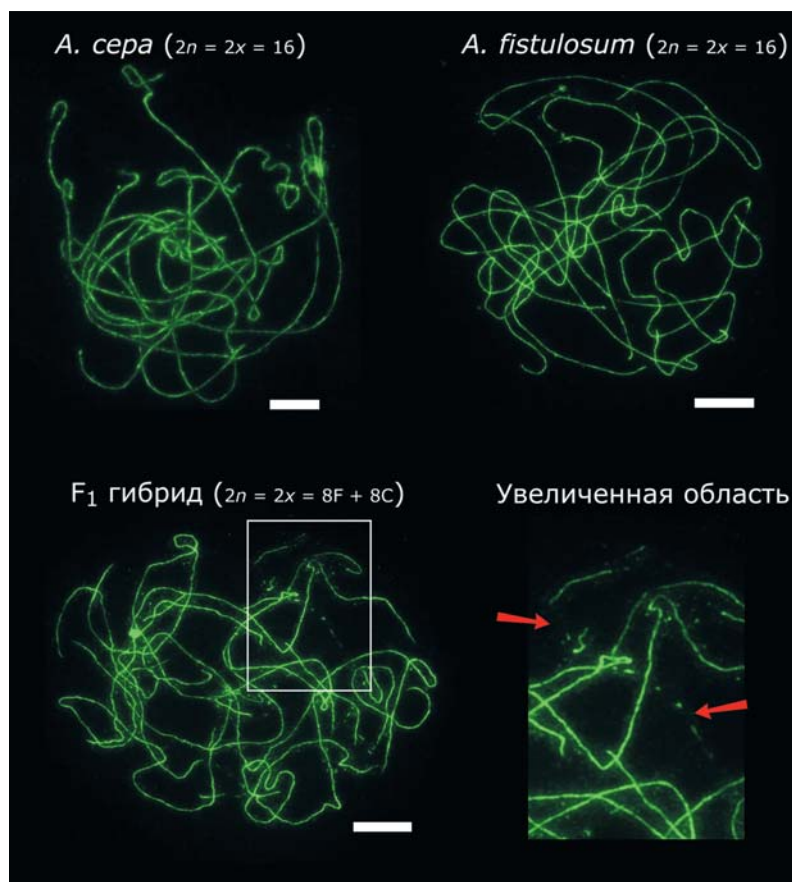


Рис. 4. Иммунодетекция белка центрального элемента синаптомемного комплекса ZYP1 (зеленый сигнал) на пахитенных хромосомах *A. cepa*, *A. fistulosum* и их диплоидном гибриде F₁. Стрелки указывают на области с отсутствием синapsиса между гомеологичными хромосомами в гибриде F₁. Масштаб линейки 10 мкм.
Fig. 4. Immunodetection of the synaptonemal complex central element protein ZYP1 (green signal) on pachytene chromosomes of *A. cepa*, *A. fistulosum*, and their diploid F₁ hybrid. Arrows indicate regions of absent synapsis between homeologous chromosomes in the F₁ hybrid. Scale bar, 10 μ m.

ку, например, метилирование ДНК и модификацию гистонов, которые упаковывают ДНК в эукариотическом ядре, пространственно-временную репликацию ДНК и распределение двуцепочечных разрывов ДНК, влияние модификации и взаимодействия белков и другие.

Мульти-омиксные технологии в селекции растений

Ярким примером использования комплексного мульти-омиксного анализа в селекции и семеноводстве служат исследования Huang et al. [39] на *Medicago sativa*. Ранее селекционеры отмечали, что морфология соцветия, в частности, способность цветоножки к удлинению, влияет на семенную продуктивность. Однако регуляторные механизмы, лежащие в основе удлинения соцветий люцерны (*Medicago sativa*), оставались неясными. Используя транскриптомный, протеомный и целенаправленный анализ фитогормонального метаболома, авторы изучили процессы развития длинных и коротких соцветий и выявили ключевые гены, участвующие в удлинении цветоножки.

Помимо изучения развития растений в различных условиях, мульти-омика имеет решающее значение для изучения и понимания реакций растений на стресс. Известные исследования по устойчивости сои к алюминиевому стрессу представлены в работе Gao et al. [40]. На основе анализа всего генома были идентифицированы 124 гена, кодирующих белки множественной лекарственной и токсичной экстрезии соединений (MATE). Анализ транскриптомных данных позволил авторам оценить паттерны экспрессии генов MATE при алюминиевом стрессе. Субклеточная локализация белков MATE была выявлена с помощью конфокальной микроскопии рекомбинантного GFP (зеленого флуоресцентного белка), слитого с белком MATE. Эти результаты будут способствовать разработке сельскохозяйственных культур, устойчивых к токсичности алюминия. Это серьезная проблема, поскольку более 50% мировых пахотных земель имеют кислую почву из-за ряда факторов, включая присутствие алюминия; его токсическое действие в конечном итоге приводит к низкой урожайности и задержке роста растений.

Другой подход к преодолению негативного воздействия алюминия в кислой почве был предложен Liu et al. [41], которые показали, что внесение экзогенного мелатонина значительно снижало содержание алюминия как в корнях (на 28,6%), так и в побегах (на 27,6%) люцерны. Кроме того, авторы обнаружили, что внесение мелатонина значительно увеличивало длину корней и сырую массу люцерны. Мелатонин (N-ацетил-5-метокситриптамин) известен своей способностью повышать устойчивость растений к различным абиотическим стрессам. С помощью комбинированного физиологического и транскриптомного анализа был выяснен механизм, посредством которого мелатонин снижает токсичность алюминия. Результаты РНК-секвенирования показали, что применение мелатонина значительно повышает экспрессию генов, связанных с углеводным метаболизмом, включая те, которые участвуют в процессе гликолиза, а также метаболизме сахарозы и крахмала. Это позволяет предположить, что применение мелатонина может смягчить токсичность алюминия, способствуя связыванию алюминия с клеточными стенками, тем самым снижая внутриклеточное накопление алюминия, улучшая дыхание и содержание сахарозы и трегалозы. Кроме того, метионин играет решающую роль в нейтрализации избытка H_2O_2 , вызванного алюминием, за счет усиления активности супероксиддисмутазы, пероксидазы и каталазы.

Исследование Song et al [42], посвященное организации гуаниновых оснований в геноме табака, проливает свет на механизмы устойчивости растений к абиотическому стрессу. Нуклеиновые кислоты обладают значительным потенциалом сворачиваться в трёхмерные, «вторичные» структуры, которые могут возникать благодаря образованию не-Уотсон-Криковских водородных связей между азотистыми основаниями. Самосборка гуаниловой кислоты приводит к образованию мотива гуаниновой тетрады – G-квадруплексов. Song et al. [42] проанализировали G-квадруплекс, используя биоинформатический подход, основанный на данных генома и транскриптома табака в условиях абиотического стресса. Авторы показали, что G-квадруплекс, образованный простым повтором последовательности (SSR) и его фланкирующей последовательностью в промоторной области гена NtBBX, может повышать засухоустойчивость табака. Это исследование расширяет наше понимание распределения и функций G-квадруплексов и открывает путь к повышению устойчивости сельскохозяйственных культур к абиотическому стрессу.

Перспективы дальнейшего развития селекции растений

Оценивая стратегию дальнейшего развития селекции растений, я вижу в интеграции омиксных технологий, редактирования генома и искусственного интеллекта. Фундаментальные исследования регуляции биологических процессов с использованием новых технологий будут играть ключевую роль для успешной селекции. Так интеграция редактирования генома и углубленное изучение мейотической рекомбинации позволят регулировать частоту кроссинговера в целевых участках гамет. Все усилия по повышению точности и скорости селекции растений служат главной цели – обеспечению изобилия и разнообразия растительных продуктов питания. Проблемы мирового растениеводства в обеспечении продовольственной безопасности рассматриваются в превосходном обзоре Bradbury et al [43], который охватывает, наряду с селекцией растений, всю производственную цепочку: точное земледелие, робототехнику, искусственный интеллект и мониторинг в реальном времени.

Редактирование генома имеет огромный потенциал для создания устойчивых и высокоурожайных культур более эффективно, чем традиционные методы. Однако применение редактирования генома в селекции растений остается ограниченным несколькими факторами, в первую очередь способом доставки системы редактирования в растительную клетку. Обычные методы доставки основаны на создании трансгенных растений с использованием культуры тканей с последующим скрещиванием для удаления трансгенного материала, но сохранения отредактированных новых аллелей [44-47]. В апреле 2025 года была опубликована прорывная статья «Вирусная доставка РНК-направляемого редактора генома для редактирования зародышевой линии без трансгенов в *Arabidopsis*» [48]. Для проникновения вируса, несущего конструкцию CRISPR/Cas, в апикальные меристематические клетки арабидопсиса авторам удалось преодолеть барьер, который растения выработали в ходе эволюции [49].

Два месяца спустя после описанного выше исследования на арабидопсисе, была опубликована статья Qiao et al [50], в которой авторы сообщили об успешном редактировании генома пшеницы с использованием вирусного вектора. Авторы сконструировали вирус желтой полоса-

той мозаики ячменя (BYSMV) в системе вирусного вектора с отрицательной цепью РНК для доставки Cas9 и направляющей РНК в точку роста пазушных меристем. Авторам удалось добиться высокоэффективного и менее зависимого от генотипа наследуемого редактирования генома пшеницы. Важно отметить, что полученные потомки были безвирусными и несли би-аллельные или гомозиготные мутации. Учитывая, что BYSMV поражает 26 видов однодольных растений, система доставки BYSMV может найти широкое применение для достижения высокоэффективного, нетрансгенного и менее зависимого от генотипа наследуемого редактирования генома, что облегчит геномные исследования и селекцию сельскохозяйственных культур.

Искусственный интеллект стал преобразующей силой в биоинформатике, фундаментально изменив подходы к анализу биологических данных и совершению научных открытий. Важнейшим достижением в этой области стало решение проблемы сворачивания белка с помощью AlphaFold [51], а последующие производные технологии теперь обеспечивают даже более точные прогнозы, чем исходная модель [52]. В области анализа геномных данных искусственный интеллект значительно продвинулся в таких областях, как поиск генетических вариантов [53]. Применение искусственного интеллекта в селекции растений ознаменовало смену парадигмы в сельскохозяйственных инновациях, ознаменовав переход от практик, основанных на эмпирическом опыте, к интеллектуальным, подкрепленным данными

методологиям. Интеграция геномной селекции, высокопроизводительного фенотипирования, точного скрещивания и моделирования климатической устойчивости открывает беспрецедентные возможности для быстрой и эффективной разработки улучшенных сортов сельскохозяйственных культур. Особенно перспективным представляется синергия между искусственным интеллектом и технологией CRISPR-Cas9, знаменующая собой значительный прорыв в области направленной селекции. Искусственный интеллект расширяет возможности CRISPR, оптимизируя дизайн гидовой РНК, точнее прогнозируя 'не целевые эффекты' (off target effects) и обеспечивая проведение точных генетических модификаций с помощью предиктивных моделей [54]. Способность искусственного интеллекта обрабатывать крупномасштабные данные, предсказывать сложные взаимодействия признаков и оптимизировать селекционные решения делает его незаменимым инструментом.

Поскольку давление на глобальную продовольственную безопасность нарастает из-за изменения климата и роста населения, селекция растений на основе молекулярно-генетических, мультиомиксных и CRISPR технологий с использованием искусственного интеллекта должна сыграть ключевую роль в создании устойчивых и высокопродуктивных сортов, адаптированных к меняющимся условиям окружающей среды. Такая синергия современных технологий становится незаменимым инструментом для обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства в XXI веке.

• Литература / References

1. Almogly G., Pratt M., Oberstrass F., Lee L., Mazur D., Beckett N., Barad O., Soifer I., Perelman E., Etzioni Y., et al. Cost efficient whole genome-sequencing using novel mostly natural sequencing-by-synthesis chemistry and open fluidics platform. *Biorxiv* 2022. <https://doi.org/10.1101/2022.05.29.493900>
2. Shirasawa K., Harada D., Hirakawa H., Isobe S., Kole C. Chromosome-level de novo genome assemblies of over 100 plant species. *Breed. Sci.* 2021;(71):117–124. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.20146>
3. Appels R., Eversole K., Feuille C., Keller B., Rogers J., Stein N. The International Wheat Genome Sequencing Consortium (IWGSC). Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome. *Science*. 2018;(361):10–1126. <https://doi.org/10.1126/science.aar7191>
4. Sun X., Zhu S., Li N., Cheng Y., Zhao J., Qiao X., Lu L., Liu S., Wang Y., Liu C., et al. A chromosome-level genome assembly of garlic (*Allium sativum*) provides insights into genome evolution and allicin biosynthesis. *Mol. Plant*. 2020;(13):1328–1339. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.07.019>
5. Ermolaev A., Kudryavtseva N., Pivovarov A., Kirov I., Karlov G., Khrustaleva L. Integrating Genetic and Chromosome Maps of *Allium cepa*: From Markers Visualization to Genome Assembly Verification. *Int. J. Mol. Sci.* 2022;(23):10486. <https://doi.org/10.3390/ijms231810486>
6. Khrustaleva L.I., Kik C. Localization of single-copy T-DNA insertion in transgenic shallots (*Allium cepa*) by using ultra-sensitive FISH with tyramide signal amplification. *The Plant Journal*. 2001;25(6): 699–707. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2001.00995.x>
7. Fierst J.L. Using linkage maps to correct and scaffold de novo genome assemblies: methods, challenges, and computational tools. *Front. Genet.* 2015;(6):220. <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00220>
8. Maccaferri M., Harris N.S., Twardziok S.O., Pasam R.K., Gundlach H., Spannagl M., Ormanbekova D., Lux T., Prade V.M., Milner S.G., et al. Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets. *Nat. Genet.* 2019;(51):885–895.
9. Walve R., Rastas P., Salmela L. Kermit: Linkage map guided long read assembly. *Algorithms Mol. Biol.* 2019;(14):1–10. <https://doi.org/10.1186/s13015-019-0143-x>
10. Wu H., Yao D., Chen Y., Yang W., Zhao W., Gao H., Tong C. De novo genome assembly of *Populus simonii* further supports that *Populus simonii* and *Populus trichocarpa* belong to different sections. *G3 Genes Genomes Genet.* 2020;(10):455–466. <https://doi.org/10.1534/g3.119.400913>
11. Koo D.H., Jo S.H., Bang J.W., Park H.M., Lee S., Choi D. Integration of cytogenetic and genetic linkage maps unveils the physical architecture of tomato chromosome 2. *Genetics*. 2008;(179):1211–1220. <https://doi.org/10.1534/genetics.108.089532>
12. Szinay D., Chang S.B., Khrustaleva L., Peters S., Schijlen E., Bai Y., Stiekema W.J., Van Ham R.C., De Jong H., Klein Lankhorst R.M. High-resolution chromosome mapping of BACs using multi-colour FISH and pooled-BAC FISH as a backbone for sequencing tomato chromosome 6. *Plant J.* 2008;(56):627–637. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03626.x>
13. Ren Y., Zhao H., Kou Q., Jiang J., Guo S., Zhang H., Hou W., Zou X., Sun H., Gong G., et al. A high resolution genetic map anchoring scaffolds of the sequenced watermelon genome. *PLoS ONE*. 2012;(7):e29453. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029453>
14. Finkers R., van Kaauwen M., Ament K., Burger-Meijer K., Egging R., Huits H., Kodde L., Kroon L., Shigyo M., Sato S., et al. Insights from the first genome assembly of Onion (*Allium cepa*). *G3*. 2021;(11):jkab243. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkab243>
15. Sheare L.A., Anderson, L.K., de Jong H., Smit S., Goicoechea J.L., Roe B.A., Hua A., Giovannoni J.J., Stack S.M. Fluorescence in situ hybridization and optical mapping to correct scaffold arrangement in the tomato genome. *G3 Genes Genomes Genet.* 2014;(4):1395–1405. <https://doi.org/10.1534/g3.114.011197>
16. Mackay J.F., Wright C.D., Bonfiglioli R.G. A new approach to varietal identification in plants by microsatellite high resolution melting analysis: Application to the verification of grapevine and olive cultivars. *Plant Methods* 2008;(4):1–10. <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/1746-4811-4-8>
17. Vossen R.H., Aten E., Roos A., den Dunnen J.T. High-Resolution Melting Analysis (HRMA)—More than just sequence variant screening. *Hum. Mutat.* 2009;(30):860–866. <https://doi.org/10.1002/humu.21019>
18. Khrustaleva L., Nzeha M., Ermolaev A., Nikitina E., Romanov V. Two-Step Identification of N-, S-, and T-Cytoplasm Types in Onion

- Breeding Lines Using High-Resolution Melting (HRM)-Based Markers. *Int. J. Mol. Sci.* 2023;(24):1605. <https://doi.org/10.3390/ijms24021605>
19. Horn R., Gupta K.J., Colombo N. Mitochondrion role in molecular basis of cytoplasmic male sterility. *Mitochondrion*. 2014;(19):198–205. <https://doi.org/10.1016/j.mito.2014.04.004>
20. Luo D., Xu H., Liu Z., Guo J., Li H., Chen L., Fang C., Zhang Q., Bai M., Yao N., et al. A detrimental mitochondrial-nuclear interaction causes cytoplasmic male sterility in rice. *Nat. Genet.* 2013;(45):573–577.
21. Chen L., Liu Y.G. Male sterility and fertility restoration in crops. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2014;(65):579–606. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040119>
22. Kozik A., Rowan B.A., Lavelle D., Berke L., Schranz M.E., Micheltore R.W., Christensen A.C. The alternative reality of plant mitochondrial DNA: One ring does not rule them all. *PLoS Genet.* 2019;(15):e1008373. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1008373>
23. Tuteja R., Saxena R.K., Davila J., Shah T., Chen W., Xiao Y.L., Fan G., Saxena K., Alverson A.J., Spillane C., et al. Cytoplasmic male sterility-associated chimeric open reading frames identified by mitochondrial genome sequencing of four *Cajanus* genotypes. *DNA Res.* 2013;(20):485–495. <https://doi.org/10.1093/dnares/dst025>
24. Jones H. A male sterile onion. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 1936;(34):582–585.
25. Jones H.A. Inheritance of male sterility in the onion and the production of hybrid seed. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 1943;(43):189–194.
26. Berninger B. Contribution to the study of male sterility in the onion (*Allium cepa* L.). *Ann. Amelior. Plant.* 1965;(15):183–199.
27. Havey M. The cytoplasm of sterile lines used to produce commercial hybrid-onion seed. *Allium Improv. Nwsl* 1994;(4):25–27
28. De Courcel A., Vedel F., Boussac J. DNA polymorphism in *Allium cepa* cytoplasm and its implications concerning the origin of onions. *Theor. Appl. Genet.* 1989;(77):793–798.
29. Havey M.J., Kim S. Molecular marker characterization of commercially used cytoplasmic male sterilities in onion. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 2021;(146):351–355. <https://doi.org/10.21273/JASHS05083-21>
30. Kim B., Kim S. Identification of a variant of CMS-T cytoplasm and development of high resolution melting markers for distinguishing cytoplasm types and genotyping a restorer-of-fertility locus in onion (*Allium cepa* L.). *Euphytica*. 2019;(215):1–11. <https://doi.org/10.1007/s10681-019-2492-4>
31. Kim S., Kim C.W., Park M., Choi D. Identification of candidate genes associated with fertility restoration of cytoplasmic male-sterility in onion (*Allium cepa* L.) using a combination of bulked segregant analysis and RNA-seq. *Theor. Appl. Genet.* 2015;(128):2289–2299. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2584-z>
32. Kudryavtseva N., Ermolaev A., Pivovarov A., Simanovsky S., Odintsov S., Khrustaleva L. The Control of the Crossover Localization in *Allium*. *Int. J. Mol. Sci.* 2023;(24):7066. <https://doi.org/10.3390/ijms24087066>
33. Currah L., Maude R.B. Laboratory tests for leaf resistance to *Botrytis squamosa* in onions. *Ann Appl Biol.* 1984;(105):277–283. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1984.tb03051.x>
34. Netzer D., Rabinowitch H.D., Weintal Ch. Greenhouse technique to evaluate pink root disease caused by *Pyrenochaeta terrestris*. *Euphytica*. 1985;(34):385–391.
35. Galvan G.A., Wietsma W.A., Putrasemedja S., Permadi A.H., Kik C. Screening for resistance to anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.) in *Allium cepa* and its wild relatives. *Euphytica*. 1997;(95):173–178.
36. Ponti de O.M.B., Inggamer H. Resistance to the onion fly in *Allium cepa* and *Allium fistulosum*. In: van der Meer Q.P. (ed) Proc 3rd Eucarpia Allium Symp. PUDOC Wageningen, The Netherlands, 1984. pp 21–23.
37. Meer van der Q.P., Bennekom van J.L. Improving the onion crop (*Allium cepa* L.) by transfer of characters from *Allium fistulosum* L. *Biul Warzywniczy*. 1978;(22):87–91.
38. Emsweller S., Jones H. Meiosis in *Allium fistulosum*, *Allium cepa*, and their hybrid. *Hilgardia*. 1935;(9):275–294.
39. Huang X., Liu L., Qiang X., Meng Y., Li Z., Huang F. Integrated Multi-Omics Analysis to Reveal the Molecular Mechanisms of Inflorescence Elongation in *Medicago sativa*. *Int. J. Mol. Sci.* 2024;(25):6497. <https://doi.org/10.3390/ijms25126497>
40. Gao P., Han R., Xu H., Wei Y., Yu Y. Identification of MATE Family and Characterization of GmMATE13 and GmMATE75 in Soybean's Response to Aluminum Stress. *Int. J. Mol. Sci.* 2024;(25):3711. <https://doi.org/10.3390/ijms25073711>
41. Liu C., Cheng H., Wang S., Yu D., Wei Y. Physiological and Transcriptomic Analysis Reveals That Melatonin Alleviates Aluminum Toxicity in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Int. J. Mol. Sci.* 2023;(24):17221. <https://doi.org/10.3390/ijms242417221>
42. Song K., Li B., Li H., Zhang R., Zhang X., Luan R., Liu Y., Yang L. The Characterization of G-Quadruplexes in Tobacco Genome and Their Function under Abiotic Stress. *Int. J. Mol. Sci.* 2024;(25):4331. <https://doi.org/10.3390/ijms25084331>
43. Bradbury A., Clapp O., Biacsi A.S., Kuo P., Gaju O., Hayta S., Zhu J.K., Lambing C. Integrating genome editing with omics, artificial intelligence, and advanced farming technologies to increase crop productivity. *Plant Commun.* 2025;(6):101386. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2025.101386>
44. Altpeter F., Baisakh N., Beachy R., Bock R., Capell T., Christou P., Daniell H., Datta K., Datta S., Dix P.J., et al. Advancing crop transformation in the era of genome editing. *Plant Cell*. 2016;(28):1510–1520. <https://doi.org/10.1105/tpc.16.00196>
45. Kausch A.P., Nelson-Vasilchik K., Hague J., Mookkan M., Quemada H., Dellaporta S., Frago S., Zhang Z.J. Edit at will: genotype independent plant transformation in the era of advanced genomics and genome editing. *Plant Sci.* 2019;(281):186–205. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.01.006>
46. Chen K., Wang Y., Zhang R., Zhang H., Gao C. CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2019;(70):667–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100049>
47. Nasti R.A., Voytas D.F. Attaining the promise of plant gene editing at scale. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2021;(118):e2004846117. <https://doi.org/10.1073/pnas.2004846117>
48. Weiss T., Kamalu M., Shi H., Li Z., Amerasekera J., Zhong Z., Adler B.A., Song M.M., Vohra K., Wirnowski G., Chitkara S. et al. Viral delivery of an RNA-guided genome editor for transgene-free germline editing in *Arabidopsis*. *Nat. Plants*. 2025;(11):967–976.
49. Bradamante G., Mittelsten Scheid O., Incabone M. Under siege: virus control in plant meristems and progeny. *Plant Cell*. 2021;(33):2523–2537. <https://doi.org/10.1093/plcell/koab140>
50. Qiao J.H., Zang Y., Gao Q., Liu S., Zhang X.W., Hu W., Wang Y., Han C., Li D., Wang X.B. Transgene-and tissue culture-free heritable genome editing using RNA virus-based delivery in wheat. *Nat. Plants*. 2025;(11):1252–1259.
51. Jumper J., Evans R., Pritzel A., Green T., Figurnov M., Ronneberger O., Tunyasuvunakool K., Bates R., Židek A., Potapenko A., et al. Highly accurate protein structure prediction with Alpha Fold. *Nature*. 2021;(596):583–589.
52. Zheng W., Wuyun Q., Li Y., Zhang J., Freddolino P.L., Zhang Y. Deep-learning-based single-domain and multidomain protein structure prediction with D-I-TASSER. *Nat. Biotechnol.* 2025. P.1–13.
53. Guille A., Adélaïde J., Finetti P., Andre F., Birnbaum D., Mamessier E., Bertucci F., Chaffanet M. A benchmarking study of individual somatic variant callers and voting-based ensembles for whole-exome sequencing. *Briefings Bioinf.* 2025;(26):bbae697. <https://doi.org/10.1093/bib/bbae697>
54. Kim M.G., Go M.J., Kang S.H., Jeong S.H., Lim K. Revolutionizing CRISPR technology with artificial intelligence. *Exp. Mol. Med.* 2025;(57):1419–1431.

Об авторе:

Людмила Ивановна Хрусталева – доктор биол. наук, профессор,
<https://orcid.org/0000-0002-0614-4641>,
 SPIN-код: 3317-6712, автор для переписки, khrustaleva@rgau-msha.ru

About the Author:

Ludmila I. Khrustaleva – Dr. Sci. (Biology), professor,
<https://orcid.org/0000-0002-0614-4641>,
 SPIN-code: 3317-6712, Corresponding Author, khrustaleva@rgau-msha.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-34-40>
УДК: 635.342:576.3:581.3

Е.В. Козарь*, А.И. Минейкина,
Т.В. Заячковская, С.Н. Белов,
Ю.В. Кулаков, О.А. Чичварина,
М.Г. Фомичева, Я.П. Туксер,
К.С. Стебницкая, Т.С. Вюртц,
Д.Д. Васильева, Е.А. Домблидес

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр овощеводства" (ФГБНУ ФНЦО)
143072, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИИССОК,
ул. Селекционная, д. 14

*Автор для переписки: koz.leno4ek@gmail.com

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 09.ССЦ.25.10 "Селекционно-семеноводческий центр овощных культур" № 075-15-2025-245.

Вклад авторов: Козарь Е.В.: методология, визуализация, ресурсы, проведение исследований, формальный анализ, верификация данных, администрирование данных, создание черновика рукописи. Минейкина А.И., Заячковская Т.В., Белов С.Н., Кулаков Ю.В., Чичварина О.А., Фомичева М.Г., Туксер Я.П., Стебницкая К.С., Вюртц Т.С., Васильева Д.Д.: проведение исследований, формальный анализ, верификация данных. Домблидес Е.А.: руководство исследованием, администрирование проекта, ресурсы, создание рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Для цитирования: Козарь Е.В., Минейкина А.И., Заячковская Т.В., Белов С.Н., Кулаков Ю.В., Чичварина О.А., Фомичева М.Г., Туксер Я.П., Стебницкая К.С., Вюртц Т.С., Васильева Д.Д., Домблидес Е.А. Культивирование микроспор на шейкере повышает качество эмбриоидов и эффективность регенерации при получении удвоенных гаплоидов из микроспор капусты белокочанной (*Brassica oleracea* var. *capitata*). *Овощи России*, 2025;(6):34-40. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-34-40>

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Принята к печати: 18.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Elena V. Kozar*, Anna I. Mineykina,
Tatyana V. Zayachkovskaya, Sergey N. Belov,
Yuri V. Kulakov, Olga A. Chichvarina,
Maria G. Fomicheva, Yana P. Tukuser,
Ksenia S. Stebnitskaya, Tatyana S. Vjurtts,
Daria D. Vasilieva, Elena A. Dombliides

FSBSI Federal Scientific
Vegetable Center (FSBSI FSVC)
14, Selektionnaya str., VNISSOK,
Odintsovo region, Moscow district, 143072, Russia

*Corresponding Author: oz.leno4ek@gmail.com

Funding. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. 09.SSC.25.10 "Breeding and Seed Center for Vegetable Crops" No. 075-15-2025-245.

Authors' Contribution: Kozar E.V.: methodology, visualization, resources, investigation, formal analysis, validation, data curation, writing – original draft. Mineykina A.I., Zayachkovskaya T.V., Belov S.N., Kulakov Yu.V., Chichvarina O.A., Fomicheva M.G., Tukuser Ya.P., Stebnitskaya K.S., Vjurtts T.S., Vasilieva D.D.: investigation, formal analysis, validation. Dombliides E.A.: supervision, project administration, resources, writing – review & editing.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Kozar E.V., Mineykina A.I., Zayachkovskaya T.V., Belov S.N., Kulakov Yu.V., Chichvarina O.A., Fomicheva M.G., Tukuser Ya.P., Stebnitskaya K.S., Vjurtts T.S., Vasilieva D.D., Dombliides E.A. Shaker-based microspore culture improves embryoid quality and regeneration efficiency in the production of doubled haploids from microspores of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*). *Vegetable crops of Russia*, 2025;(6):34-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-34-40>

Received: 27.09.2025

Accepted for publication: 07.11.2025

Published: 18.12.2025

Культивирование микроспор на шейкере повышает качество эмбриоидов и эффективность регенерации при получении удвоенных гаплоидов из микроспор капусты белокочанной (*Brassica oleracea* var. *capitata*)

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Технология получения удвоенных гаплоидов (DH) позволяет ускорить селекцию гомозиготных линий у белокочанной капусты, однако её эффективность ограничена генотип-зависимостью. Оптимизация условий культивирования, включая использование платформы-шейкера, может повысить выход и регенерационный потенциал эмбриоидов.

Методы. Исследованы три генотипа капусты белокочанной (№ 2502, 2503, 2504). Микроспоры культивировали в стационарных условиях и на шейкере (40–50 об/мин). На 30-е сутки оценивали стадии развития эмбриоидов; далее их переносили на среду регенерации и через 3 месяца фиксировали успешность регенерации в полноценные растения.

Результаты. Культивирование на шейкере достоверно увеличивало долю семядольных эмбриоидов (до 81,7% у генотипа 2502) и снижало частоту аномалий (до 0% у генотипа 2503). Общая регенерационная способность эмбриоидов в условиях шейкера составила 30,5±5,4% против 19,2±2,8% в стационарных условиях. Наиболее эффективно регенерировали семядольные эмбриоиды, полученные с использованием шейкера (36,5%). Результаты подтверждают целесообразность внедрения шейкера в DH-протоколы капусты белокочанной с целью повышения её эффективности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

капуста белокочанная, удвоенные гаплоиды, микроспоры, эмбриоиды, регенерация растений

Shaker-based microspore culture improves embryoid quality and regeneration efficiency in the production of doubled haploids from microspores of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*)

ABSTRACT

Relevance. Doubled haploid (DH) technology enables accelerated breeding of homozygous lines in white cabbage; however, its efficiency is limited by genotype dependency. Optimizing culture conditions, including the use of a shaker platform, may enhance embryoid yield and regeneration potential.

Methodology. We studied three white cabbage genotypes (No. 2502, 2503, and 2504). Microspores were cultured under both static and shaking conditions (40-50 rpm) for 30 days. On day 30, we assessed the developmental stages of the embryoids. After that, the embryoids were transferred to a regeneration medium and, after three months, we recorded successful regeneration into fully developed plants.

Results. Shaker culture significantly increased the proportion of cotyledonary-stage embryoids (up to 81.7% in genotype 2502) and reduced the frequency of abnormalities (down to 0% in genotype 2503). Overall embryoid regeneration capacity under shaker conditions was 30.5±5.4%, compared to 19.2±2.8% under static conditions. Cotyledonary embryoids produced on the shaker showed the highest regeneration efficiency (36.5%). These findings support the implementation of shaker-based culture in DH protocols for white cabbage to improve overall efficiency.

KEYWORDS:

cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*), doubled haploids, microspores, embryoids, plant regeneration

Введение

Технология получения удвоенных гаплоидов (DH) через культуру микроспор *in vitro* представляет собой мощный инструмент современной селекции, позволяющий в сжатые сроки создавать полностью гомозиготные линии. Это значительно ускоряет селекционный процесс по сравнению с традиционными методами, требующими многолетнего инбридинга. В контексте капусты белокочанной (*Brassica oleracea* var. *capitata*), одной из важнейших овощных культур мира, внедрение этой технологии имеет колоссальный потенциал для ускорения создания новых высокоурожайных и адаптированных сортов и гибридов, поскольку эта культура имеет двухлетний вегетационный период [1].

Несмотря на очевидные преимущества, широкое применение DH-технологий в селекционной практике для ряда культур было и остается ограниченным из-за низкой и непредсказуемой эффективности, которая сильно зависит от множества факторов [2-7]. Одним из главных препятствий является генотип-зависимость отзывчивости культур к технологии: некоторые сорта или генотипы демонстрируют высокую чувствительность к стрессовым индукторам и легко образуют эмбриониды, в то время как другие практически не реагируют на стандартные протоколы. Эта вариабельность затрудняет разработку универсального протокола и требует тщательной оптимизации условий для каждого отдельного генотипа. Другими критически важными факторами, влияющими на успех, являются стадия развития микроспор, условия подготовки исходного материала, состав питательных сред, температурный режим, плотность клеток в культуре и пр. [8-14].

Эффективное получение удвоенных гаплоидов у капустных культур требует не только высокой урожайности эмбрионидов, но и их успешной регенерации в целые растения. Одним из ключевых факторов, определяющих общий выход эмбрионидов и их морфологическое качество, является режим культивирования микроспор на этапе индукции эмбриогенеза и созревания эмбриогенных структур.

В частности, использование ротационного шейкера вместо стационарных условий стало важным усовершенствованием протоколов культуры микроспор. Исследования на пак-чой (*Brassica rapa* ssp. *chinensis*) показали, что культивирование микроспор при умеренном встряхивании повышает урожайность эмбрионидов, ускоряет их морфогенез на несколько дней и увеличивает долю нормальных семядольных эмбрионидов снижая частоту аномальных форм [15]. Положительный эффект шейкера связывают с улучшением вентиляции и аэрации, интенсификацией дыхания клеток, равномерным перемешиванием компонентов среды и ускоренным поглощением питательных веществ эмбриоидами [16].

Остановка в развитии и деформация некоторых эмбрионов в культурах могут быть вызваны накоплением ингибиторов в питательной среде [18,19]. Аэрация за счёт встряхивания культуры микроспор различных видов *Brassica* может способствовать удалению ингибиторов, которые накапливаются в питательной среде [20].

Исследования накопления токсичных веществ, выделяемых в питательную среду *B. napus*, показали, что старые микроспоры, которые не развиваются в эмбриониды, выделяют антиэмбриогенные вещества, которые подавляют индукцию и заметно снижают рост и развитие существующих эмбрионов [18]. В культуре микроспор для перехода с гаметофитного на спорофитный путь развития используют-

ся различные стрессовые воздействия, такие как повышенные и пониженные температуры, которые приводят к повышенной выработке активных форм кислорода (АФК) и оксида азота (NO). Исследования указывают на тесную связь между выработкой АФК и аутофагией, естественным процессом деградации и переработки клеточных компонентов у растений [21]. В исследовании по изучению АФК на развитие эмбрионидов в культуре изолированных микроспор *B. napus* Rueda-Varela [22] в методике также упоминается использование платформы-шейкера.

Наряду с условиями индукции, успешность регенерации эмбрионидов в полноценные растения в высокой степени зависит от их физиологической зрелости и морфологической стадии развития на момент переноса на среду прорастания. Классическая работа Kott и Beversdorf [23] на *Brassica napus* выявила чёткую зависимость: эмбриониды пересаженные на твердую среду на 35-й день культивирования прорастали в несколько раз лучше, чем эмбриониды пересаженные на 21-й день или 49-й день культивирования. Это указывает на существование «временного окна», соответствующего оптимальной физиологической готовности эмбрионидов к прорастанию.

Этот феномен подтверждается и на уровне морфологии. В исследовании на *Brassica nigra* было показано, что эмбриониды на ранней семядольной стадии развития (early cotyledonary) регенерируют значительно эффективнее, чем более зрелые семядольные эмбриониды [24].

Консервативность этой закономерности подтверждается и у злаков. Например, у пшеницы, было показано, что регенерационный потенциал тесно связан с возрастом и размером эмбрионидов. Крупные эмбриониды, перенесенные на регенерационную среду в оптимальный временной интервал, демонстрируют максимальную частоту образования зеленых растений и минимальный уровень альбинизма [25, 26].

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый для модельных видов и отдельных сортов, капуста белокочанная (*Brassica oleracea* var. *capitata*) остается культурой, для которой надежные и высокоэффективные протоколы культуры микроспор требуют дальнейшей разработки. Комплексное изучение ключевых факторов, таких как физические условия культивирования (встряхивание) и стадия развития эмбрионидов на урожайность эмбрионидов и успешность регенерации соответственно в контексте данной культуры, является актуальной научной задачей.

Результаты этого исследования могут способствовать разработке более эффективных, стандартизированных и воспроизводимых протоколов микроспорового окультуривания для белокочанной капусты. Это, в свою очередь, окажет прямое практическое воздействие на селекционные программы, позволяя сократить сроки получения гомозиготных линий и повысить выход ценного, генетически стабильного материала, а также позволит внести вклад в понимание физиологических основ индукции эмбриогенеза.

Материалы и методы

Материал исследования и условия выращивания донорных растений. В работе использованы 3 сортаобразца капусты белокочанной из коллекции агрофирмы "Поиск": № 2502, 2503, 2504. Донорные растения выращивали в условиях закрытого грунта.

Исследование влияния режима культивирования микроспор на урожайность эмбрионидов. Микроспоры

изолировали из бутонов размером 4,5-5,2 мм. из расчета 5 бутонов на 1 чашку Петри согласно протоколу, разработанному в лаборатории биотехнологии ФГБНУ ФНЦО для культуры микроспор семейства Brassicaceae [27].

Температурная обработка 32°C в течение 24 часов в темноте сразу после введения микроспор в культуру *in vitro* в термостате проходила в стационарном состоянии. Затем культивируемые чашки Петри были помещены в условия термостата при 25°C в темноте на платформу-шейкер (40-50 об/мин) и без (стационарно). Урожайность и морфологию эмбриоидов оценивали на 30-е сутки культивирования микроспор. Опыты были проведены в 3-х кратной биологической и 3-х кратной технической повторностях.

Исследование влияния морфологии и стадии развития эмбриоидов на эффективность регенерации. После 30-ти суток культивирования микроспор эмбриоиды пересаживали на твердую без гормональную среду для регенерации МС с 2% сахарозы и 7,0 г/л агар, pH 5.8 [28]. Эмбриоиды пересаживали на всех стадиях развития, от глобулярной стадии до семядольной стадии развития. Культивирование проводили на стеллажах с люминесцентными лампами, с фотопериодом 14 ч, освещенностью 2500 люкс, постоянной температурой 25°C.

Оценку регенерационной способности проводили спустя 3 месяца с момента пересадки эмбриоидов на твердую питательную среду. Если растение к моменту оценки было успешно укоренено в условиях *in vitro*, то регенерацию считали успешной, во всех других случаях регенерацию считали не успешной. Опыты были проведены в 3-х кратной биологической и 3-х кратной технической повторностях.

Статистический анализ. Статистический анализ данных проводили в программе Statistica v 6.0. Проводили однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), после чего данный подвергались тесту Дункана на уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты

Исследование влияния режима культивирования микроспор на урожайность эмбриоидов

Исследование показало, что эффективность эмбриогенеза микроспор у капусты белокочанной (*Brassica oleracea* L. convar. *capitata* var. *alba*) в значительной степени зависит как от генотипа, так и от способа культивирования микроспор – в стационарных условиях (без платформы-шейкера, «б/ш») или на платформе-шейкере («ш»). Анализ количества и популяционного состава полученных эмбриоидов выявил выраженные различия между условиями индукции и генотипами (табл. 1).

Наиболее высокая частота образования эмбриоидов на семядольной стадии, являющейся маркером зрелых и потенциально регенерирующих структур, наблюдалась у генотипа 2502 при культивировании на платформе-шейкере: $81,7 \pm 13,5\%$ от общего количества эмбриоидов ($24,0 \pm 5,3$ шт. на чашку Петри), что статистически значимо превышало показатель в стационарных условиях ($37,6 \pm 5,5\%$, $p < 0,05$). При этом в условиях культивирования на платформе-шейкере у генотипа 2502 наблюдалось почти полное отсутствие аномальных эмбриоидов ($1,8 \pm 3,1\%$ против $31,8 \pm 15,7\%$ в стационарных условиях), что свидетельствует о более высокой морфогенетической стабильности процесса эмбриогенеза.

У генотипа 2503 также зафиксировано достоверное увеличение доли нормальных эмбриоидов на семядольной стадии при культивировании на шейкере ($71,0 \pm 7,8\%$) по сравнению со стационарными условиями ($13,9 \pm 12,7\%$). Примечательно, что в последнем случае преобладали аномальные формы ($42,5 \pm 6,6\%$), в то время как при использовании шейкера аномалии в развитии полностью отсутствовали.

Таблица 1. Популяционный состав стадий развития эмбриоидов на 30-е сутки культивирования у различных генотипов капусты белокочанной при различном режиме культивирования
Table 1. The population composition of embryoid developmental stages on day 30 of culture for different white cabbage genotypes under various culture conditions

Генотип	Условия культивирования	Количество эмбриоидов, % от общего числа				Всего эмбриоидов на чашку Петри, шт.
		на семядольной стадии развития	на торпедовидной стадии развития	на глобулярной стадии развития	аномальные	
2502	б/ш	$37,6 \pm 5,5$ b1/A2	$14,1 \pm 8,8$ a/B	$16,5 \pm 10,0$ a/B	$31,8 \pm 15,7$ a/A	$37,3 \pm 5,5$ a
	ш	$81,7 \pm 13,5$ a/A	$11,5 \pm 7,2$ a/B	$5,1 \pm 5,4$ a/B	$1,8 \pm 3,1$ a/B	$29,7 \pm 7,0$ a
2503	б/ш	$13,9 \pm 12,7$ b/B	$21,9 \pm 10,6$ a/B	$21,7 \pm 20,2$ a/AB	$42,5 \pm 6,6$ a/A	$8,0 \pm 2,0$ a
	ш	$71,0 \pm 7,8$ a/A	$21,1 \pm 8,7$ a/B	$7,9 \pm 6,9$ a/BC	$0,0 \pm 0,0$ a/C	$9,3 \pm 1,5$ a
2504	б/ш	$26,1 \pm 11,1$ b/A	$13,9 \pm 13,6$ a/A	$27,5 \pm 19,6$ a/A	$32,5 \pm 21,4$ a/A	$14,3 \pm 3,5$ a
	ш	$50,8 \pm 5,5$ a/A	$32,1 \pm 5,0$ a/B	$10,4 \pm 11,2$ a/C	$6,7 \pm 11,5$ a/C	$11,7 \pm 3,1$ a

Ш – культивирование микроспор с использованием платформы-шейкера, б/ш – культивирование микроспор без платформы-шейкера. В таблице представлены средние $\pm$ Sd. Варианты, отмеченные одной и той же строчной буквой (1) (сравнение процентной доли эмбриоидов внутри одной стадии развития и внутри одного генотипа при различных режимах культивирования), отмеченные одной и той же заглавной буквой (2) (сравнение процентной доли эмбриоидов на различных стадиях развития внутри одного генотипа и режима культивирования) не имеют значимых различий с вероятностью 95% согласно тесту Дункана.

Ш – microspore culture using a shaker platform; б/ш – microspore culture without a shaker platform. Data in the table are presented as mean $\pm$ SD. Means with the same lowercase letters (1) (comparing the percentage of embryoids within the same developmental stage and within the same genotype under different culture conditions) or with the same uppercase letters (2) (comparing the percentage of embryoids across different developmental stages within the same genotype and culture condition) do not differ significantly at the 95% confidence level according to Duncan's test.

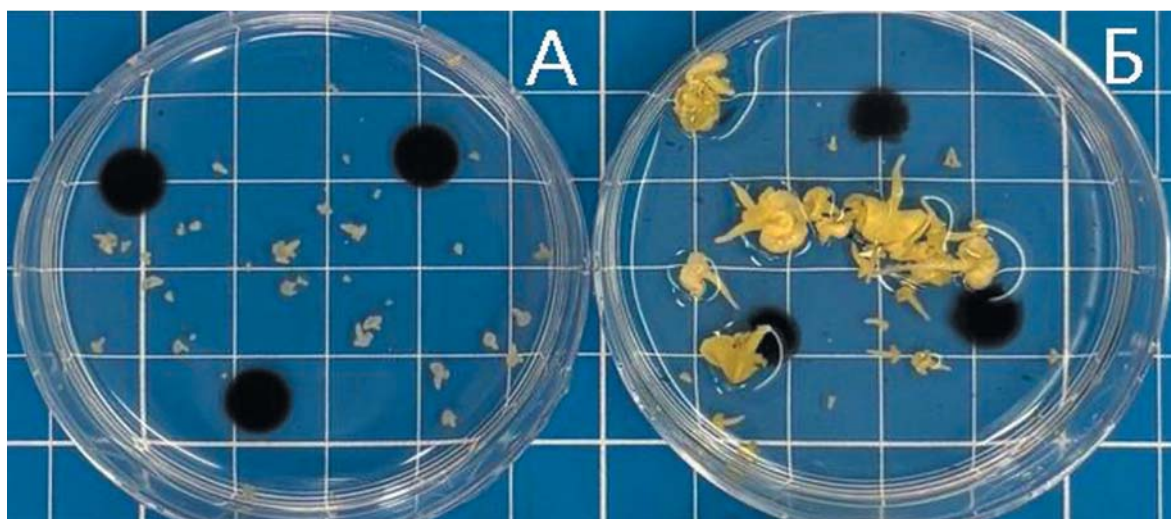


Рис. 1. Урожайность и морфологические особенности эмбриоидов капусты белокочанной № 2052 на 30-е сутки при различных режимах культивирования. А - культивирование в стационарном состоянии без платформы шейкера, Б - культивирование с использованием платформы-шейкера
Fig. 1. Yield and morphological characteristics of white cabbage (genotype No. 2052) embryooids on day 30 under different culture conditions. А – static culture without a shaker platform; Б – culture using a shaker platform

Генотип 2504 продемонстрировал умеренный, но статистически значимый положительный эффект от культивирования на платформа-шейкере: доля эмбриоидов на семядольной стадии развития увеличилась с $26,1 \pm 11,1\%$ (б/ш) до $50,8 \pm 5,5\%$ (ш), а частота аномальных форм снизилась с $32,5 \pm 21,4\%$ до $6,7 \pm 11,5\%$. Кроме того, в условиях шейкера у этого генотипа наблюдался рост доли эмбриоидов на торпедовидной стадии (с $13,9\%$ до $32,1\%$), что может указывать на ускорение морфогенеза под действием механического перемешивания среды.

Общее количество эмбриоидов на чашку Петри варьировалось незначительно между условиями культивирования внутри каждого генотипа, однако популяционное распре-

деление по стадиям развития эмбриоидов и частота аномалий существенно различались. В том числе стадии развития эмбриоидов различались в зависимости от режима культивирования (рис. 1). Эмбриоиды, сформировавшиеся в условиях стационарного культивирования были меньше и имели менее интенсивную окраску по сравнению с эмбриоидами, сформированными при использовании платформы-шейкера.

Таким образом, культивирование микроспор на платформа-шейкере способствовало не только повышению частоты формирования нормальных эмбриоидов на поздних стадиях развития (семядольной и торпедовидной), но и снижению доли аномальных структур во всех исследованных геноти-

Таблица 2. Доля эмбриоидов капусты белокочанной на различной стадии развития из которых были регенерированы растения
Table 2. The proportion of white cabbage embryos at different stages of development from which plants were successfully regenerated

Стадия развития	Доля эмбриоидов с успешной регенерацией, %	
	б/ш	ш
Семядольная	$15,7 \pm 8,6$ b	$36,5 \pm 7,6$ a
Торпедовидная	$16,1 \pm 0,9$ a	$26,9 \pm 20,5$ a
Глобулярная	$7,9 \pm 8,4$ a	$20,8 \pm 26,0$ a
Аномальные	$25,3 \pm 10,4$ a	$3,7 \pm 6,4$ b
Все стадии эмбриоидов	$19,2 \pm 2,8$ b	$30,5 \pm 5,4$ a

ш – культивирование микроспор с использованием платформы-шейкера, б/ш – культивирование микроспор без платформы-шейкера. В таблице представлены средние $\pm$ Sd. Варианты, отмеченные одной и той же строчной буквой (сравнение процентной доли эмбриоидов с успешной регенерацией внутри одной стадии развития при различных режимах культивирования), не имеют значимых различий с вероятностью 95% согласно тесту Дункана.

Ш – microspore culture using a shaker platform; б/ш – microspore culture without a shaker platform. Data in the table are presented as mean $\pm$ SD. Means sharing the same lowercase letter (comparing the percentage of embryooids with successful regeneration within the same developmental stage under different culture conditions) do not differ significantly at the 95% confidence level according to Duncan's test.

пах и более быстрому развитию эмбрионов в целом. Наибольший положительный эффект от использования шейкера был зафиксирован у наиболее отзывчивого генотипа (в частности, 2502), тогда как у менее отзывчивого генотипа (например, 2503) эффект проявлялся в основном в улучшении качества, а не количества эмбрионов.

Исследование влияния морфологии и стадии развития эмбрионов на эффективность регенерации

В ходе исследования оценено влияние стадии развития эмбрионов капусты белокочанной (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) на эффективность регенерации полноценных растений, а также влияние условий культивирования микроспор — с использованием платформы-шейкера (Ш) и без неё (б/ш).

В результате анализа было показано, что между генотипами не было статистически значимых различий в доле успешно регенерированных эмбрионов в зависимости от их стадии развития (данные не показаны), когда как в зависимости от режима культивирования различия наблюдались. Ввиду этого для более достоверной статистической выборки было принято решение объединить результаты оценки доли успешно регенерируемых эмбрионов в зависимости от стадии развития эмбрионов у различных генотипов, результаты представлены в таблице 2.

Как следует из данных таблицы 2, общая доля эмбрионов, из которых были успешно регенерированы растения, составила $30,5 \pm 5,4\%$ при культивировании на платформе-шейкере и $19,2 \pm 2,8\%$ — при культивировании в статических условиях. Различия между этими значениями статистически значимы согласно тесту Дункана ($p < 0,05$), что свидетельствует о необходимости использования шейкера для повышения эффективности последующей регенерации эмбрионов.

Анализ по стадиям развития эмбрионов выявил следующие закономерности. Наиболее высокая регенерационная способность наблюдалась у эмбрионов на семядольной стадии развития при культивировании на платформе-шейкере — доля успешно регенерировавших эмбрионов составила $36,5 \pm 7,6\%$, что статистически значимо превышало показатель успешной регенерации эмбрионов такой же стадии развития, полученных в статических условиях ($15,7 \pm 8,6\%$). Для торпедовидных и глобулярных эмбрионов различия в доле успешно регенерируемых из них не оказались статистически значимыми ($p > 0,05$) при различных режимах культивирования: в обеих группах эффективность регенерации оставалась сопоставимой и высоко вариабельной (особенно для торпедовидной стадии в условиях шейкера — $26,9 \pm 20,5\%$, и глобулярной — $20,8 \pm 26,0\%$).

Интересную тенденцию продемонстрировали аномальные эмбрионы: при статическом культивировании они показали относительно высокую регенерационную способность ($25,3 \pm 10,4\%$), в то время как при использовании шейкера доля эмбрионов способных к регенерации резко снизилась до $3,7 \pm 6,4\%$ (различия значимы, $p < 0,05$).

Обсуждение

Полученные в настоящем исследовании результаты подтверждают, что эффективность получения удвоенных гаплоидов у белокочанной капусты (*Brassica oleracea* var. *capitata*) в значительной степени определяется как генотипическими особенностями донорных растений, так и условиями культивирования микроспор *in vitro*. Прежде всего,

подтверждается ключевая роль режима культивирования — в частности, использование платформы-шейкера — как важного фактора, способного не только повысить урожайность эмбрионов, но и улучшить их морфологическое качество и последующую регенерационную способность.

Наблюдаемое во всех трёх генотипах повышение доли эмбрионов на поздних (семядольной и торпедовидной) стадиях развития при культивировании с использованием шейкера согласуется с данными, полученными ранее на других видах *Brassica*, таких как *B. rapa* ssp. *chinensis* [15] и *B. napus* [22]. Эти результаты указывают на универсальность положительного эффекта механического перемешивания среды при индукции микроспорового эмбриогенеза у капустных. Улучшение аэрации, равномерное распределение питательных веществ и, возможно, снижение концентрации ингибиторов, выделяемых незембрионными микроспорами [18, 20], вероятно, способствуют более устойчивому и скоординированному развитию эмбрионов. Снижение доли аномальных форм в условиях шейкера — особенно ярко выраженное у генотипов 2502 и 2503 — дополнительно подтверждает гипотезу о том, что накопление токсичных метаболитов в стационарных условиях подавляет нормальный ход эмбриогенеза и способствует возникновению морфологических aberrаций.

Важно отметить, что генотипическая вариабельность в ответ на один и тот же протокол сохраняется, несмотря на оптимизацию условий. Генотип 2502 продемонстрировал максимальную отзывчивость как по количеству, так и по качеству эмбрионов, тогда как генотип 2503 оставался относительно малоотзывчивым даже при использовании шейкера. Это согласуется с общеизвестной проблемой генотип-зависимости в технологиях ДН и подчеркивает необходимость индивидуального подхода при разработке протоколов для конкретных генотипов. Тем не менее, даже у «трудных» генотипов, таких как 2503, использование шейкера позволило значительно повысить долю нормальных эмбрионов, что делает эту модификацию протокола ценной с практической точки зрения.

Что касается регенерационного потенциала, то наши данные подтверждают существенную роль стадии развития эмбрионов в успешной регенерации. Наиболее высокая эффективность регенерации наблюдалась у эмбрионов на семядольной стадии, полученных в условиях шейкера ($36,5\%$), что статистически значимо превышало аналогичный показатель для стационарных условий. Это согласуется с работами Kott & Beversdorf [23] и Gu и др. [24], указывающими на критическую роль физиологической зрелости эмбрионов для успешного перехода к дальнейшей регенерации с органогенезом. Интересно, что аномальные эмбрионы, полученные в стационарных условиях, демонстрировали относительно высокий уровень регенерации ($25,3\%$), тогда как в условиях шейкера их регенерационный потенциал падал почти до нуля. Это может свидетельствовать о том, что в стационарных условиях часть «аномальных» структур на самом деле представляет собой эмбрионы с «задержанным» развитием или искажённой морфологией ввиду режима культивирования, но сохраняющие жизнеспособность и высокий регенерационный потенциал, тогда как в условиях улучшенной среды такие формы за счет лучшей аэрации и снижения токсической нагрузки при культивировании на платформе-шейкере смогли бы развиваться в эмбрионы семядольной стадии развития с нормальной морфологией.

Таким образом, культивирование микроспор на платформе-шейкере оказывает комплексное положительное влияние на весь процесс получения ДН-линий у белокочанной капусты: ускоряет морфогенез эмбриоидов, способствуя переходу к поздним (семядольным) стадиям; снижает частоту аномалий за счёт улучшения микросреды; повышает общую регенерационную способность, особенно у эмбриоидов оптимальной морфологической стадии.

Эти результаты представляют собой важный шаг в направлении стандартизации и повышения воспроизводимости протоколов культуры микроспор для белокочанной капусты. Разработка надёжных и эффективных методов *in vitro*-эмбриогенеза для этой культуры напрямую способствует ускорению селекционных программ, сокращению времени вывода новых гибридов и расширению генетического разнообразия селекционного материала.

В дальнейшем перспективным направлением исследований может стать изучение молекулярно-физиологических механизмов, лежащих в основе положительного эффекта шейкера – в частности, роль окислительного стресса, аутофагии и метаболического переустройства клеток в условиях улучшенной аэрации. Также целесообразно провести более детальный анализ связи между структурой эмбриоидов, их транскриптомным и метаболическим профилем и регенерационным потенциалом.

Заключение

В настоящей работе продемонстрировано, что использование платформы-шейкера при культивировании микроспор белокочанной капусты значительно повышает эффективность получения удвоенных гаплоидов за счёт улучшения морфологического качества эмбриоидов и увеличения их регенерационного потенциала. Показано, что культивирование с умеренным перемешиванием способствует преобладанию нормальных эмбриоидов на семядольной стадии развития и резко снижает долю аномальных форм во всех исследованных генотипах. Наибольший положительный эффект наблюдается у наиболее отзывчивого генотипа, однако даже у малореактивных линий использование шейкера позволяет получить более качественный эмбриогенный материал. Кроме того, подтверждена критическая роль стадии развития эмбриоида для успешной регенерации: максимальная эффективность достигается при переносе семядольных эмбриоидов, полученных в условиях шейкера. Полученные результаты вносят существенный вклад в оптимизацию протоколов микроспорной культуры для белокочанной капусты и открывают возможности для повышения воспроизводимости и практической применимости ДН-технологий в селекции этой важной овощной культуры.

• Литература / References

1. Mineykina A., Bondareva L., Soldatenko A., Domblides E. Androgenesis of red cabbage in isolated microspore culture *in vitro*. *Plants*. 2021;10(9). <https://doi.org/10.3390/plants10091950>
2. Kozar E., Domblides E. Protocol of European radish (*Raphanus sativus* L.) microspore culture for doubled haploid plant production. *In: Methods Mol Biol*. 2021;2288:217-232. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1335-1_13
3. Kozar E.V., Domblides E.A., Soldatenko A.V. Embryogenesis of european radish (*Raphanus sativus* L. subsp. *sativus* convar. *radicula*) in culture of isolated microspores *in vitro*. *Plants*. 2021;10(10). <https://doi.org/10.3390/plants10102117>
4. Kozar E.V., Domblides E.A., Soldatenko A.V. Factors affecting DH plants *in vitro* production from microspores of European radish. *Vavilov J Genet Breed*. 2020;24(1):31-39. <https://doi.org/10.18699/VJ20.592> <https://www.elibrary.ru/srrwyq>
5. Kozar E.V., Korotseva K.S., Romanova O.V., Chichvarina O.A., Kan L.Yu., Ahramenko V.A., Domblides E.A. Production of doubled haploids in *Brassica purpuraria*. *Vegetable crops of Russia*. 2019;(6):10-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-10-18> <https://www.elibrary.ru/udnnot>
6. Kozar E.V., Kozar E.G., Domblides E.A. Effect of the method of microspore isolation on the efficiency of isolated microspore culture *in vitro* for Brassicaceae family. *Horticulturae*. 2022;8(10):864. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100864>
7. Kozar E.V., Kozar E.G., Soldatenko A.V., Domblides E.A. Rooting technique of double haploids obtained in culture of microspore *in vitro* for European radish. *Vegetable crops of Russia*. 2020;(5):3-15. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-5-3-15> <https://www.elibrary.ru/dsqppo>
8. Custers J.B.M. Microspore culture in rapeseed (*Brassica napus* L.). In: Maluszynski M., Kasha K.J., Forster B.P., Szarejko I., editors. *Doubled Haploid Production in Crop Plants*. 2003. P. 185-186. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1293-4_29
9. da Silva Dias J.C. Protocol for broccoli microspore culture. In: Maluszynski M., Kasha K.J., Forster B.P., Szarejko I., editors. *Doubled Haploid Production in Crop Plants*. 2003. P. 195-204. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1293-4_30
10. Ahmadi B., Ghadimzadeh M., Moghaddam A.F., Alizadeh K., Teixeira da Silva J.A. Bud length, plating density, and incubation time on microspore embryogenesis in *Brassica napus*. *Int J Veg Sci*. 2012;18(4):346-357. <https://doi.org/10.1080/19315260.2011.647265>
11. Domblides E.A., Kozar E.V., Shumilina D.V., Zayachkovskaya T.V., Akhramenko V.A., Soldatenko A.V. Embryogenesis in culture of isolated microspore of broccoli. *Vegetable crops of Russia*. 2018;(1):3-7. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-1-3-7> <https://www.elibrary.ru/xodpbb>
12. Kozar E.V., Domblides E.A. Protocol for obtaining doubled haploids in isolated microspore culture *in vitro* for poorly responsive genotypes of brassicaceae family. *Biol Methods Protoc*. 2024;9(1). <https://doi.org/10.1093/biomethods/bpae091>
13. Shumilina D., Kozar E., Chichvarina O., et al. *Brassica rapa* L. ssp. *chinensis* isolated microspore culture protocol. In: *Methods Mol Biol*. 2021;2288:145-162. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1335-1_9
14. Starosta E., Szwarc J., Niemann J., Szweczyk K., Weigt D. *Brassica napus* haploid and double haploid production and its latest applications. *Curr Issues Mol Biol*. 2023;45(5):4431-4450. <https://doi.org/10.3390/cimb45050282>
15. Yang S., Liu X., Fu Y., Zhang X., Li Y., Liu Z., Feng H. The effect of culture shaking on microspore embryogenesis and embryonic development in pakchoi (*Brassica rapa* L. ssp. *chinensis*). *Sci Hortic*. 2013;152:70-73. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.019>
16. He H.J., Wang X.W., Wang B.L. Embryogenesis and plant regeneration of Chinese kale via isolated microspore culture. *Acta Hortic Sin*. 2004;31(2):239-240.
17. Gland A., Lichter R., Schweiger H.G. Genetic and exogenous factors affecting embryogenesis in isolated microspore cultures of *Brassica napus* L. *J Plant Physiol*. 1988;132:613-617.

18. Kott L.S., Polsoni L. Autotoxicity in isolated microspore culture of *Brassica napus*. *Can J Bot.* 1988;66:1665-1670.
19. Hansen M, Svinnsset K. Micropore culture of Swede (*Brassica napus* ssp. *rapifera*) and the effects of fresh and conditioned media. *Plant Cell Rep.* 1993;12:496-500.
20. Lichter R. Efficient yield of embryoids by culture of isolated microspores of different Brassicaceae species. *Plant Breed.* 1989;103:119-123.
21. Pérez-Pérez M.E., Lemaire S.D., Crespo J.L. The ATG4 protease integrates redox and stress signals to regulate autophagy. *J Exp Bot.* 2021;72:3340-3351. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab063>
22. Rueda-Varela C., Carneros E., et al. Enhancing microspore embryogenesis initiation by reducing ROS, autophagy, and cell death with novel small molecules in rapeseed and barley. *J Plant Physiol.* 2025;311:8. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2025.154546>
23. Kott L.S., Beversdorf W.D. Enhanced plant regeneration from microspore-derived embryos of *Brassica napus* by chilling, partial desiccation and age selection. *Plant Cell Tiss Organ Cult.* 1990;23:187-192. <https://doi.org/10.1007/BF00034430>
24. Gu H., Sheng X., Zhao Z., et al. Initiation and development of microspore embryogenesis and plant regeneration of *Brassica nigra*. *In Vitro Cell Dev Biol Plant.* 2014;50:534-540. <https://doi.org/10.1007/s11627-014-9612-6>
25. Kunz C., Islam S.M.S., Berberat J., Peter S.O., Büter B., Stamp P., Schmid J.E. Assessment and improvement of wheat microspore derived embryo induction and regeneration. *J Plant Physiol.* 2000;156(2):190-196. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80305-3](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80305-3)
26. Islam S.M. Effect of embryoids age, size and shape for improvement of regeneration efficiency from microspore-derived embryos in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant OMICS.* 2010;3(5).
27. Domblides E.A., Shmykova N.A., Shumilina D.V., et al. Technology for obtaining doubled haploids in microspore culture of Brassicaceae family: guidelines. M., 2016. 40 p. ISBN 978-5-901695-71-5.
28. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plant.* 1962;15(3):473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>

Об авторах:

Елена Викторовна Козарь – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0001-5447-5341>, SPIN-код: 4950-0540, автор для переписки, koz.leno4ek@gmail.com

Анна Игоревна Минейкина – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0000-0001-9864-1137>, SPIN-код: 7179-7360, anna-batmanova@mail.ru

Татьяна Владимировна Заячковская – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0001-8435-8197>, SPIN-код: 8777-2919, taivka34@mail.ru

Сергей Николаевич Белов – кандидат с.-х. наук, младший научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-4387-9153>, SPIN-код: 2054-6579, belov.ser.nik@gmail.com

Юрий Владимирович Кулаков – младший научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-3718-3854>, SPIN-код: 1070-4035, ykulakov12@yandex.ru

Ольга Александровна Чичварина – младший научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0001-5297-2969>, SPIN-код: 1013-5493, chichvarina07@rambler.ru

Мария Григорьевна Фомичева – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-0281-0467>, SPIN-код: 3219-3462, maria.fomicheva.1@yandex.ru

Яна Петровна Тукусер – младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>, SPIN-код: 8520-1999, yana-tukuser@mail.ru

Ксения Станиславовна Стебницкая – младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0000-0002-2284-0532>, SPIN-код: 1152-1934, k-korottseva@yandex.ru

Татьяна Сергеевна Вюртц – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <http://orcid.org/0000-0003-3956-4172>, SPIN-код: 5482-3921, tajtza@yandex.ru

Дарья Дмитриевна Васильева – младший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и цитологии, <https://orcid.org/0009-0000-3965-9820>, vasiljeva206001@yandex.ru

Елена Алексеевна Домблидес – кандидат с.-х. наук, зав. лаборатории репродуктивной биотехнологии в селекции сельскохозяйственных растений, <https://orcid.org/0000-0002-2695-190X>, SPIN-код: 4733-7540, edomblides@mail.ru

About the Authors:

Elena V. Kozar – Cand. Sci. (Biology), Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0001-5447-5341>, SPIN-code: 4950-0540, Corresponding Author, koz.leno4ek@gmail.com

Anna I. Mineykina – Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0000-0001-9864-1137>, SPIN-code: 7179-7360 anna-batmanova@mail.ru

Tatyana V. Zayachkovskaya – Cand. Sci. (Agriculture), Resercher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0001-8435-8197>, SPIN-code: 8777-2919, taivka34@mail.ru

Sergey N. Belov – Cand. Sci. (Agriculture), Junior Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0002-4387-9153>, SPIN-code: 2054-6579, belov.ser.nik@gmail.com

Yuri V. Kulakov – Junior Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0002-3718-3854>, SPIN-code: 1070-4035, ykulakov12@yandex.ru

Olga A. Chichvarina – Junior Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0001-5297-2969>, SPIN-code: 1013-5493, chichvarina07@rambler.ru

Maria G. Fomicheva – Cand. Sci. (Biology), Researcher at the Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0002-0281-0467>, SPIN-code: 3219-3462, maria.fomicheva.1@yandex.ru

Yana P. Tukuser – Junior Researcher, Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>, SPIN-code: 8520-1999, yana-tukuser@mail.ru

Ksenia S. Stebnitskaya – Junior Researcher of Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0000-0002-2284-0532>, SPIN-code: 1152-1934, k-korottseva@yandex.ru

Tatyana S. Vjurtts – Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <http://orcid.org/0000-0003-3956-4172>, SPIN-code: 5482-3921, tajtza@yandex.ru

Daria D. Vasilieva – Junior Researcher of Laboratory of Molecular Genetics and Cytology, <https://orcid.org/0009-0000-3965-9820>, vasiljeva206001@yandex.ru

Elena A. Domblides – Cand. Sci. (Agriculture), Head of Laboratory of Reproductive Biotechnology in Crop Breeding, <https://orcid.org/0000-0002-2695-190X>, SPIN-code: 4733-7540, edomblides@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-41-48>
УДК: 633.18:581.192.7:573.6

Е.Г. Савенко*, В.А. Глазырина,
Л.А. Шундрин, Ж.М. Мухина, Л.В. Есаулова

Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение «ФНЦ риса»
350921, Россия, г. Краснодар, пос. Белозерный, 3

*Автор для переписки: avena5@rambler.ru

Финансирование. Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2025-574.

Вклад авторов: Савенко Е.Г., Глазырина В.А., Шундрин Л.А., Мухина Ж.М., Есаулова Л.В.: концептуализация, методология, проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, подготовка материалов, администрирование данных, создание рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Савенко Е.Г., Глазырина В.А., Шундрин Л.А., Мухина Ж.М., Есаулова Л.В. Влияние генотипа и регуляторов роста на эффективность индукции каллусогенеза и регенерации в культуре пыльников риса *in vitro*. *Овощи России*. 2025;(6):41-48. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-41-48>

Поступила в редакцию: 01.10.2025

Принята к печати: 18.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Elena G. Savenko*,
Valentina A. Glazyrina,
Ludmila A. Shundrina,
Zhanna M. Mukhina,
Lyubov V. Esaulova

Federal Scientific Rice Centre
3, Belozerny village, Krasnodar,
Russian Federation, 350921

*Corresponding Author: avena5@rambler.ru

Funding. The article was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. 075-15-2025-574.

Authors' Contribution: Savenko E.G., Glazyrina V.A., Shundrina L.A., Mukhina Zh.M., Esaulova L.V.: conceptualization, investigation, methodology, validation, formal analysis, writing – review & editing.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Savenko E.G., Glazyrina V.A., Shundrina L.A., Mukhina Zh.M., Esaulova L.V. Effect of genotype and growth regulators on the effectiveness of callusogenesis and regeneration in anther culture of rice *in vitro*. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):41-48. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-41-48>

Received: 22.10.2025

Accepted for publication: 18.11.2025

Published: 18.12.2025

Влияние генотипа и регуляторов роста на эффективность индукции каллусогенеза и регенерации в культуре пыльников риса *in vitro*

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Биотехнологический метод культуры пыльников позволяет за короткое время получать чистые линии и тем самым сокращать селекционный период. Реакция гибридов риса *Oryza sativa* L. на культуру пыльников генетически детерминирована и различается на разных этапах культивирования *in vitro*. Регуляторы роста ауксины и цитокинины являются факторами, индуцирующими соматический эмбриогенез. В связи с этим, наряду с подбором отзывчивых на культуру *in vitro* генотипов в индукционных средах необходимо использовать регуляторы роста растений, которые повышают индукцию эмбриогенеза и регенерацию растений при культивировании пыльников риса.

Цель исследования. Изучение влияния генотипа, регуляторов роста растений и дополнительного стимулятора нитрата серебра на индукцию каллусогенеза, эмбриогенеза и регенерацию зеленых растений в культуре пыльников *in vitro* гибридов риса и оптимизация их концентраций применительно к изучаемым генотипам.

Материал и методика. Исследования проводили в лаборатории биотехнологии и молекулярной биологии ФГБНУ «ФНЦ риса» по общепринятой методике *in vitro* Бутенко Р.Г. (1990). Материалом для исследования послужили гибриды риса F_{1.3} поколений.

Результаты исследований. Выявлено положительное влияние регуляторов роста растений 6-бензиламинопурина, α-нафтилуксусной кислоты, абсцизовой кислоты и дополнительного стимулятора нитрата серебра в индукции каллусной ткани и последующей регенерации для гибридов риса F_{1.3} поколений. Показано, что регуляторы роста всегда следует рассматривать во взаимосвязи с генотипом и в диапазоне концентраций 6-БАП – 2,0 и 4,0 мг/л; α-НУК – 1,0-2,0 мг/л; АБК – 1,0 и 2,0 мг/л и AgNO₃ – 2,0 и 4,0 мг/л.

Заключение. Для ускоренного создания гомозиготных селекционных ресурсов риса посредством гаметных технологий подобраны эффективные концентрации ауксинов, цитокининов и дополнительного стимулятора роста нитрата серебра. У исследуемых образцов по морфологическим признакам выделено 4 типа каллусных тканей. Выделены генотипы F₃ Вита/Южная ночь, F₃ Славянец/Австрал, F₃ Вита/Снежинка как наиболее отзывчивые к культуре пыльников *in vitro* с формированием эмбриогенных или морфогенных тканей (каллусов), клетки которых обладают способностью к вторичной дифференцировке с возникновением организованных структур *de novo*, как следствие, с наибольшей степенью регенерации при оптимальных концентрациях используемых регуляторов роста и стимулирующих веществ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

рис, *Oryza sativa* L., культура пыльников *in vitro*, фитогормоны, каллусогенез, регенерация

Effect of genotype and growth regulators on the effectiveness of callusogenesis and regeneration in anther culture of rice *in vitro*

ABSTRACT

Relevance. The biotechnological method of the anther culture *in vitro* allows to obtain pure lines in a short time and thereby to reduce the selection period. The response of the rice hybrids *Oryza sativa* L. to the anther culture is genetically determined and differs at different stages of *in vitro* cultivation. The growth regulators auxins and cytokinins are the factors inducing somatic embryogenesis. In this regard, in addition to selecting genotypes that respond well to *in vitro* culture, it is necessary to use plant growth regulators that increase the induction of embryoidogenesis and plant regeneration during the cultivation of rice anthers.

The aim of the study. To study the effect of genotype, plant growth regulators and additional stimulator AgNO₃ on the induction of callusogenesis, embryoidogenesis and regeneration of green rice plants in the culture of anthers *in vitro* of rice hybrids and to optimize their concentrations in relation to the studied genotypes.

Methodology. The studies were carried out in the laboratory of biotechnology and molecular biology of the "FSC of rice" according to the generally accepted *in vitro* method of Butenko R.G. (1990). The study used F_{1.3} rice hybrids.

Conclusion. A statistically significant effect of the interaction between genotype, concentration, and type of plant hormones in the *in vitro* culture of rice anthers was revealed. It was found that the response of genotypes to successful shoot regeneration under *in vitro* conditions is determined by the combination and concentrations of exogenous and endogenous hormones, and differences in shoot regeneration among different genotypes under different hormone concentrations and additives may be related to the quality of the callus. Effective concentrations of auxins, cytokinins, and an additional growth stimulant were selected to accelerate the selection process.

KEYWORDS:

rice, *Oryza sativa* L., *in vitro* pollen culture, phytohormones, callusogenesis, and regeneration



Введение

Методы культивирования растительных тканей представляют собой перспективный и реальный подход к ускоренному выведению сортов у различных видов растений. Эффективная регенерация растений у риса, как и у других злаковых культур в большой степени зависит от генотипа, состава питательной среды, условий культивирования и регуляторов роста растений [1]. Ауксины и цитокинины, являются факторами, индуцирующими соматический эмбриогенез [2-5]. Чтобы повысить результативность культуры пыльников/микроспор, необходимо создавать максимально благоприятные условия для уменьшения физиологических ограничений [6]. Генотип, стадия развития микроспор и химические вещества оказывают влияние на эффективность эмбриогенеза, и как следствие, на регенерацию растений у зерновых культур [7]. В связи с этим, в индукционных средах необходимо использовать регуляторы роста растений, которые повышают индукцию эмбриогенеза в культуре пыльников риса, пшеницы и ячменя [8-10]. Однако даже для представителей одного вида растений необходим индивидуальный подбор вида и концентраций фитогормонов, т.к. точно установленные комбинации и параметры показателей экзогенных гормонов влияют на путь развития пыльцы и частоту индукции каллуса [11]. Так, в исследованиях Belay Anelay и соавторов (2024) среда MS с добавлением 2,0 мг/л 6-БАП и 0,5 мг/л α -НУК показала наибольшую эффективность регенерации побегов у каллусов местной сафлоры, тогда как у туркменского генотипа сафлоры отмечен низкий регенерационный потенциал и, как следствие, слабая эффективность побегообразования [12]. Некоторые неорганические соединения снижают или предотвращают накопление фенольных соединений и их токсическое воздействие в культуре *in vitro*. Так, например, использование нитрата серебра, снижает накопление фенолов, что положительно влияет на андрогенетические реакции. При культивировании каллусных тканей на питательных средах в условиях *in vitro* индукция регенерации побегов также снижается за счет негативного влияния газообразного растительного гормона этилена. Исследования Cristea и соавторов (2012) показали, что введением нитрата серебра можно регулировать выработку или интенсивность влияния этилена в условиях *in vitro*, что благоприятно сказывается на морфогенетических потенциях [13-15].

Целью данного исследования было изучение влияния генотипа, регуляторов роста растений и дополнительного стимулятора AgNO_3 на индукцию каллусогенеза, эмбриогенеза и регенерацию зелёных растений риса в культуре пыльников *in vitro* гибридов риса и оптимизация их концентраций применительно к изучаемым генотипам.

in vitro гибридов риса и оптимизация их концентраций применительно к изучаемым генотипам.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили гибриды риса F_{1-3} поколений, полученные от скрещивания контрастных по содержанию амилозы, форме и размеру зерновки, окраске перикарпа сортов подвидов japonica/japonica japonica/indica. Исследования проводили по общепринятой методике *in vitro* (Бутенко Р.Г., 1990) [16]. В полнокомпонентную агаризованную питательную среду Blaydes (1966) обогащенную 0,5 мг/л 2,4-Дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-Д) добавляли фитогормоны и дополнительный стимулятор роста в концентрациях: 6-бензиламинопурина (6-БАП) – 2,0; 4,0 и 6,0 мг/л; α -Нафталинуксусная кислота (α -НУК) – 1,0 и 2,0 мг/л; абсцизовая кислота (АБК) – 1,0 и 2,0 мг/л; нитрат серебра (AgNO_3) – 2,0; 4,0 и 6,0 мг/л. Контролем послужила среда Blaydes + 2,0 мг 2,4-Д. Морфогенные каллусы для регенерации пересаживали на среду Murashige and Scoogy (MS) (1962) дополненную 1,0 мг/л α -НУК и 5,0 мг/л кинетина. Достоверность влияния факторов оценивали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа Microsoft Excel. Учет качества и количества каллусов велся по каждому образцу. Частоту образования каллуса определяли по формуле: $\text{ЧК \%} = (\text{Общее количество индуцированных каллусов} / \text{общее количество культивируемых пыльников}) \times 100\%$. На каждый вариант среды инокулировали по 300 пыльников в 3-х кратной повторности. Частота дифференциации (в процентах) определялась как количество зелёных проростков на 100 штук каллуса.

Результаты

Анализ результатов выявил благоприятное влияние 6-БАП на каллусогенез и регенерацию у изучаемых гибридов. Положительный эффект в индукции эмбриогенного каллуса и регенерации растений для гибридов достигнут при использовании концентраций 2,0 и 4,0 мг/л 6-БАП.

При анализе полученных данных по каллусогенезу при использовании 2,0 мг/л и 4,0 мг/л для изучаемых комбинаций статистических различий не выявлено. У гибрида F_3 Вита/Южная ночь для регенерации концентрация 2,0 мг/л 6-БАП была предпочтительнее. Достоверно низкие показатели индукции каллуса и регенерации для обеих комбинаций отмечены в контрольном варианте и при увеличении концентрации гормона до 6,0 мг/л (табл. 1).

Таблица 1. Индукция каллусообразования и регенерация в культуре пыльников риса *in vitro* при использовании 6-БАП
Table 1. Induction of callus formation and regeneration in rice anther culture *in vitro* using 6-BAP

Гибрид	6 - БАП, мг/л	Каллусогенез, %	Регенерация, %
F_2 Анита 22/Августин	0	20,5 $\pm$ 2,33	0,5 $\pm$ 0,32
	2,0	2,1 $\pm$ 4,16*	3,2 $\pm$ 0,41
	4,0	28,2 $\pm$ 4,08*	1,9 $\pm$ 0,69
	6,0	16,5 $\pm$ 2,36	0,4 $\pm$ 0,32
F_3 Вита/Южная ночь	0	17,2 $\pm$ 3,11	3,0 $\pm$ 1,78
	2,0	30,9 $\pm$ 5,97**	11,9 $\pm$ 2,35
	4,0	24,6 $\pm$ 6,01**	4,9 $\pm$ 1,99
	6,0	10,7 $\pm$ 3,99	2,4 $\pm$ 1,48

Примечание: * и ** - варианты не различаются между собой

При изучении влияния α -НУК на каллусогенез, эмбриогенез и регенерацию выявлено, что для эффективной стимуляции новообразований при работе с большинством генотипов риса рекомендуемая концентрация α -НУК 2,0 мг/л. Максимальные показатели каллусогенеза получены при этой концентрации для генотипов F₃ Южная ночь/ Виола (21,1%), F₃ Вита/Южная ночь (33,6%), F₃ Вита/Титан (21,4%). Образец F₂ Анита 22/Августин проявил высокую реакцию к андрогенезу при культивировании пыльников на средах, содержащих α -НУК в концентрации 1,0 мг/л и 2,0 мг/л (30,4% и 27,1% соответственно). Но на средах с содержанием α -НУК в концентрации 1,0 мг/л она была достоверно выше (НСР₀₅=1,20) (табл. 2).

Однако дисперсионный анализ выявил, что для большинства генотипов выход морфогенного каллуса с последующей

регенерацией растений был либо выше при применении 1,0 мг/л нафтилуксусной кислоты, либо не было существенной разницы от увеличения концентрации от 1,0 до 2,0 мг/л (НСР₀₅=0,80).

Более высокие концентрации гормона влияли на тип каллуса и, как следствие, на его качество (рис. 4). Исключение составил гибрид F₃ Южная ночь/Снежинка, каллусогенез и регенерация у которого повышались при применении 2,0 мг/л α -НУК – 15,1% и 5,9% соответственно (табл. 2).

На примере 9 гибридов F₁₋₃ риса показаны андрогенные реакции генотипов в зависимости от концентраций АБК. Максимальное количество пыльников, индуцирующих новообразования, наблюдалось при использовании АБК в концентрации 1,0 мг/л.

Таблица 2. Влияние α -НУК на каллусогенез и регенерацию гибридов риса в культуре пыльников *in vitro*
Table 2. Effect of α -NUC on callusogenesis and regeneration of rice hybrids in anther culture *in vitro*

Гибрид F ₁	α -НУК, мг/л	Каллусогенез, %	Регенерация, %
F ₂ Анита 22/Августин	0	20,1	1,4
	1,0	30,4	3,4
	2,0	27,1	2,7
F ₃ Южная ночь/Снежинка	0	4,8	1,7
	1,0	7,2	3,6
	2,0	15,1	5,9
F ₃ Южная ночь/ Вита	0	6,6	2,0
	1,0	9,2	2,6
	2,0	12,4	2,9
F ₃ Южная ночь/ Виола	0	15,0	1,5
	1,0	19,3	3,0
	2,0	21,1	2,7
F ₃ Вита/Южная ночь	0	20,1	6,9
	1,0	25,5	18,0
	2,0	33,6	14,9
F ₃ Вита/Снежинка	0	12,9	3,0
	1,0	16,4	5,1
	2,0	19,0	4,8
F ₃ Славянец/Австрал	0	6,1	2,0
	1,0	7,6	4,1
	2,0	16,2	4,2
F ₃ Вита/Титан	0	16,1	4,0
	1,0	19,9	4,9
	2,0	21,4	4,4
F ₃ Южная ночь/Австрал	0	8,1	2,6
	1,0	8,9	2,6
	2,0	9,9	3,1
НСР ₀₅		1,20	0,80

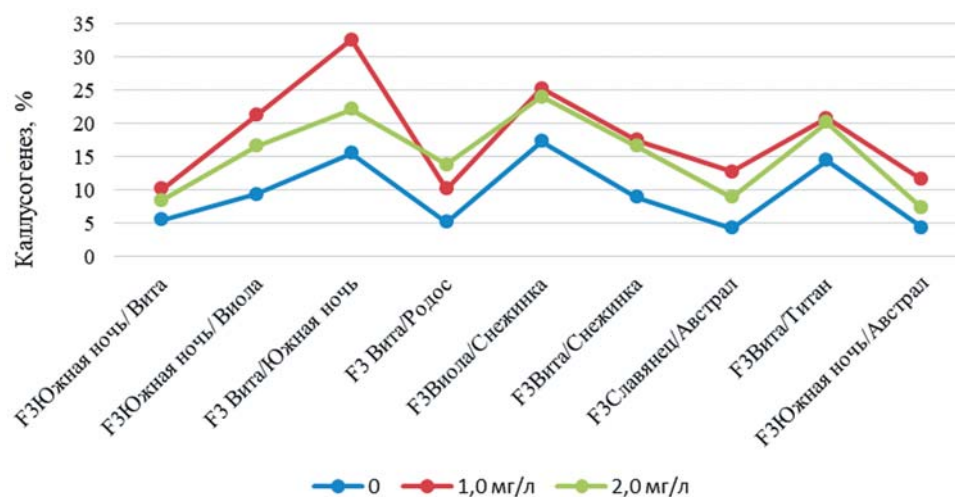


Рис. 1. Влияние различных концентраций АБК на каллусогенез в культуре пыльников гибридных комбинаций риса *in vitro*
 Fig. 1. Effect of different concentrations of ABA on callus formation in the anther culture of hybrid rice combinations *in vitro*

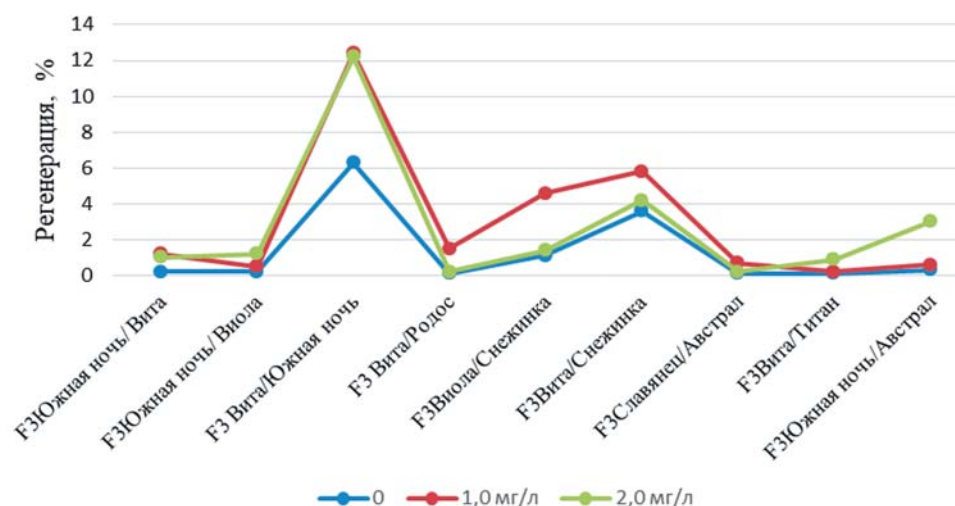


Рис. 2. Регенерация растений гибридных комбинаций риса в культуре пыльников *in vitro* под влиянием различных концентраций АБК
 Fig. 2. Regeneration of rice hybrid combinations in anther culture *in vitro* under the influence of various concentrations of ABA

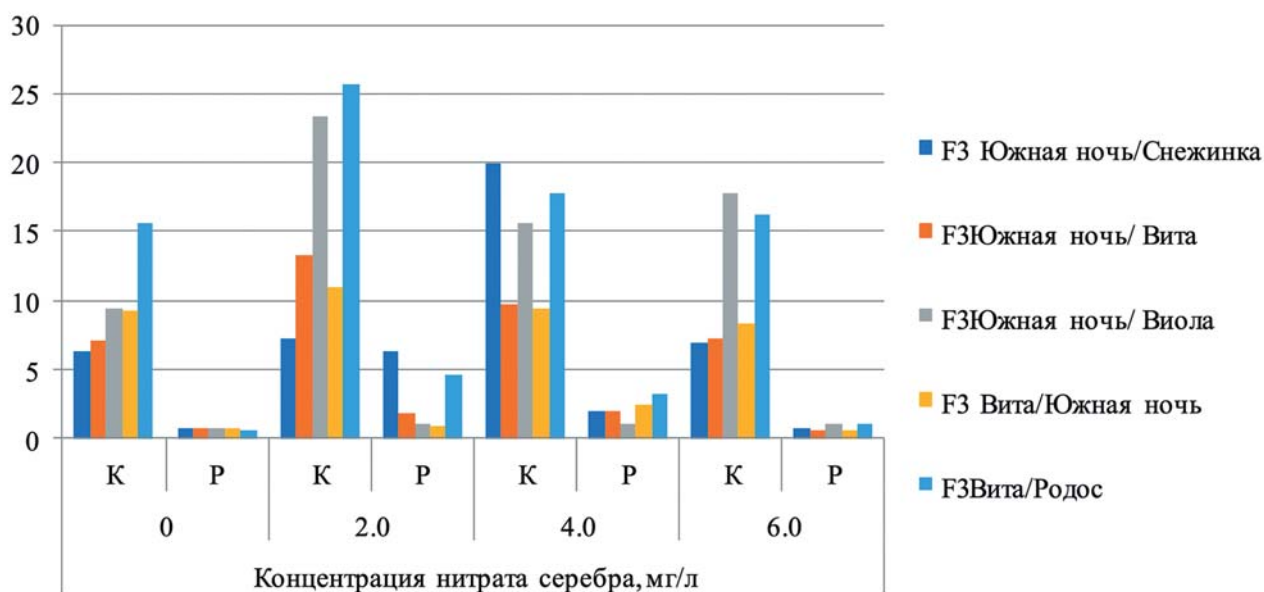


Рис. 3. Влияние нитрата серебра на каллусогенез и регенерацию гибридов риса в культуре пыльников *in vitro* Примечание: К - каллусогенез, $HCP_{05}=2,51$, Р - регенерация, $HCP_{05}=0,60$
 Fig. 3. Effect of silver nitrate on callusogenesis and regeneration of rice hybrids in anther culture *in vitro* Note: K - callusogenesis, $HCP_{05}=2.51$, R - regeneration, $HCP_{05}=0.60$

Разницы во влиянии на каллусогенез концентраций 1,0 и 2,0 мг/л не обнаружено у комбинации F₃ Вита/Титан (20,8 и 20,2% соответственно, НСР₀₅=1,73), а для комбинации F₃ Вита/Родос более эффективным было использование 2,0 мг/л (рис. 1).

Практически у всех генотипов при использовании в питательных средах абсцизовой кислоты в концентрации 1,0 мг/л как каллусообразующая, так и регенерирующая способности были выше. Для гибридов F₃ Южная ночь/Австрал – 3,0%, F₃ Южная ночь/Виола – 1,2%, F₃ Вита/Титан – 0,9% (НСР₀₅=0,15) использование АБК в концентрации 2,0 мг/л было более благоприятным для регенерации растений (рис. 2).

При анализе влияния нитрата серебра максимальные значения каллусогенеза в 5 образцах зафиксированы при концентрации 2,0 мг/л, эта же концентрация была оптимальной для процесса регенерации растений четырех изучаемых гибридов. Более высокая регенерация при 4,0 мг/л нитрата серебра отмечена только у гибрида F₃ Вита/Южная ночь (рис. 3).

Обсуждение

Получение гаплоидных растений в культуре изолированных пыльников у риса возможно только косвенным путем через каллусогенез. Далее в результате морфогенеза из клеток каллуса регенерируют растения. Андрогазные реакции в культуре *in vitro* в значительной степени зависят от генотипа, типа и концентрации экзогенных гормонов, которые влияют на определение пути развития микроспор, частоту индукции каллуса и регенерацию гаплоидных растений [17, 18]. Текущее исследование показало, что генотипы риса неодинаково реагировали на фитогормоны и их концентрации, что влекло за собой различия в частоте образования каллусов и регенерационной способности. Различия в способности к индукции каллуса и регенерации у разнообразных генотипов риса при разных концентрациях регуляторов роста позволяют предположить у них вероятно разный уровень эндогенных гормонов [19].

Синтетический аналог 6-аминопурина 6-БАП, вызывающий синтез РНК и белка, используется в технологиях *in vitro* при формировании каллусных культур и индукции процессов регенерации [21]. С помощью двухфакторного дисперсионного анализа выявлено достоверное взаимодействие и влияние генотипа и 6-БАП в составе питательной среды на эффективность андрогенеза двух гибридов риса F₂ Анита 22/Августин и F₃ Вита/Южная.

Показано, что в индукции новообразований и регенерации для изучаемых гибридов риса оптимальной концентрацией 6-БАП в питательных средах является 2,0 мг/л. У отдельных генотипов, вследствие различного содержания эндогенных гормонов, возможно использовать концентрации 2,0 и 4,0 мг/л 6-БАП. Значительное снижение индукции каллусогенеза влекло применение 6-БАП в концентрации 6,0 мг/л, а в концентрации 4,0 и 6,0 мг/л снижали эффективность регенерации растений в каллусной культуре *in vitro* (табл. 1). Это различие свидетельствует о том, что присутствие и уровень цитокинина в среде влияет на формирование побегов. С другой стороны, самые низкие значения всех показателей наблюдались в среде без обогащения 6-БАП.

Необходимость введения а-нафтилуксусной кислоты в среды культивирования подтверждена цитологическими

исследованиями, проведенными на разных видах сельскохозяйственных культур. Они показали, что α-НУК усиливает органообразовательные процессы в каллусах [22]. Дисперсионный анализ показал, что при увеличении концентрации α-НУК индукция каллусогенеза повышалась у всех изучаемых генотипов, при этом морфогенетический потенциал многих гибридов снижался в результате формирования неморфогенных и/или промежуточных типов каллуса. Это не позволило установить влияние концентраций этого гормона на регенерацию боль-



Рис. 4. Морфотипы каллуса в культуре пыльников риса *in vitro*
Fig. 4. Callus morphotypes in rice anther culture *in vitro*

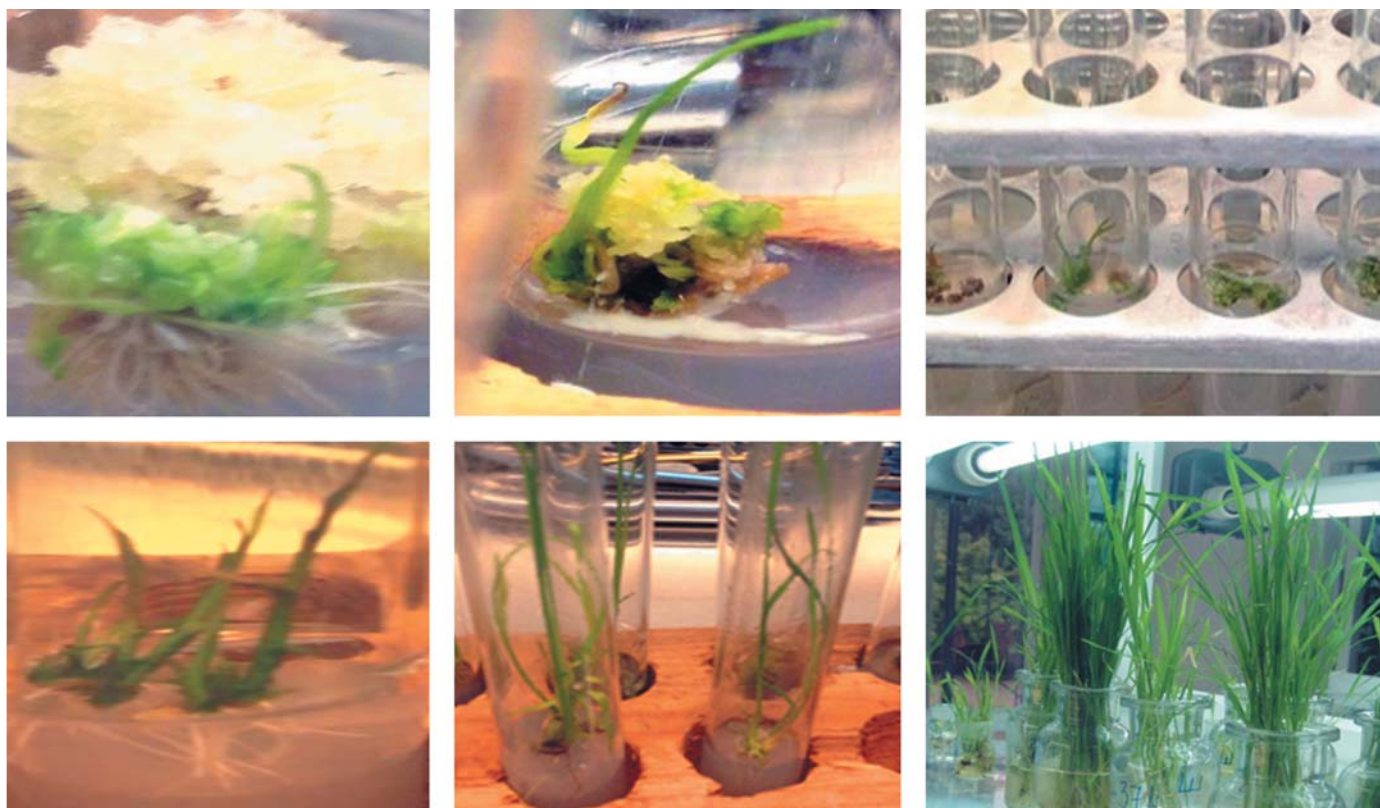


Рис. 5. Морфогенез в культуре пыльников *in vitro* риса с регенерацией побегов
Fig. 5. Morphogenesis in rice anther culture *in vitro* with shoot regeneration

шинства генотипов. Такие же результаты были получены ранее на других генотипах риса подвита *јапоніса*. Таким образом, оптимальные концентрации α -НУК, также как другого гормона 6-БАП для каллусогенеза и регенерации отдельных образцов риса могут варьировать вследствие различного уровня эндогенных гормонов у генотипически отличающихся комбинаций.

У исследуемых образцов риса по морфологическим признакам выделено 4 типа каллусных тканей. Наиболее высокой органо/эмбриогенной способностью обладали плотные, белые, мелкозернистые каллусы белого или светло-желтого оттенка с узелковыми вкраплениями (нодулярный, узелковый каллус). Такие каллусные формирования состояли из округлых, мелких клеток с густой цитоплазмой и крупным ядром, характерных для меристемных клеток. Высокой регенерационной способностью обладали также округлые, белые, светло-желтые, средней плотности каллусы (морфогенные каллусы). Каллусы светло-желтых оттенков рыхловатые имели промежуточный характер и отличались низкой регенерационной способностью. Как неморфогенный охарактеризован каллус темно-коричневый, рыхлый, оводнённый с крупными бесформенными клетками разного размера (рис. 4).

Для переключения микроспор на спорофитный путь развития обычно используются различные стрессы (холод, голодание, осмотические условия) [23-24]. Под влиянием стресса уровень АБК повышается в тканях, окружающих микроспоры и непосредственно в микроспорах, в связи с чем, многие авторы высказывают предположения о причастности абсцизовой кислоты в индукции соматического эмбриогенеза, отмечая положительное влияние накопления кислоты на эффективность этого

процесса. Другие авторы сообщают, что гормон стресса, ингибитор деления клеток и ростовых процессов абсцизовая кислота в сочетании с цитокининами у одних видов растений действительно стимулирует соматический эмбриогенез, а у других этот процесс подавляет [25-27].

Результаты эксперимента показали, что у отдельных генотипов риса при правильно подобранной концентрации абсцизовая кислота способствовала формированию высоко морфогенного каллуса, снижению формирования в нем аномальных и развитию нормальных соматических зародышей с последующей регенерацией растений (см. рис.5). Кроме этого, на начальных этапах культивирования каллусов, АБК предотвращала образование ризогенных (корнеподобных) структур, которые способны выделять ауксины, подавляющие компетентность каллусных клеток к образованию побегов в условиях *in vitro*.

Добавление нитрата серебра в среду Блейдса в концентрации 2,0 мг/л стимулировало индукцию каллусов. Количество каллусогенных пыльников у разных образцов при концентрации 2,0 мг/л варьировало в пределах 8,0-26,1%, а в концентрации 4,0 мг/л – 9,6-20,1%, что больше показателей в контроле (6,9-16,0%, НСР05=1,50). Развитие сформированных эмбрионидов каллуса риса ингибировало повышение концентрации нитрата серебра до 6,0 мг/л. Доля эмбрионидов менялась от 0,70% до 1,20%, что соответствовало уровню показателей контрольного варианта без нитрата серебра, в котором доля морфогенного каллуса и его регенерационная способность также снижались до 0,70-0,9% (НСР05=0,30). Также отмечено, что $AgNO_3$ предотвращает преждевременное старение культивируемых пыльников, подавляя биосинтез фенола и этилена, что положительно сказывается на морфогенетических потенциях.

Выводы

Выявлено достоверное влияние взаимодействия генотипа, концентрации и типа растительных гормонов в культуре пыльников *in vitro* риса. Обнаружено, что реакцию генотипов на успешную регенерацию побегов в условиях *in vitro* определяет совокупность и концентрации экзогенных и эндогенных гормонов, а различия в регенерации побегов у разных генотипов на фоне различных гормонов и добавок

могут быть связаны с качеством каллуса. Таким образом, включение фитогормонов в искусственные питательные среды повышают эффективность гаметных технологий, а гормональные потребности, необходимо оптимизировать для конкретных сортов или генотипов. Для ускоренного создания чистых линий риса применительно к изучаемым гибридам подобраны эффективные концентрации ауксинов, цитокининов и дополнительного стимулятора роста.

• Литература

- Maraschin S.F., Priester W. de, Spaink H.P., Wang M. Androgenic switch: an example of plant embryogenesis from the male gametophyte perspective. *Journal of Experimental Botany*. 2005;56(417):1711–1726. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri190>
- Гамбург К.З., Рекославская Н.И., Швецов С.Г. Ауксины в культурах тканей и клеток растений. Новосибирск: Наука. 1990. 243 с.
- Lee S.Y., Cheong J.I., Kim T.S. Production of doubled haploids through anther culture of MI rice plants derived from mutagenized fertilized egg cells. *Plant Cell Repts*. 2003;22(3):218–223. <https://doi.org/10.1007/s00299-003-0663-0>
- Mehran E., Shariatpanahi, U. Bal, E. Heberle-Bors, A. Touraev Stresses applied for the re-programming of plant microspores towards *in vitro* embryogenesis. *Physiologia Plantarum*. 2006;127:519–534. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00675.x>
- Reddy V.S., Leelavathi S., & S.K. Sen Influence of genotype regeneration from wheat anther and barley microspore culture using phenylacetic acid (PAA). *Plant Cell Rep*. 1985;(11):489–498.
- Shahinul Islam S.M., Narendra Tuteja Enhancement of androgenesis by abiotic stress and other pretreatments in major crop species. *Plant Science*. 2012;(182):134–144. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.10.001>
- El-Hennawy M.A., Zaazaa E.I., Al-Ashkar I.M., Eid E.A. Genetic analysis of anther culture response in some bread wheat crosses under drought stress conditions. *J. Biol. Chem. Environ. Sci*. 2018;(13):189–213. <https://www.researchgate.net/publication/336445607>
- Wang Z.M. Wei Embryogenesis and regeneration of green plantlets from wheat (*Triticum C.T. aestivum*) leaf base Plant Cell Tissue. *Organ Cult*. 2004;(77):149–156. <https://doi.org/10.1023/B:TICU.0000016818.58971.cc>
- Khatun R., Islam S.M.S., Ara I., Tuteja N., Bari M.A. Effect of cold pretreatment and different media in improving anther culture response in rice (*Oryza sativa* L.) in Bangladesh. *Indian J. Biotechnol*. 2012;11(4):458–463. <https://www.researchgate.net/publication/301764292>
- Haque M., A.B. Siddique, Islam S.M.S. Effect of silver nitrate and amino acids on high frequency plants regeneration in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Tissue Cult. Biotechnol*. 2015;25:37–50. <https://doi.org/10.3329/ptcb.v25i1.24124>
- Ali J., Katrina L.C.N., Shahana A., Azerkhsh T., Ali A.E., Corinne M.M.-N., Anumalla M. Improved anther culture media for enhanced callus formation and plant regeneration in rice (*Oryza sativa* L.). *Plants*. 2021;10 (5):839. <https://www.researchgate.net/publication/351068806>
- Kassa Belay Anelay, Mekbib Firew, Assefa Kebebew Effects of plant hormones and genotypes on anther culture response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Scientific African*. 2024;26:e02367. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024. e 02367>
- Dias J.S., Martins M.G. Effect of silver nitrate on anther culture embryo production of different *Brassica oleracea* morphotypes. *Scientia Horticulturae*. 1999;82:299–307. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00052-7)
- Cristea T.O., Leonte C., Brezeanu C., Brezeanu M., Ambarus S., Calin M., Prisecaru M. Effect of AgNO₃ on androgenesis of *Brassica oleracea* L. anthers cultivated *in vitro*. *Afr. J. Biotechnol*. 2012;11:13788–13795. <https://doi.org/10.5897/AJB12.2157>
- Shahvali-Kohshour R., Moieni A., Baghizadeh A. Positive effects of

cold pretreatment, iron source, and silver nitrate on anther culture of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). *Plant Biotech. Rep*. 2013;7:481–488. <https://doi.org/10.1007/s11816-013-0286-z>

16. Бутенко Р.Г., Тихонович Г.И. и др. Культура изолированных клеток и тканей в селекции растений. Основы сельскохозяйственной биотехнологии. 1990. С.162–165.

17. Ali J., Katrina L.C.N., Shahana A., Azerkhsh T., Ali A.E., Corinne M.M.-N., Anumalla M. Improved anther culture media for enhanced callus formation and plant regeneration in rice (*Oryza sativa* L.). *Plants*. 2021;10 (5):839. <https://doi.org/10.3390/plants10050839>

18. Ibrahim M.A., Ali R.A., Aldabbagh E.J., Mohammed A. Factors affecting callus induction from anther and ovary of okra (*Abelmoschus esculentus* L.). *Indian J*. 2023;57(5):658–664. <https://doi.org/10.18805/IJARe.AF-7548>

19. Flemmer A., Franchini M., Lindström L. Description of safflower (*Carthamus tinctorius*) phenological growth stages according to the extended BBCH scale. *Ann. Appl. Biol*. 2014;166 (2):331–339. <https://doi.org/10.1111/aab.12186>

20. Obert B., Dedičová B., Hricová A., Pret'ová A. Flax anther culture: effect of genotype, cold treatment and media. *Plant. Cell. Tissue. Organ. Cult*. 2004;79(2):233–238. <https://doi.org/10.1007/s11240-004-0664-x>

21. Савенко Е.Г., Кострюкова Э.Н., Глазырина В.А., Гончарова Ю.К. Влияние концентрации 6–бензиламинопурина на каллусогенез и регенерацию у гибридов риса ВНИИ с.-х. биотехнологии. Сборник XVII Всероссийской молодежной научной конференция «Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и ветеринарии». М., 2017. С.122–124.

22. Чайлакян М.Х. Регуляция цветения высших растений. М. Наука; 1988. 510 с.

23. Тураев А., Висенте О., Хеберлеборс Э. Иницирование микроспорового эмбриогенеза под воздействием стресса. *Trends Plant Sci*. 1997;2:297–302. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(97\)89951-7](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(97)89951-7)

24. Зоринянец С., Ташпулатов А. С., Хеберле-Борс Э. и Тураев А. «Роль стресса в индукции гаплоидного микроспорового эмбриогенеза». Гаплоиды в улучшении сельскохозяйственных культур II, под ред. Д. Палмера, У. Келлера и К. Каши. Берлин: Springer. 2005. С. 35–52.

25. Савенко Е.Г., Кострюкова Э.Н., Глазырина В.А., Шундрин Л.А. Каллусогенез и регенерация гибридов риса при различных концентрациях абсцизовой кислоты (АБК). *Рисоводство*. 2017;2(35):46–50. <https://elibrary.ru/yujsax>

26. Шаяхметов И.Ф., Шакирова Ф.М. Формирование соматических эмбриоидов в суспензионной культуре клеток пшеницы в присутствии АБК. *Физиология растений*. 1996;43:101–103.

27. Широков А.И., Крюков Л.А. Основы биотехнологии растений. 2012. 49 с.

• References

- Maraschin S.F., Priester W. de, Spaink H.P., Wang M. Androgenic switch: an example of plant embryogenesis from the male gametophyte perspective. *Journal of Experimental Botany*. 2005;56(417):1711–1726. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri190>
- Gamburg K.Z., Rekoslavskaya N.I., and Shvetsov S.G. Auxins in Plant Tissue and Cell Cultures. Novosibirsk: Nauka, 1990. 243 p. (In Russ.)

3. Lee S.Y., Cheong J.I., Kim T.S. Production of doubled haploids through anther culture of MI rice plants derived from mutagenized fertilized egg cells. *Plant Cell Repts.* 2003;22(3):218-223. <https://doi.org/10.1007/s00299-003-0663-0>
4. Mehran E., Shariatpanahi, U. Bal, E. Heberle-Bors, A. Touraev Stresses applied for the re-programming of plant microspores towards *in vitro* embryogenesis. *Physiologia Plantarum.* 2006;127:519–534. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00675.x>
5. Reddy V.S., Leelavathi S., & S.K. Sen Influence of genotype regeneration from wheat anther and barley microspore culture using phenylacetic acid (PAA). *Plant Cell Rep.* 1985;(11):489–498.
6. Shahinul Islam S.M., Narendra Tuteja Enhancement of androgenesis by abiotic stress and other pretreatments in major crop species. *Plant Science.* 2012;(182):134–144. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.10.001>
7. El-Hennawy M.A., Zaazaa E.I., Al-Ashkar I.M., Eid E.A. Genetic analysis of anther culture response in some bread wheat crosses under drought stress conditions. *J. Biol. Chem. Environ. Sci.* 2018;(13):189–213. <https://www.researchgate.net/publication/336445607>
8. Wang Z.M. Wei Embryogenesis and regeneration of green plantlets from wheat (*Triticum C.T. aestivum*) leaf base Plant Cell Tissue. *Organ Cult.* 2004;(77):149–156. <https://doi.org/10.1023/B:TICU.0000016818.58971.cc>
9. Khatun R., Islam S.M.S., Ara I., Tuteja N., Bari M.A. Effect of cold pretreatment and different media in improving anther culture response in rice (*Oryza sativa* L.) in Bangladesh. *Indian J. Biotechnol.* 2012;11(4):458–463. <https://www.researchgate.net/publication/301764292>
10. Haque M., A.B. Siddique, Islam S.M.S. Effect of silver nitrate and amino acids on high frequency plants regeneration in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Tissue Cult. Biotechnol.* 2015;25:37–50. <https://doi.org/10.3329/ptcb.v25i1.24124>
11. Ali J., Katrina L.C.N., Shahana A., Azerkhsh T., Ali A.E., Corinne M.M.-N., Anumalla M. Improved anther culture media for enhanced callus formation and plant regeneration in rice (*Oryza sativa* L.). *Plants.* 2021;10 (5):839. <https://www.researchgate.net/publication/351068806>
12. Kassa Belay Anelay, Mekbib Firew, Assefa Kebebew Effects of plant hormones and genotypes on anther culture response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Scientific African.* 2024;26:e02367. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02367>
13. Dias J.S., Martins M.G. Effect of silver nitrate on anther culture embryo production of different *Brassica oleracea* morphotypes. *Scientia Horticulturae.* 1999;82:299–307. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00052-7)
14. Cristea T.O., Leonte C., Brezeanu C., Brezeanu M., Ambarus S., Calin M., Prisecaru M. Effect of AgNO₃ on androgenesis of *Brassica oleracea* L. anthers cultivated *in vitro*. *Afr. J. Biotechnol.* 2012;11:13788–13795. <https://doi.org/10.5897/AJB12.2157>
15. Shahvali-Kohshour R., Moieni A., Baghizadeh A. Positive effects of cold pretreatment, iron source, and silver nitrate on anther culture of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). *Plant Biotech. Rep.* 2013;7:481–488. <https://doi.org/10.1007/s11816-013-0286-z>
16. Butenko R.G., Tikhonovich G.I., et al. Culture of isolated cells and tissues in plant breeding. Fundamentals of agricultural biotechnology. 1990. P.162–165. (In Russ.)
17. Ali J., Katrina L.C.N., Shahana A., Azerkhsh T., Ali A.E., Corinne M.M.-N., Anumalla M. Improved anther culture media for enhanced callus formation and plant regeneration in rice (*Oryza sativa* L.). *Plants.* 2021;10 (5):839. <https://doi.org/10.3390/plants10050839>
18. Ibrahim M.A., Ali R.A., Aldabbagh E.J., Mohammed A. Factors affecting callus induction from anther and ovary of okra (*Abelmoschus esculentus* L.). *Indian J.* 2023;57(5):658–664. <https://doi.org/10.18805/IJArE.AF-7548>
19. Flemmer A., Franchini M., Lindström L. Description of safflower (*Carthamus tinctorius*) phenological growth stages according to the extended BBCH scale. *Ann. Appl. Biol.* 2014;166 (2):331–339. <https://doi.org/10.1111/aab.12186>
20. Obert B., Dedičová B., Hricová A., Pret'ová A. Flax anther culture: effect of genotype, cold treatment and media. *Plant. Cell. Tissue. Organ. Cult.* 2004;79(2):233–238. <https://doi.org/10.1007/s11240-004-0664-x>
21. Savenko E.G., Kostryukova E.N., Glazyrina V.A., Goncharova Yu.K. Influence of the concentration of 6-benzylaminopurine on callusogenesis and regeneration in rice hybrids of the All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology. Collection of the XVII All-Russian Youth Scientific Conference "Biotechnology in Crop Production, Animal Husbandry, and Veterinary Medicine". Moscow, 2017; 122–124. (In Russ.)
22. Chailakyan M.Kh. Regulation of Flowering in Higher Plants. Moscow: Nauka; 1988. 510 p. (In Russ.)
23. Touraev A., Vicente, O., and Heberle-Bors, E. (1997). Initiation of microspore embryogenesis by stress. *Trends Plant Sci.* 1997;2:297–302. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(97\)89951-7](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(97)89951-7) (In Russ.)
24. Zorinants S., Tashpulatov A.S., Heberle-Bors E., Touraev A. The role of stress in the induction of haploid microspore embryogenesis. Haploids in Crop Improvement II, eds D. Palmer, W. Keller, and K. Kasha. Berlin: Springer. 2005. P.35–52. (In Russ.)
25. Savenko E.G., Kostryukova E.N., Glazyrina V.A., Shundrina L.A. Callusogenesis and regeneration of rice hybrids at different concentrations of abscisic acid (ABA). *Rice Growing.* 2017;2(35):46–50. <https://elibrary.ru/yujsax> (In Russ.)
26. Shayakhmetov I.F., Shakirova F.M. Formation of somatic embryoids in suspension culture of wheat cells in the presence of ABC. Plant physiology. 1996;43:101–103 (In Russ.)
27. Shirokov A.I., Kryukov L.A. Fundamentals of plant biotechnology. Uch.-methodical. stipend. 2012. 49 p. (In Russ.)

Об авторах:

Елена Георгиевна Савенко – кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биотехнологии и молекулярной биологии ФГБНУ ФНЦ риса <https://orcid.org/0000-0001-9110-032X> SPIN-код: 1555-6845, автор для переписки, avena5@rambler.ru

Валентина Александровна Глазырина – старший научный сотрудник лаборатории биотехнологии и молекулярной биологии ФГБНУ ФНЦ риса, SPIN-код: 5516-8009

Людмила Анатольевна Шундрин – научный сотрудник лаборатории биотехнологии и молекулярной биологии ФГБНУ ФНЦ риса, SPIN-код: 8524-7373

Жанна Михайловна Мухина – доктор биол. наук, главный научный сотрудник лаборатории биотехнологии и молекулярной биологии ФГБНУ ФНЦ риса, <https://orcid.org/0000-0003-3557-1615>, SPIN-код: 3701-4655

Любовь Владимировна Есаулова – кандидат биол. наук, зам. директора по науке ФГБНУ ФНЦ риса, <https://orcid.org/0000-0002-0907-2524>, SPIN-код: 9335-1160

About the Authors:

Elena G. Savenko – Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher at the Laboratory of Biotechnology and Molecular Biology Federal Scientific Rice Centre, <https://orcid.org/0000-0001-9110-032X>, SPIN-code: 1555-6845, Corresponding Author, avena5@rambler.ru

Valentina A. Glazyrina – Senior Researcher of the Laboratory of Biotechnology and Molecular Biology Federal Scientific Rice Centre, SPIN-code: 5516-8009

Ludmila A. Shundrina – Researcher of Laboratory of Biotechnology and Molecular Biology Federal Scientific Rice Centre, SPIN-code: 8524-7373

Zhanna M. Mukhina – Dr. Sci. (Biology), Chief Scientist of the Laboratory of Biotechnology and Molecular Biology Federal Scientific Rice Centre, <https://orcid.org/0000-0003-3557-1615>, SPIN-code: 3701-4655

Lyubov V. Esaulova – Cand. Sci. (Biology), Deputy Director of Science <https://orcid.org/0000-0002-0907-2524>, SPIN-code: 9335-1160

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-49-59>
УДК: 635.33:581.162(048)

С.Л. Фролова*,
Л.Л. Бондарева

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр овощеводства" (ФГБНУ ФНЦО) 143072, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИССОК, ул. Селекционная, д. 14

*Автор для переписки:
svetlanaeonidovna95@gmail.ru

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания "FGGF-2024-0019 Создание конкурентноспособных гибридов капусты белокочанной с использованием методов биотехнологии (2024-2026 гг.)" в рамках ФНТП "Развитие сельского хозяйства Российской Федерации на 2017-2030 годы" подпрограммы "Развитие селекции и семеноводства овощных культур".

Вклад авторов: Фролова С.Л.: проведение исследований, формальный анализ, создание черновика рукописи. Бондарева Л.Л.: руководство исследованием, концептуализация, методология, создание рукописи и её редактирование.

Конфликт интересов. Бондарева Л.Л. является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2008 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Фролова С.Л., Бондарева Л.Л. Анализ факторов, индуцирующих переход к генеративной фазе развития у представителей семейства Brassicaceae (обзор). *Овощи России*. 2025;(6):49-59.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-49-59>

Поступила в редакцию: 27.10.2025

Принята к печати: 26.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Svetlana L. Frolova*,
Lyudmila L. Bondareva

FSBSI Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC)
14, Selektionnaya str., VNISSOK,
Odintsovo region, Moscow district, 143072, Russia

*Corresponding Authors: svetlanaeonidovna95@gmail.ru

Funding. The work was carried out within the framework of the State Task "FGGF-2024-0019 Creation of competitive hybrids of white cabbage using biotechnology methods (2024-2026)" within the framework of the Federal Scientific and Technical Program "Development of Agriculture of the Russian Federation for 2017-2030" subprogram "Development of breeding and seed production of vegetable crops".

Authors' Contribution: Bondareva L.L.: investigation, conceptualization, methodology, writing – review & editing. Frolova S.L.: investigation, formal analysis, writing – original draft.

Conflict of interest. Bondareva L.L. has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2008, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citations: Frolova S.L., Bondareva L.L. Analysis of factors inducing the transition to the generative phase of development in the Brassicaceae family (review). *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):49-59. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-49-59>

Received: 27.10.2025

Accepted for publication: 26.11.2025

Published: 18.12.2025

Анализ факторов, индуцирующих переход к генеративной фазе развития у представителей семейства Brassicaceae (обзор)

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. В мировом растениеводстве капуста белокочанная (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.) является одной из значимых овощных культур. Одной из приоритетных задач отечественной селекции капустных культур является создание высокопродуктивных гибридов. Наиболее трудоемким и продолжительным этапом в этом процессе является создание константных родительских линий.

Целью данного обзора являлся систематический анализ научных публикаций, посвященных процессу перехода от вегетативной к генеративной фазе развития у представителей семейства Капустные (Brassicaceae).

Результаты. В традиционной селекции инбредные линии капусты белокочанной получают посредством принудительного самоопыления в течение 6-12 поколений. Использование биотехнологического метода культуры изолированных микроспор *in vitro* позволяет достичь полной гомозиготности генома в течение одного генеративного цикла и способствует расширению спектра формообразования генетических рекомбинантных форм, в том числе с рецессивными признаками. Также в сочетании с технологией получения удвоенных гаплоидов и геномными подходами, такими как маркерная селекция, геномная селекция и редактирование генома, «Speed Breeding» позволяет повысить эффективность селекции за счёт сокращения времени селекционного цикла, обеспечивая раннюю фенотипическую оценку, эффективное использование ресурсов, повышая точность отбора и генетический прогресс. Несмотря на преимущества биотехнологических методов, применение линий удвоенных гаплоидов (DH) сопряжено с рядом практических сложностей, в частности, касающихся репродукции полученных растений. Дополнительной проблемой является отсутствие цветения у части DH-растений после прохождения яровизации, что может быть обусловлено рядом причин: не подходящие условиями яровизации для конкретных линий. Также отмечаются растения с нормальным вегетативным развитием, у которых, тем не менее, не происходит завязывание семян.

Заключение. В результате проведенного обзора мировой и отечественной практики изучены важные этапы яровизации: температура, продолжительность, освещение, стадии развития растения. Эти знания позволяют увеличить процентную долю растений, переходящих в репродуктивную стадию развития.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

условия яровизации, капуста белокочанная, температурный режим, DH – технологии, линии удвоенных гаплоидов, гибридизация, репродуктивная фаза развития

Analysis of factors inducing the transition to the generative phase of development in the Brassicaceae family (review)

ABSTRACT

Relevance. In the global crop production, white cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.) is one of the most important vegetable crops. One of the priorities of domestic cabbage crop breeding is the creation of highly productive hybrids. The most time-consuming and lengthy stage in this process is the creation of constant parent lines.

The purpose of this review was a systematic analysis of scientific publications devoted to the process of transition from the vegetative to the generative phase of development in representatives of the Cabbage family (Brassicaceae).

Results. In traditional breeding, inbred lines of white cabbage are obtained through forced self-pollination for 6-12 generations. The use of the biotechnological method of culture of isolated microspores *in vitro* ensures the achievement of complete homozygosity of the genome during one generative cycle and contributes to the expansion of the spectrum of formation of genetic recombinant forms, including those with recessive traits. Also, in combination with the technology of obtaining doubled haploids and genomic approaches such as marker breeding, genomic selection and genome editing, "Speed Breeding" allows to increase the efficiency of breeding by reducing the breeding cycle time, providing early phenotypic assessment, efficient use of resources, increasing the accuracy of selection and genetic progress. Despite the advantages of biotechnological methods, the use of double haploid (DH) lines is associated with a number of practical difficulties, in particular, concerning the reproduction of the obtained plants. An additional problem is the lack of flowering in some DH plants after undergoing vernalization, which may be due to a number of reasons: unsuitable vernalization conditions for specific lines. There are also plants with normal vegetative development, which, nevertheless, do not set seeds.

Conclusion. As a result of the conducted review of world and domestic practice, important stages of vernalization have been studied: temperature, duration, lighting, and stages of plant development. This knowledge will make it possible to increase the percentage of plants passing into the reproductive stage of development.

KEYWORDS:

vernalization conditions, white cabbage, temperature regime, DH technologies, doubled haploid lines, hybridization, reproductive phase of development.

Введение

В мировом растениеводстве капуста белокочанная (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.) является одной из значимых овощных культур. Возделываемые культуры, принадлежащие к роду *Brassica*, входят в топ-10 наиболее экономически важных овощных культур в мировом сельском хозяйстве и на рынках. Ее популярность объясняется комплексом биологических и хозяйственно полезных свойств – содержанию клетчатки, минералов (кальция, фосфора и калия) и витаминов (С, К, А и фолиевой кислоты) [1, 2].

Одной из приоритетных задач отечественной селекции капустных культур является создание высокопродуктивных сортов и гибридов, характеризующихся выравненностью и устойчивостью к болезням. Наиболее сложным, трудоемким и продолжительным этапом в этом процессе является создание константных родительских линий [3]. Капуста белокочанная – перекрестноопыляемое растение с двулетним циклом развития, в традиционной селекции инбредные линии капусты белокочанной получают посредством принудительного самоопыления в течение 6-12 поколений [4]. В современной селекции активно используют различные методы, позволяющие ускорить селекционный процесс, в том числе биотехнологический метод культуры изолированных микроспор *in vitro*. Использование данного метода обеспечивает достижение полной гомозиготности генома в течение одного генеративного цикла и способствует расширению спектра формообразования генетических рекомбинантных форм, в том числе с рецессивными признаками. Получение стабильных гомозиготных линий из популяции облегчает поиск редких генотипов [5, 6, 7]. В настоящее время метод культуры изолированных микроспор используется в селекционных программах капустных культур по всему миру в качестве альтернативного или дополнительного к классическому методу производства гомозиготных линий *Brassica*: капуста белокочанная, брокколи, цветная, рапс, капуста пекинская, китайская и др. [8]. Это говорит об актуальности исследования в области получения удвоенных гаплоидов и необходимости комплексного подхода к этому вопросу в связи с множеством факторов, влияющих на успешность применения технологии. Ее основным преимуществом является не только скорость получения гомозиготного материала, а также сокращение площадей, необходимых для селекционных посевов и существенное снижение стоимости создаваемых сортов и гибридов [9]. Также в сочетании с технологией получения удвоенных гаплоидов [10, 11] и геномными подходами, такими как маркерная селекция, геномная селекция и редактирование генома, «Speed Breeding» (ускоренная селекция) позволяет повысить эффективность селекции за счёт сокращения времени селекционного цикла, обеспечивая раннюю фенотипическую оценку, эффективное использование ресурсов и повышая точность отбора и генетический прогресс [12].

Несмотря на преимущества биотехнологических методов, применение линий удвоенных гаплоидов (DH) сопряжено с рядом практических сложностей, в частности, касающихся репродукции полученных растений [13].

Процесс развития растений-регенерантов от эмбриоидов до получения семенного потомства не

отработан, так как на многих растениях не удается достичь образования цветonoса. Поскольку для получения семян капусты белокочанной им необходимо пройти этап яровизации при низких положительных температурах в течение 3-4 месяцев [14]. Длительность этого периода отрицательно сказывается на практическом выходе линий – удвоенных гаплоидов, поскольку выживаемость регенерантов в процессе адаптации очень низкая и дополнительно необходимо учитывать индивидуальные условия роста и развития для каждого генотипа.

В ходе исследований была установлена вариабельность признака фертильности. Так, при культивировании пыльников пшеницы обнаружены различия между линиями по уровню фертильности растений R0 и R1. Также выявлены регенеранты R0, которые в R1-поколении расщеплялись по уровню фертильности [15]. Аналогичные результаты были получены ранее и на других культурах. Изменчивая фертильность была отмечена среди удвоенных гаплоидных растений, регенерированных из культуры пыльников ржи. В серии экспериментов в период с 1981 по 1991 годы, наблюдалась завязываемость семян у 48-53% растений-регенерантов после самоопыления. В других опытах отмечено влияние внешних условий на фертильность растений-регенерантов (R0) 62% растений R0 завязывали семена после самоопыления в условиях защищенного грунта, тогда как регенеранты, которые были посажены непосредственно в поле для естественной яровизации, этот показатель не превышал 30% [16].

Пониженная фертильность была описана Lashermes и др. у DH-растений кофе робуста (*Coffea canephora*), полученных путем колхицинирования гаплоидов. Авторы связывают это с инбредной депрессией [17]. По данным Stipic и др. из 78 полученных в культуре пыльников растений-регенерантов R0 капусты цветной и выращенных в поле, только 14 были фертильными и образовали семена [18]. В аналогичных исследованиях на культурах из семейства Капустные выявлена низкая завязываемость семян при гейтеногамном опылении полученных *in vitro* растений-регенерантов, которая варьировала от 0 до 7 семян/стручков. При этом установлена зависимость данной особенности от генотипа [19-22]. Сниженная фертильность DH-линий может создать проблему использования их в качестве родителей при создании гибридов. Поэтому при включении в селекционный процесс нового исходного материала, необходима предварительная оценка семенной продуктивности растений удвоенных гаплоидов [13].

Дополнительной проблемой является отсутствие цветения у части DH-растений после прохождения яровизации, что может быть обусловлено рядом причин: не подходящие условиями яровизации для конкретных линий (температурный режим, продолжительность, фотопериод, стадия онтогенеза растения и др.). Также отмечаются растения с нормальным вегетативным развитием, у которых, тем не менее, не происходит завязывание семян [23].

Целью данного обзора являлся систематический анализ научных публикаций, посвященных процессу перехода от вегетативной к генеративной фазе развития у представителей семейства Капустные (*Brassicaceae*). Анализ включил изучение причин

индукции цветения и методы управления данным процессом для их последующего практического применения в селекции удвоенных гаплоидных линий белокочанной капусты (*Brassica oleracea* L. *convar. capitata* L. *var. alba* DC.).

Особенности развития растений капусты белокочанной при двулетнем цикле развития

Белокочанная капуста (*Brassica oleracea* L. *convar. capitata* L. *var. alba* DC.) относится к семейству Капустные (*Brassicaceae*), роду Капуста (*Brassica*) и является двулетним растением. В первый год капуста образует розетку прикорневых листьев и кочан, а во второй – цветонос и семена [24]. Второй год жизни связан с переходом растения из вегетативного состояния в репродуктивное [25, 26].

Опытами Джея Миллера было установлено, что переходу белокочанной капусты к цветению способствует выдерживание молодых растений при пониженных температурах [27]. Переход к образованию цветоноса сопровождается изменениями морфологического строения конуса нарастания почки, которые являются разностадийными и имеют различную реакцию на низкие температуры, так как нижерасположенные почки частично находятся в состоянии покоя и менее активны [28]. Так активность и восприятие яровизационных воздействий верхушечной почки является результатом обильного снабжения питательными веществами через все сосудистопроводящие пучки, сосредоточенные возле почки [29].

В дальнейшем наблюдаются пять фаз, приводящих к полному формированию цветков. **Первая фаза** заключается в вытягивании конуса и расширении его основания вследствие появления в пазухах первого и третьего листьев и у основания конуса округлых боковых почек.

Во второй фазе боковые почки образуются в пазухах едва заметных листовых зачатков, конус нарастания покрывается большим количеством мелких бугорков, одни из которых являются зачатками листьев, другие почек. **В третью фазу** конус имеет ряд бугорков, листьев и почек, ниже располагаются зачатки значительно удлиненных листьев, в пазухах которых имеются почки, растущие, как верхушечная. **В четвертой фазе** ближайшие к вершине конуса нарастания почки начинают формироваться в цветки. Из пазухи листа образуется длинное междоузлие, на котором формируется цветок. **В пятой фазе** формируются тычинки и образуется пыльца. В то время как зачатки цветков превращаются в сформированный цветок, конус нарастания главной оси и боковых продолжает рост, в результате чего возникают новые зачатки цветков, что приводит к образованию соцветия (рис. 1).

Видовое разнообразие капустных культур по длительности яровизации можно разбить на 5 групп:

1. Формы с очень коротким периодом яровизации. Для них характерна способность проходить яровизацию в семенах и молодых растениях (возраст рассады). У взрослых растений в полевых условиях последовательные фазы морфолого-анатомических изменений в конусе нарастания при переходе его из вегетативного к генеративному состоянию быстро следуют одна за другой, заканчиваясь образованием зачаточного соцветия в поле или в начале хранения. К этой группе относятся некоторые итальянские ветвистые сорта капусты цветной (*subsp. Italica*), сорта капусты листовой из США, Аргентины, Индии, кольраби (*subsp. gongylodes*) – многие скороспелые сорта из Индии; ряд сортов капусты кочанной (*subsp. costata*) из Португалии, Испании, Италии. В эту же группу входит большинство форм азиатских видов капусты пекинской и китайской.

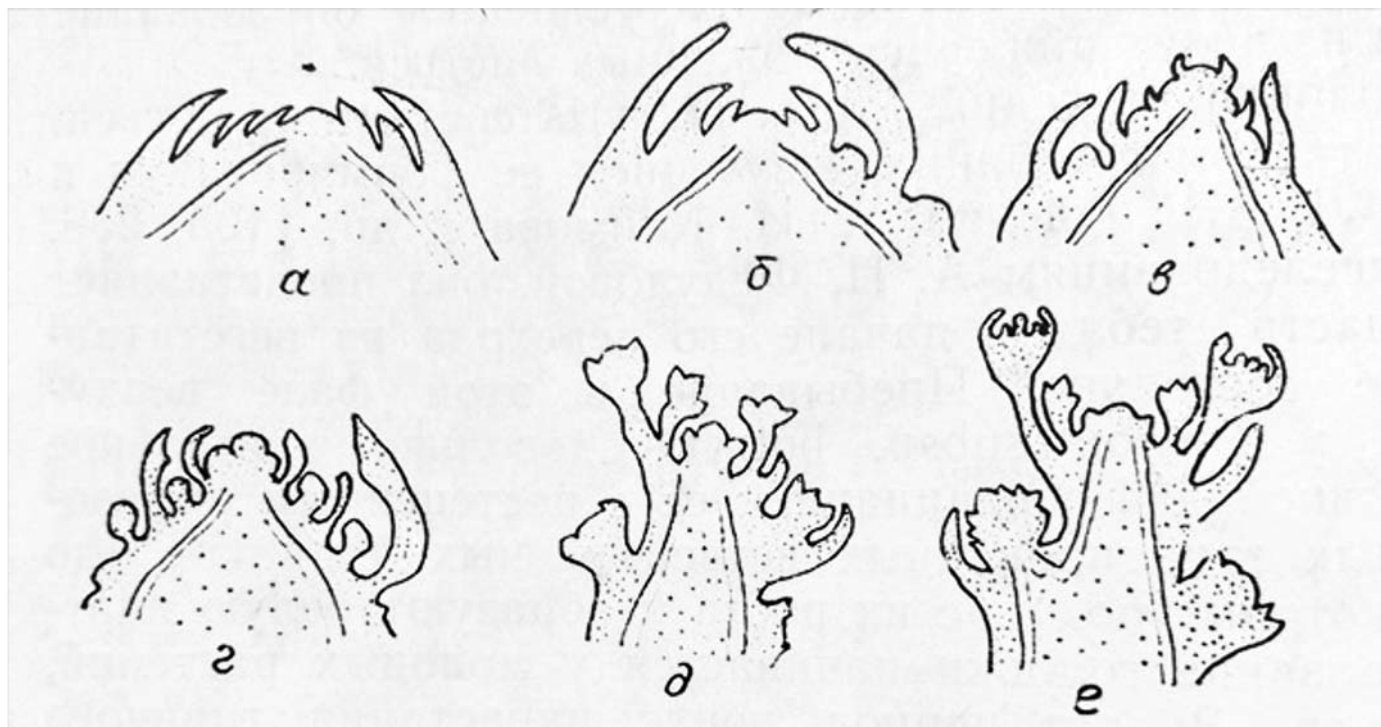


Рис. 1. Анатомо-морфологические изменения точки роста капусты в процессе перехода из вегетативного в генеративное состояние (ув. В 20 раз).

а – вегетативное состояние точки роста; б – 1-я фаза; в – 2-я фаза; г – 3-я фаза; д – 4-я фаза; е – 5-я фаза [30]

Fig. 1. Anatomical and morphological changes in the growing point of cabbage during the transition from the vegetative to the generative state (magnified by 20 times).

a – vegetative state of the growing point; b – 1st phase; c – 2nd phase; g – 3rd phase; d – 4th phase; e – 5th phase [30]

II. Формы с коротким периодом яровизации. Яровизация в семенах у этих форм обычно не заканчивается, а яровизация молодых растений сортов двулетних видов вызывает образование цветения на 20-100%. У взрослых растений в полевых условиях начальные морфолого-анатомические изменения конуса нарастания (I, II фазы) обнаруживаются в середине осеннего периода. Дальнейшие фазы его изменения следуют достаточно быстро одна за другой, лишь несколько продолжительнее вторая фаза (особенно у цветной капусты), а иногда и третья. К этой группе относятся скороспелые сорта капусты цветной, многие сорта капусты листовой и савойской, позднеспелые сорта кольраби, ряд скороспелых и среднеспелых сортов кочанной капусты центрально-европейских сортогрупп.

III. Формы со средней длительностью периода яровизации. У этих форм яровизация в семенах обычно не заканчивается, яровизация рассады не вызывала цветения или они образовывались менее, чем у 20% биотипов сорта. У взрослых растений начальные морфолого-анатомические изменения конуса нарастания обнаруживаются в поле к концу вегетации, а вторая, иногда и третья морфолого-анатомические фазы протекают при хранении растений и имеют достаточно большую длительность.

К этой группе относятся некоторые северные сорта капусты листовой и у кочанной – многие скороспелые белокочанные сорта и некоторые среднеспелые краснокочанные сорта.

IV. Формы с длительным периодом яровизации. Отсутствие ускорения развития при яровизации семян и молодых растений. Начальные морфолого-анатомические изменения в конусе нарастания растений в полевых условиях не обнаруживаются, а начинаются в процессе хранения растений – в начале ноября, при этом вторая фаза очень продолжительна. Эта группа представлена кочанной капустой – позднеспелые белокочанные и краснокочанные сорта, позднеспелые сорта капусты савойской.

V. Формы с очень длительным периодом яровизации. Так же, как и в предыдущей группе, отсутствие ускорения развития растений под влиянием яровизации семян и молодых растений. Начальные морфолого-анатомические изменения в конусе нарастания растений в полевых условиях наблюдаются только в процессе хранения растений, при длительной второй фазе. При этом у растений некоторых сортов в конусах нарастания четвертая фаза не обнаруживалась до весны. К этой группе относятся наиболее позднеспелые сорта капусты кочанной [30].

Сортам, относящимся к четвертой и пятой группам, свойственна хорошая и высокая лежкость кочанов в период зимнего хранения [31].

Переход от вегетативной к репродуктивной стадии развития

Регуляцию перехода растения от образования цветоноса к цветению с помощью возрастных изменений в самом развивающемся организме называют возрастным контролем зацветания. Возрастной контроль зацветания имеет двоякий смысл. С одной стороны, очень молодые растения, еще не достигшие оптимальных для данного вида и данных внешних условий веге-

тативной мощи, строения и степени дифференцировки, не должны цвести, так как они дадут плохое потомство. С другой стороны, каждое отдельное растение должно не слишком долго вегетировать и в определенное время переходить к цветению и плодоношению. Возрастная регуляция зацветания проявляется у разных видов в различной степени, наиболее хорошо выражена у многолетних растений, особенно у древесных, и проявляется в том, что растение может образовывать первые цветки только по достижении определенного минимального возраста.

Экспериментальное изучение яровизации впервые проведено немецким исследователем Г. Гасснером. Он проводил опыты на двулетних растениях (свекла, капуста, морковь и т. д.) и получал семена в первый год жизни, при предварительном воздействии на них пониженными температурами в течение определенного периода времени. Г. Гасснер исследовал также влияние яровизации на скорость перехода к колошению озимой пшеницы, ржи и ячменя [32, 33].

Яровизация растений капусты зависит от многих факторов: температурного режима, возраста растений, подвита и сроков созревания капусты [34, 35].

Растения могут проходить яровизацию в разном возрасте от наклюнувшихся семян до ювенильных растений в фазе сформировавшихся двух-трех настоящих листьев [36]. Инициация цветения может произойти до фазы образования кочана или после нее, в зависимости от температуры и/или фотопериода в течение вегетации [14]. Процесс яровизации капусты наиболее интенсивно осуществляется при температуре 5...6°C, но он может протекать и при 10...18°C [30]. Так, у растений капусты цветной яровизация проходит при 13...18°C [37]. В исследованиях на пекинской капусте отмечено, что чувствительность к яровизации начиналась с появлением всходов и оставалась постоянной с увеличением возраста растения при 5...8°C в течение 3 недель [38].

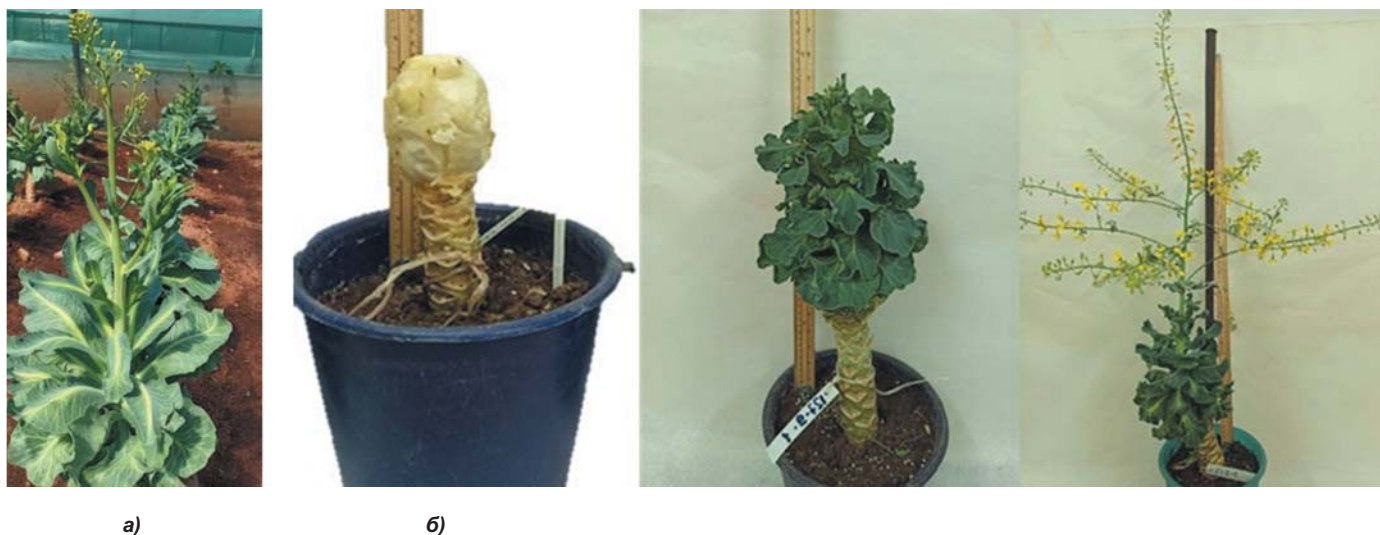
Длительность периода прохождения яровизации растений капусты белокочанной также зависит от группы спелости. Для раннеспелой капусты достаточно 50-65 суток, для средней – от 110-120, а для поздней 180-190 суток [39, 40].

Технология получения семенного потомства растений капусты белокочанной при разных способах яровизации

Условия роста и развития маточных растений являются одним из важнейших факторов, предопределяющих развитие семенных растений, количество и качество получаемых семян. При наличии технических возможностей более предпочтительным является использование климатических камер с контролируемыми условиями, при отсутствии таких используют зимние и/или весенние теплицы, а также открытый грунт.

Во «ВНИИ риса» были проведены исследования по семеноводству гибридов F₁. Целью работы являлось определение оптимальных сроков посева для родительских линий, относящихся к различным группам спелости, при их культивировании в необогреваемой пленочной теплице в беспересадочной культуре.

Используя такой способ получения семян, встречается ряд сложностей, так как погодные условия в осенне-



a)

б)

Рис. 2. Выращивание маточников: а) в условиях защищенного грунта; б) в камерах искусственного климата (фото автора)
Fig. 2. Growing mother plants: a) in protected ground conditions; b) in artificial climate chambers

зимний период различаются по годам, что вносит коррективы в процесс прохождения яровизации растениями и влияет на сроки цветения. Влияние внешней среды, а именно, температуры воздуха и почвы, играет важнейшую роль в сроках цветения инбредных линий капусты белокочанной.

При создании гибридов F_1 на основе самонесовместимости и с использованием линий с ЦМС необходимо учитывать сочетаемость родительских линий по синхронности цветения и принимать во внимание сроки начала цветения, массового цветения и конец цветения линий. Температурные условия в теплице зависят от наружного воздуха и регулирования вентиляцией, в пасмурные дни температура в теплице будет выше на 1-2 градуса, в солнечные – на 4-5 градусов. Сумма яровизирующих температур в зависимости от года может быть достаточной для раннеспелой и среднепоздней групп, но недостаточной для поздних, что поспособствует накоплению вегетативной массы.

Одним из факторов для успешного производства семян гибридов F_1 является синхронность цветения родительских линий. При изучении влияния контрастных погодных условий в период яровизации линий капусты белокочанной, выращиваемых в беспересадочной культуре в неотапливаемой теплице, была выявлена различная реакция генотипов по срокам цветения. Поэтому для селекционной практики в таких условиях необходимо подбирать линии с аналогичной нормой реакции растений на изменения погодных условий [41].

Одним из способов по ускорению этапов селекционной работы с капустой является использование камер искусственного климата, с заданными световым и температурным режимами, установлены особенности их использования, позволяющие в 2 раза сократить селекционный процесс, отработаны отдельные элементы технологии получения и размножения семян селекционных образцов разных разновидностей капусты [42].

В камерах искусственного климата растения капусты проходят такие этапы развития, как яровизация, переход в репродуктивную стадию развития (образование цветonoса), цветение семенного растения (в этот период проводится гибридизация), образование стручков, созревание и уборка семян. После того, как маточ-

ные растения выкопали в поле их высаживают в вегетационный сосуд с питательной смесью и устанавливают в холодильную камеру с установленной температурой 4...6°C. В зависимости от группы спелости сорта маточники проходят яровизацию от 1,5 до 2 месяцев и более. При выращивании в открытом грунте маточники капусты проходят эти этапы за 9-10 месяцев, в т.ч. на яровизацию уходит до 5 месяцев, а остальное время – на рост и развитие растений капусты второго года жизни.

В камерах искусственного климата эти же этапы роста и развития растения капусты проходят значительно быстрее (за 3,5-4 месяца) за счет регулирования температурного режима и относительной влажности воздуха [43]. Выращивание растений в камере искусственного климата позволяет исключить влияние неблагоприятных внешних факторов: климатических условий, наличие патогенов и насекомых для нежелательного переопыления. Такие технологические приемы позволяют повысить эффективность получения семенного потомства двулетней культуры за один год и значительно снизить затраты на создание гетерозисных гибридов с заданными параметрами [44].

Существенные недостатки при выращивании маточных растений в условиях защищенного и открытого грунта это отсутствие контроля над дневными температурами, выше риск поражения вредителями, болезнями, ограниченный период использования. В контролируемых условиях климатической камеры с регулируемой температурой, влажностью воздуха и фотопериодом это дает возможность непрерывного селекционного процесса, не привязываясь к погодным условиям.

Яровизация семенного материала

Яровизация в виде проращивания семян не является решением для капусты кочанной [45]. Группой ученых из Новой Зеландии был проведен опыт по яровизации семян капусты. Праймированные семена подвергали яровизации в темноте при постоянной температуре 4°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$). Длительность яровизации варьировала от 0 до 12 недель. В конце периода отбора образцы капусты, прошедшие самую длительную яровизацию, были препарированы под микроскопом, чтобы определить, произошло ли флоральное развитие апикальной меристе-

мы. Цветение не наступило ни у одного растения капусты с любой продолжительностью яровизации. Можно предположить, что это связано с тем, что проросшие семена не чувствительны к яровизации.

Другими учеными изучалась реакция на яровизацию набухших семян капусты, моркови, свёклы, а также райграса пастбищного в качестве контроля в течение 0–12 недель при температуре 4°C. Сухие семена не поддаются яровизации, в то время как набухшие семена многих видов восприимчивы к ней [46]. У свёклы и райграса пастбищного наблюдалась положительная реакция на яровизацию: цветение у свёклы происходило в течение 4–12 недель, а у райграса пастбищного – в течение всего периода, тогда как растения капусты, которые яровизировали в течение 0–12 недель остались без видимых признаков репродуктивных изменений [47].

Растения капусты белокочанной не реагируют на пониженные температуры в фазе семян и во время прорастания, так как они обладают хорошо выраженной фазой ювенильности [8].

Яровизация на стадии штеклинга

Штеклинги – стадия растения, которое еще не сформировало продуктивный орган. (розеточное растение).

По данным ученых установлено, что переход из вегетативной фазы развития в генеративную сопровождается накоплением растением минимального количества пластических веществ, т. е. растения должны достичь определенных размеров, а наиболее благоприятные температуры для успешного прохождения яровизационного процесса – 5–6°C. Таким образом, установлено, что яровизация зависит не от возрастного состояния растений, а от площади сформированных листьев растением [5]. В дополнение к этому, японские ученые установили, что капуста воспринимает яровизирующие температуры, когда диаметр подсемядольного колена достигает 6 мм. Такое состояние соответствует фазе 6–7 настоящих листьев. Влияние низких положительных температур влечет за собой морфологические изменения в конусе нарастания, что приводит к образованию соцветия. Однако, воздействие повышенных температур (более 12°C) на молодые растения в период яровизации приостанавливает дифференциацию, что может привести к деяровизации. Это зависит от возраста растений, представленной экспозиции и от ювенильной стадии развития (рис. 3) [5].

Другими учеными проводилось исследование в фазу 10–13 настоящих листьев и толщиной стебля 9–12 мм растения капусты в фазе штеклингов (розеточных растений) устанавливали в камеру искусственного климата. В течение 55 суток температурный режим в камере поддерживался в диапазоне 6,0–6,5°C, при котором растения проходили яровизацию, затем сосуды со штеклингами переносили в вегетационную камеру, для постепенной адаптации.

Использование в качестве маточников розеточных растений (штеклингов) представляет возможность сокращения двухлетнего цикла развития за счет ускоренного прохождения фенологических фаз роста [44].

Многие авторы отмечают перспективу использования маточников – штеклингов и даже растений в фазе 5–6 настоящих листьев. Одним из основных преимуществ данной технологии является возможность автоматизации многих процессов: выращивания, хранения, транспортировки и посадки не полновозрастных растений. Самым сложным вопросом при семеноводстве через штеклинги является

регулирование процесса перехода их в репродуктивную фазу. Исследуемые линии капусты белокочанной различались по длительности перехода от вегетативной стадии к репродуктивной на три группы: коротко-стадийные, промежуточные, длинностадийные, требующие для завершения яровизации более длительного периода воздействия пониженными положительными температурами. Возраст маточных растений оказывал влияние на рост и развитие, на прохождение стадий яровизации, а также на формирование семенного куста и его продуктивность. Высокий процент прохождения яровизации имели штеклинги в возрасте 105 суток всех изученных линий.

Также в 1991 году рядом ученых было запатентовано изобретение, целью которого являлось повышение семенной продуктивности растений капусты. Для прохождения яровизации закладывали растения с не менее 15 развернувшимися листьями и диаметром наружной кочерыги не менее 2 см.

В один полиэтиленовый мешок укладывали растения, предварительно удалив с них развернувшиеся листья, помещали в контейнеры вертикально, которые затем устанавливали в холодильные камеры с температурой +1...3°C. За две недели до высадки повышали температуру до 5...6°C. Режим хранения штеклингов (1...3°C выше нуля) обеспечивают высокую сохранность, при этом отходы составляют 5–6%. Повышение температуры ведет к увеличению порчи растений, так при температуре 5...10°C гибель растений составляет 60–80%. При определении урожайности было установлено, что наибольшее количество семян формировали семенники, полученные из штеклингов с количеством листьев – 15 шт. и диаметром наружной кочерыги 2,0–3,0 см, тогда как семенная продуктивность стандартных маточников была ниже на 15% [48].

Учеными из Приднестровского НИИСХ установлена возможность получения семян этой культуры из розеточных растений (штеклингов), где важное значение для перехода растений от вегетативного к репродуктивному периоду онтогенеза имеет их возраст и количество листьев. По результатам выявлено, что растения в возрасте 90 дней с хорошо развернутыми листьями (14–17 шт.) и диаметром наружной кочерыги 2,3–3,0 см, имели наибольшую сохранность во время яровизации. Повышенная жизнеспособность растений этого срока посева объясняется большим накоплением пластических веществ в них, которые обеспечили интенсивное образование корневой системы, отрастание розетки листьев и интенсификацию процессов фотосинтеза. Дальнейшее развитие семенников также было взаимосвязано с возрастом розеточных растений – более развитые семенники по габитусу куста [49].

Большинство представителей семейства Капустные (Brassicaceae) можно яровизировать после того, как они достигнут стадии зрелости, при которой стебель имеет диаметр не менее 10 мм, предпочтительно 15 мм. До этого этапа растение может не реагировать на понижение температуры.

Некоторые авторы утверждают, что у капусты процесс яровизации под влиянием пониженной температуры (3...10°C) идет лишь в растениях в возрасте не менее двух месяцев, при этом воздействие указанными пониженными температурами требуется в течение 60 дней. Такие условия больше подходят для скороспелых сортов [30].

У всех способов ускорения основной упор ложится на размножение семенного потомства, минуя стадию получе-



Рис. 3. Растение капусты белокочанной на стадии штеклинга (фото автора)
Fig. 3. White cabbage plant at the steckling stage (author's photo)



Рис. 4. Подготовка маточного растения капусты к высадке. (<https://prokrolik.ru/koreshok/kapustiy/>)
Fig. 4. Preparing the cabbage mother plant for planting

ния товарного органа, по которому ведется отбор [50, 51]. Поэтому данный метод может использоваться только для размножения линейного материала без оценки на хозяйственно ценные признаки.

Яровизация после формирования кочана

При производстве маточников ставят задачу вырастить типичные для сорта здоровые, не поврежденные вредителями и болезнями растения, с хорошо развитыми, но не проросшими кочанами, способными перенести длительное (до шести месяцев) зимнее хранение при температуре от -1 до +1°C и относительной влажности воздуха 90-95%.

За две-три недели до посадки маточники очищают от загнивших листьев и подгнивших мелких корней, отбраковывают с поврежденной кочерыгой и составляют «Акт весеннего отбора маточников». Кочан срезают на конус (для кочанных разновидностей капусты) вручную или используют для этого специальные станки. За одну-полторы недели до посадки кочерыги укладывают для «осветления», которое необходимо особенно для плотнокочанных сортов, чтобы завершилась дифференциация верхушечных почек у кочерыг, их укладывают в штабеля высотой до 1,5 м, корнями внутрь, присыпая корни влажным торфом, и корни начинают отрастать. Температуру в хранилище поддерживают не выше +5...+7°C и усиливают искусственное освещение, чтобы листья, окружающие почку, позеленели, что позволит избежать ожогов и угнетения семенников после посадки их в поле. Такие семенники хорошо приживаются (рис. 4) [44, 51, 52].

Яровизация растений в культуре *in vitro* при получении ДН-линий

Ускорение селекционного процесса на основе методов «Speed Breeding» позволяет создавать сорта сельскохозяйственных культур в более короткие сроки. Этого можно достичь в контролируемых климатических условиях. По сравнению с классической селекцией технология «Speed Breeding» позволяет за год получить до 5 репродукций яровых культур [53, 54, 55]. К факторам, которыми можно манипулировать, относятся фотопериод, интенсивность освещения, температура и влажность воздуха, влажность

и питание почвы, плотность посадки, которая в данном случае будет высокой, а также концентрация углекислого газа. С помощью регулировки этих факторов стимулируется раннее цветение и завязывание семян [12].

Применение технологии SB позволяет не только получить несколько поколений за год, но и способно решить проблемы, связанные с адаптацией к условиям окружающей среды, способствует достижению генетического разнообразия и повышению эффективности использования ресурсов [54].

В лаборатории генетики и биотехнологии растений ФГБОУ ВО Вавиловский университет ведутся исследования по ускорению выращивания сортообразцов озимой пшеницы и тритикале на основе сочетания технологии «Speed Breeding» и «Embryo culture». Дополнительное сокращение периода вегетации может быть достигнуто яровизацией растений, полученных из зародышей и культивируемых *in vitro* (метод «Embryo culture»).

В качестве материала для исследований использовали 4 генотипа пшеницы озимой и 8 генотипов тритикале, из которых 4 предположительно являются двуручками. Растения яровизировали при температуре +4°C в течение 20, 30, 40, 50 или 60 суток, а затем высаживали в гидропонную систему в фитотронно-тепличный комплекс. В процессе исследований было установлено, что для двух из четырех генотипов озимой пшеницы продолжительность *in vitro*-яровизации составляла не менее 50 суток. У растений после 50 и 60 суток яровизации продуктивная кустистость и масса зерна с колоса достоверно не различались.

У озимых форм тритикале период эффективной *in vitro*-яровизации также составлял не менее 50 суток, при этом, устойчивое колошение (более 50% растений) отмечено наблюдалось только после 60 суток яровизации. В вариантах с разной продолжительностью яровизации растения не различались по продуктивной кустистости и массе зерна с колоса.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для эффективной яровизации растений, полученных из зародышей в культуре *in vitro*, продолжительность периода пониженных температур должна составлять не менее 50 суток, за исключением некоторых сортов-двуручек, для яровизации которых достаточно 20 суток в данных усло-

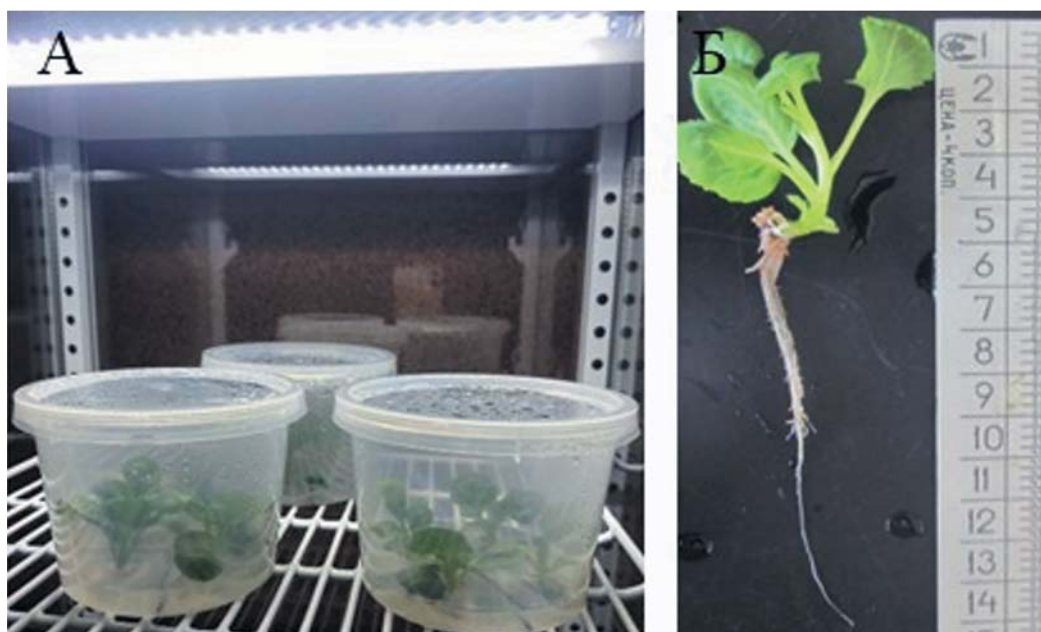


Рис. 5. Яровизация в условиях *in vitro*: а) растения в условиях *in vitro* в холодильной камере; б) растение-регенерант после прохождения яровизации (фото автора)

Fig. 5. Vernalization *in vitro*: a) plants *in vitro* in a refrigerated chamber; b) regenerated plant after vernalization (author's photo)

виях. Общую продолжительность генерации не удалось снизить менее чем до 150 суток [56, 57].

С помощью культуры ткани можно быстро получить семена у скороспелых форм кочанной капусты, если подвергнуть их яровизации в условиях *in vitro*. Чтобы растения достигли определенного уровня вегетативного роста и накопили достаточное количество питательных веществ, необходимых для яровизации двулетнего растения, следует не менее 50 дней проводить их подращивание в условиях высокой световой интенсивности при 25-27°C. За это время у растений в культуре *in vitro* успевают сформироваться 6-10 листьев. При более длительном подращивании растения израстают, междоузлия вытягиваются, стебель становится длинным, жестким.

В стадии 50-60 дней растения капусты в пробирках способны яровизироваться при воздействии низкой положительной температуры (1...2°C) и подсвечивания светом низкой интенсивности (1,5-3 тыс. лк). В ходе яровизации число листьев на растении увеличивается. При более высокой температуре происходит интенсивное дыхание и растения погибают.

Яровизация продолжается 3,5-4 месяца, после чего растения адаптируют к нестерильным условиям.

Семенные растения, полученные из пробирок, уступают обычным семенникам по мощности куста. Метод яровизации в пробирках следует применять только в селекционных целях при необходимости получения семенного потомства или проведения гибридизации с размножаемыми в культуре ткани формами.

Использование условий *in vitro* для яровизации растений является перспективным методом для практической селекции, однако для его применения ряд этапов нуждается в адаптации под каждую культуру и даже для отдельных генотипов (рис. 5) [58].

Выводы

Таким образом, яровизация является важным этапом в онтогенезе двулетних культур. Знание технологии яровизации позволит увеличить процент растений, образовавших

цветонос, важными элементами которой являются: температура, продолжительность, освещение, стадия развития растения.

Существенное влияние на развитие семенных растений, а также на количественные и качественные показатели семенной продуктивности оказывают условия культивирования маточников. Выращивание маточных растений в условиях защищенного и открытого грунта сопряжено с рядом лимитирующих факторов: отсутствием контроля над суточными температурами, повышенным риском поражения вредителями, болезнями, а также ограниченный период для проведения работ. В противоположность этому, использование климатических камер с регулируемыми параметрами температуры, влажности воздуха и фотопериода обеспечивает возможность непрерывного ведения селекционного процесса, независимо от внешних климатических условий.

Капуста белокочанная характеризуется отсутствием реакции на пониженные температуры на стадии семян и их прорастания, что обусловлено наличием выраженной ювенильной фазы. Традиционная методика яровизации на стадии сформированного кочана гарантирует высокий процент приживаемости маточных растений.

Самым актуальным направлением в настоящее время в селекции является метод «Speed Breeding», который позволяет создавать сорта сельскохозяйственных культур в более короткие сроки.

Использование ранних стадий развития для прохождения яровизации на стадии штеклинга и в культуре *in vitro*, является перспективным методом для практической селекции, однако для его применения ряд этапов нуждается в адаптации под каждую культуру и даже для отдельных генотипов. У всех способов ускорения основная цель – получение семенного потомства, минуя стадию получения товарного органа растения, по которому ведется отбор. Поэтому они могут использоваться только для размножения линейного материала с последующим переводом на двулетний цикл развития, чтобы оценить хозяйственно ценные признаки.

• Литература

1. Солдатенко А.В., Иванова М.И., Бондарева Л.Л., Тареева М.М. Капустные зеленные овощи. М., 2022. 296 с. ISBN 978-5-901695-89-0. <https://www.elibrary.ru/unsafi>
2. Tons M.M. World Cabbage Production, 2015-2019.
3. Пивоваров В.Ф., Старцев В.И. Капуста, её виды и разновидности (разнообразие и способы выращивания). М.: ВНИИССОК. 2006. 192с. <https://www.elibrary.ru/qkxxur>
4. Taiz L., Zeiger E. Plant Physiology. Sunderland: Sinauer Associates Inc. 2010.
5. Dunwell J.M. Haploids in flowering plants: origins and exploitation. *J. Plant Biotech.* 2010;8:377-424. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00498.x>
6. Минейкина А.И., Бондарева Л.Л., Шумилина Д.В., Домблдес Е.А., Солдатенко А.В. Усовершенствование методов создания гибридов капусты белокочанной. *Овощи России.* 2019;(4):3-7. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-4-3-7> <https://www.elibrary.ru/faxajs>
7. Минейкина А.И., Стебническая К.С., Фомичева М.Г., Бондарева Л.Л., Домблдес А.С., Домблдес Е.А. Оптимизация этапов технологии получения ДН-растений капусты белокочанной. *Вавиловский журнал генетики и селекции.* 2025;29(4):517-529. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-55> <https://www.elibrary.ru/gzdtco>
8. Монахос С.Г. Создание чистых линий – удвоенных гаплоидов капусты в культуре изолированных микроспор и селекция F1-гибридов на основе современных методов биотехнологии: методические рекомендации. М.: Изд-во РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2014. 44 с.
9. Никитин М.А. Использование технологии удвоенных гаплоидов в современной селекции капустных культур. *Естественные науки.* 2024;(4).
10. Вишнякова А.В., Александрова А.А., Монахос С.Г. Факторы прямого прорастания микроспорогенных эмбрионов *Brassica napus* L. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2022;(6):43-53. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-6-43-53> <https://www.elibrary.ru/bifbsl>
11. Синицына А.А., Вишнякова А.В., Монахос С.Г. Сравнительная оценка выхода удвоенных гаплоидов *Brassica oleracea* var. *capitata* L. и *Brassica napus* L. в культуре изолированных микроспор. *Картофель и овощи.* 2022;(4):37-40. <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.29.31.008> <https://www.elibrary.ru/hafnfc>
12. Čeran M., Miladinović D., Đorđević V., et al. Genomics-assisted speed breeding for crop improvement: present and future. *Front. Sustain. Food Syst.* 2024;(8):1383302. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1383302>
13. Заблочная Е.А., Минейкина А.И., Домблдес Е.А., Паслова Т.О., Бондарева Л.Л. Завязываемость семян у растений-регенерантов капусты брокколи различных генотипов при гейтеногамном опылении. *Овощи России.* 2020;(2):43-46. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-2-43-46> <https://www.elibrary.ru/haksxw>
14. Suge H. Re-examination on the role of vernalization and photoperiod in the flowering of *Brassica* crops under controlled environment. *Jpn. J. Breeding.* 1984;(34):171-180.
15. Осадчая Т.С., Трубочева Н.В., Кравцова Л.А., Белан И.А., Россеева Л.П., Першина Л.А. Изучение фертильности и цитогенетической изменчивости у андрогенных растений (R0 и R1) аллоплазматических интрогрессивных линий мягкой пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции.* 2016;20(3):370-377. <https://doi.org/10.18699/VJ16.165> <https://www.elibrary.ru/wlvkih>
16. Deimling S., Flehminghaus-Roux T. Haploidy in rye. In: Mohan Jain S., Sopory S.K., Veilleux R.E. (eds) *In vitro* haploid production in higher plants: Volume 4: Cereals. Kluwer Academic Publ, Dordrecht, The Netherlands, 1997. P. 181–204.
17. Guo Y., Pulli S. Isolated microspore culture and plant regeneration in rye (*Secale cereale* L.). *Plant Cell Reports.* 2000;(19):875–880. <https://doi.org/10.1007/s002990000194>
18. Lashermes P., Couturon E., Charrier A. Doubled haploids of *Coffea canephora*: development, fertility and agronomic characteristics. *Euphytica.* 1993;(74):149–157. <https://doi.org/10.1007/BF00033781>
19. Stipic M., Campion, B. An improved protocol for androgenesis in cauliflowers (*Brassica oleracea* var. *botrytis*). *J. Plant Breeding.* 1997;116(2):153-157.
20. Chauvin J.E., Yang Q., LeJeune B., Herve Y. Obtention d'embryons par culture d'anthers chez le chou-fleur et le brocoli et evaluation des potentialites du materiel obtenu pour la creation varietale. *Agronomie.* 1993;(13):579-590.
21. Kamiński P., Dyki B., Krzyzanowska D., Gyrecka K. Diversity of diploid androgenic Brussels sprout plants of R₀ and R₁ generations. *J. of Applied Genetics.* 2005;46(1):25-33.
22. Kaminski P. Gametoclonal and somaclonal variation among head cabbage androgenic lines of R₁ and R₂ generations obtained from Jaguar F₁ hybrid. *J. of Agricultural Science.* 2011;2(2):119-128. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n2p119>
23. Заблочная Е.А., Бондарева Л.Л., Шмыкова Н.А. Особенности завязывания семян у линий удвоенных гаплоидов капусты брокколи в разных поколениях. *Овощи России.* 2016;4(33):56-59. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2016-4-56-59> <https://www.elibrary.ru/xvrufn>
24. Бартенев И.И., Гаврин Д.С., Нечаева О.М., Сенютин А.А. Разнородность популяции семенных растений и качественные показатели семян сахарной свёклы. *Saxar.* 2018;(10):46-49. <https://www.elibrary.ru/yoxutr>
25. Лизгунова Т.В. Капуста. Овощные культуры и кормовые корнеплоды. Л.: Колос, 1948. 245 с.
26. Ahn J.-Y., Subburaj S., Yan F., Yao J., Chandrasekaran A., Ahn K.-G., Lee G.-J. Molecular Evaluation of the Effects of FLC Homologs and Coordinating Regulators on the Flowering Responses to Vernalization in Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) Genotypes. *Genes.* 2024;(15):154. <https://doi.org/10.3390/genes15020154>
27. Alessandro M.S., Galmarini C.R. Inheritance of vernalization requirement in carrot. *Journal of the American Society for Horticultural Science.* 2007;132:525-529.
28. Miller J.C. Louisiana Copenhagen cabbage: methods of breeding and description. 1934.
29. Василевская В.К., Лизгунова Т.В. Некоторые особенности стадийного развития сортов капусты. *Труды по прикл. бот., ген. и сел.* 1951;29(1).
30. Sheen T.F. Cabbage seed production in the subtropics. 1982.
31. Лизгунова Т.В. Культурная флора СССР. Т. XI. Капуста. Л.: Колос. Ленингр. отд-ние. 1984. 328 с.
32. Воронова А.Ф., Гринберг Е.Г., Доманская М.К. Биохимическая оценка коллекции овощных культур. Науч.-технол. Бюл. Сиб. НИИ растениеводства и селекции. 1978;(4).
33. Gassner G. Beitrage zur physiologischen Charakteristik sommer- und winterannueller Gewachse, insbesondere der Getreidepflanzen. Bot. Ztg. 1918.
34. Кузнецов Вл.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2006. 742 с.
35. Black A., Moot D., Lucas R. Development and growth characteristics of Caucasian and white clover seedlings, compared with perennial ryegrass. *Grass and Forage Science.* 2006;(61):442-453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00553.x>
36. Monks D.P., SadatAsilan K., Moot D.J. Cardinal temperatures and thermal time requirements for germination of annual and perennial temperate pasture species. *Agronomy New Zealand.* 2009;(39):95-110. <https://doi.org/10.13140/2.1.1455.4242>
37. EL-Eslamboly A.A.S.A., Hamed H.H. New techniques to induce flowering and produce seeds of foreign cabbage varieties as a main step for a superior hybrids production. *Int. J. Environ.* 2021;10(1):66-82. <https://doi.org/10.36632/ije.2021.10.1.6>
38. McCormick J.L., Goodger R.A., Chynoweth R.J. Cardinal temperatures and vernalisation requirements for a selection of vegetables for seed production. 2014. P.1-83.
39. Elers B., Wiebe H.J. Flower formation of Chinese cabbage. I. Response to vernalization and photoperiods. *Scientia horticulturae.* 1984;22(3):219-231.
40. Китаева И.Е. Капуста. Московский рабочий. 1977. С. 57-61.
41. Лизгунова Т.В. Культурная флора СССР. Т. VI.
42. Шуляк Н.В., Королева С.В. Реакция инбредных линий белокочанной капусты на погодные условия в период яровизации. Приоритетные направления научного обеспечения отраслей агропромышленного комплекса России и стран СНГ. Материалы Международной научно-практической конференции с элементами школы молодых ученых. Краснодар, 2018. С 135-141. <https://www.elibrary.ru/bcdiok>
43. Бондарева Л.Л., Колесников И.М. Селекция скороспелых гибридов капусты белокочанной. *Научные труды по селекции и семеноводству.* 1995;(2):150-152.
44. Бондарева Л.Л., Разин О.А. Использование камер искусственного климата при селекции капусты. *Овощи России.* 2014;(4):37-39. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2014-4-37-39> <https://www.elibrary.ru/tjalbt>
45. Бондарева Л.Л., Минейкина А.И. Ускоренное размножение

родительских линий капусты белокочанной с использованием штеклингов и камер искусственного климата. *Овощи России*. 2024;(5):26-30. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-5-26-30>
<https://www.elibrary.ru/mpabmg>
 46. Лизгунова Т.В., Федулова А.П. О яровизации капусты в семенах. *Труды по прикл. бот., ген. и сел.* 1954;(31):1.
 47. Michaels S.D., Amasino R.M. Memories of winter: vernalization and the competence to flower. *Plant, Cell & Environment*. 2000;23(11):1145-1153.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00643.x>
 48. Петрищев А.В. Использование контейнерного способа выращивания штеклингов при гибридном семеноводстве капусты белокочанной: специальность 06.01.05 "Селекция и семеноводство сельскохозяйственных растений". Москва, 2006. 156 с. <https://www.elibrary.ru/nnusjv>
 49. Зведенюк А.П., Казаку В.И. Выращивание семян капусты белокочанной из розеточных растений. *Овощи России*. 2013;(3):40-42. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2013-3-40-42>
<https://www.elibrary.ru/rbjtoj>
 50. Коньсбеков К., Бастаубаева Ш., Елназарқызы Р., Табынбаева Л., Мусагоджаев, Н. Выращивание штеклингов новых гибридов сахарной свеклы в тепличном комплексе. *Земледелие, агрохимия, кормопроизводство, агроэкология*. 2021;3(91):103–111. <https://doi.org/10.37884/3-2021/12>
 51. Логвинов А.В., Шевченко А.Г., Логвинов В.А., Мищенко В.Н., Кошкин С.С., Моисеев В.В., Батракова Н.В. Особенности технологических приемов выращивания корнеплодов-штеклингов маточной сахарной свеклы на орошении. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2020;(159):334-347. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-159-023>
<https://www.elibrary.ru/fpwgvyk>
 52. Пивоваров В.Ф. Селекция и семеноводство овощных культур. М.:ВНИИССОК, 2007. 816 с. <https://www.elibrary.ru/qkymcp>
 53. Бондарева Л.Л., Фролова С.Л. Особенности роста и развития семенных кустов сортов и родительских линий капустных культур. *Известия ФНЦО*. 2021;(3-4):13-19 <https://doi.org/10.18619/2658-4832-2021-3-4-13-19>
<https://www.elibrary.ru/reneek>
 54. Schoen A. et al. Reducing the generation time in winter wheat cultivars using speed breeding. *Crop Science*. 2023;63(4):2079-2090. <https://doi.org/10.1002/csc2.20989>
 55. Зеленина А.С., Яновский А.С., Бизякина Д.О., Нагамова В.М., Рубец В.С., Блинков А.О., Коробкова В.А., Юркина А.И., Беспалова Л.Ю., Карлов Г.И., Дивашук М.Г. Методические рекомендации по выращиванию твердой пшеницы в условиях спидбридинга (speed breeding) для решения селекционных задач. *Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии*. 2024. С. 27-28. <https://doi.org/10.48397/19911-9447-6788-e>
<https://www.elibrary.ru/sjyaeb>
 56. Watson A. et al. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. 2018;4(1):23-29. <http://dx.doi.org/10.1038/s41477-017-0083-8>
 57. Сайфетдинов Е.А. Влияние сроков яровизации *in vitro* на вегетацию озимой пшеницы и тритикале в условиях фитотронно-тепличного комплекса. Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием, посвященной биотехнологии в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии XXIV. Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 2024. С.116-117. <https://doi.org/10.48397/w4265-2672-9751-v>
<https://www.elibrary.ru/ioklty>
 58. Попова А.И., Тренихина М.М. Актуальные вопросы современной селекции, биотехнологии и ботаники. Сборник докладов всероссийской студенческой научно-практической конференции. Москва, 2024. 184 с. <https://www.elibrary.ru/hkacoz>

• References

1. Soldatenko A.V., Ivanova M.I., Bondareva L.L., Tareeva M.M. Cabbage green vegetables. M., 2022. 296 p. (In Russ.) ISBN 978-5-901695-89-0. <https://www.elibrary.ru/unsafi>
 2. Tons M.M. World Cabbage Production, 2015-2019.
 2. Пивоваров В.Ф., Старцев В.И. Капуста, её виды и разновидности (разнообразие и способы выращивания). М.: ВНИИССОК. 2006. 192 с. <https://www.elibrary.ru/qkxxur>

3. Taiz L., Zeiger E. Plant Physiology. Sunderland: Sinauer Associates Inc. 2010.
 4. Dunwell J.M. Haploids in flowering plants: origins and exploitation. *J. Plant Biotech.* 2010;8:377-424. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00498.x>
 5. Mineykina A.I., Bondareva L.L., Shumilina D.V., Domblides E.A., Soldatenko A.V. Improvement of methods of creating hybrids of cabbage. *Vegetable crops of Russia*. 2019;(4):3-7. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-4-3-7>
<https://www.elibrary.ru/faxajs6>
 6. Mineykina A.I., Stebnitskaia K.S., Fomicheva M.G., Bondareva L.L., Domblides A.S., Domblides E.A. Optimization of technology steps for obtaining white cabbage dh-plants. *Vavilov journal of genetics and breeding*. 2025;29(4):517-529. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-55>
<https://www.elibrary.ru/gzdtco>
 7. Monakhos S.G. Creation of pure lines – doubled haploids of cabbage in the culture of isolated microspores and selection of F1 hybrids based on modern biotechnology methods: methodological recommendations. M.: Publishing house RGAA - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2014. 44 p. (In Russ.)
 8. Nikitin M.A. The use of doubled haploid technology in modern cabbage crop breeding. *Natural sciences*. 2024;(4). (In Russ.)
 9. Vishnyakova A.V., Alexandrova A. A., Monakhos S. G. Factors of direct germination of microsporogenic embryoids *Brassica napus* L. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2022;(6):43-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-6-43-53>
<https://www.elibrary.ru/bifbsl>
 10. Sinicyna A.A., Vishnyakova A.V., Monakhos S.G. Comparative assessment of the yield of doubled haploids of *Brassica oleracea* var. *capitata* L. and *Brassica napus* L. in isolated microspore culture. *Potato and vegetables*. 2022;(4):37-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.29.31.008>
<https://www.elibrary.ru/hafnfc>
 11. Čeran M., Miladinović D., Đorđević V., et al. Genomics-assisted speed breeding for crop improvement: present and future. *Front. Sustain. Food Syst.* 2024;(8):1383302. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1383302>
 12. Zablotskaya E.A., Mineykina A.I., Domblides E.A., Paslova T.O., Bondareva L.L. Broccoli various genotypes regenerated plants (R₀) seed set after geitonogamy. *Vegetable crops of Russia*. 2020;(2):43-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-2-43-46>
<https://www.elibrary.ru/hakswx>
 13. Suge H. Re- examination on the role of vernalization and photoperiod in the flowering of *Brassica* crops under controlled environment. *Jpn. J. Breeding*. 1984;(34):171-180.
 14. Osadchaya T.S., Trubacheeva N.V., Kravtsova L.A., Belan I.A., Rosseeva L.P., Pershina L.A.. Study of fertility and cytogenetic variability in androgenic plants (R₀ and R₁) of alloplasmic introgression lines of common wheat. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(3):370-377. (In Russ.) <https://doi.org/10.18699/VJ16.165> <https://www.elibrary.ru/wlvkkih>
 15. Deimling S., Flehminghaus-Roux T. Haploidy in rye. In: Mohan Jain S., Sopory S.K., Veilleux R.E. (eds) *In vitro* haploid production in higher plants: Volume 4: Cereals. Kluwer Academic Publ, Dordrecht, The Netherlands, 1997. P. 181–204.
 16. Guo Y., Pulli S. Isolated microspore culture and plant regeneration in rye (*Secale cereale* L.). *Plant Cell Reports*. 2000;(19):875–880. <https://doi.org/10.1007/s002990000194>
 17. Lashermes P., Couturon E., Charrier A. Doubled haploids of *Coffea canephora*: development, fertility and agronomic characteristics. *Euphytica*. 1993;(74):149–157. <https://doi.org/10.1007/BF00033781>
 18. Stipic M., Campion, B. An improved protocol for androgenesis in cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis*). *J. Plant Breeding*. 1997;116(2):153-157.
 19. Chauvin J.E., Yang Q., LeJeune B., Herve Y. Obtention d'embryons par culture d'antheres chez le chou-fleur et le brocoli et evaluation des potentialites du materiel obtenu pour la creation varietale. *Agronomie*. 1993;(13):579-590.
 20. Kamiński P., Dyki B., Krzyżanowska D., Gyrecka K. Diversity of diploid androgenic Brussels sprout plants of R₀ and R₁ generations. *J. of Applied Genetics*. 2005;46(1):25-33.
 21. Kamiński P. Gametoclonal and somaclonal variation among head cabbage androgenic lines of R₁ and R₂ generations obtained from Jaguar F₁ hybrid. *J. of Agricultural Science*. 2011;2(2):119-128. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n2p119>
 22. Zablotskaya E.A., Bondareva L.L., Shmykova N.A. Features of seed formation in double haploid lines of broccoli in different genera-

- tions. *Vegetable crops of Russia*. 2016;(4):56-59. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2016-4-56-59>
<https://www.elibrary.ru/xvruftn>
23. Bartenev I.I., Gavrin D.S., Nechaeva O.M., Senyutin A.A. Heterogeneity of the seed plant population and qualitative indicators of sugar beet seeds. *Sugar*. 2018;(10):46-49. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/yoxutr>
24. Lizgunova T.V. Cabbage. *Vegetable crops and forage roots*. L.: Ear. 1948. 245 p. (In Russ.)
25. Ahn J.-Y., Subburaj S., Yan F., Yao J., Chandrasekaran A., Ahn K.-G., Lee G.-J. Molecular Evaluation of the Effects of FLC Homologs and Coordinating Regulators on the Flowering Responses to Vernalization in Cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) Genotypes. *Genes*. 2024;(15):154. <https://doi.org/10.3390/genes15020154>
26. Alessandro M.S., Galmarini C.R.. Inheritance of vernalization requirement in carrot. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2007;132:525-529.
27. Miller J.C. Louisiana Copenhagen cabbage: methods of breeding and description. 1934.
28. Vasilevskaya V.K., Lizgunova T.V. Some features of the stage development of cabbage varieties. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1951;29(1).
29. Sheen T.F. Cabbage seed production in the subtropics. 1982.
30. Lizgunova T.V. Cultivated flora of the USSR. L.: Ear. 1984;9:328. (In Russ.)
31. Voronova A.F., Grinberg E.G., Domanskaya M.K. Biochemical evaluation of a collection of vegetable crops. *Scientific and Technical Bulletin of the Siberian Research Institute of Plant Growing and Breeding*. 1978;(4). (In Russ.)
32. Gassner G. Beiträge zur physiologischen Charakteristik sommer- und winterannueller Gewächse, insbesondere der Getreidepflanzen.- Bot. Ztg, 1918, 10.
33. Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. Plant physiology. M.: Graduate School. 2006. 742 c.
34. Black A., Moot D., Lucas R. Development and growth characteristics of Caucasian and white clover seedlings, compared with perennial ryegrass. *Grass and Forage Science*. 2006;(61):442-453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00553.x>
35. Monks D.P., SadatAsilan K., Moot D.J. Cardinal temperatures and thermal time requirements for germination of annual and perennial temperate pasture species. *Agronomy New Zealand*. 2009;(39):95-110. <https://doi.org/10.13140/2.1.1455.4242>
36. EL-Eslamboly A.A.S.A., Hamed H.H. New techniques to induce flowering and produce seeds of foreign cabbage varieties as a main step for a superior hybrids production. *Int. J. Environ*. 2021;10(1):66-82. <https://doi.org/10.36632/ije/2021.10.1.6>
37. McCormick J.I., Goodger R.A., Chynoweth R.J. Cardinal temperatures and vernalisation requirements for a selection of vegetables for seed production. 2014. P.1-83.
38. Elers B., Wiebe H.J. Flower formation of Chinese cabbage. I. Response to vernalization and photoperiods. *Scientia horticulturae*. 1984;22(3):219-231.
39. Kitaeva I. E. Moscow worker. 1977. P. 57-61. (In Russ.)
40. Lizgunova T.V. Cultivated flora of the USSR.T. VI. (In Russ.)
41. Shulyak N.V., Koroleva S.V. Response of inbred lines of white cabbage to weather conditions during vernalization. Priority areas of scientific support for the agro-industrial complex of Russia and the CIS countries. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference with Elements of the School of Young Scientists*. Krasnodar, 2018. pp. 135-141. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/bcdiok>
42. Bondareva L.L., Kolesnikov I.M. Selection of early-ripening hybrids of white cabbage. *Scientific works on selection and seed production*. 1995;(2):150-152. (In Russ.)
43. Bondareva L.L., Razin O.A. Use of growth chambers for cabbage breeding. *Vegetable crops of Russia*. 2014;(4):37-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2014-4-37-39>
<https://www.elibrary.ru/tjalbt>
44. Bondareva L.L., Mineykina A.I. Accelerated reproduction of the parental lines of white cabbage using rosette plants (steckling) and artificial climate chambers. *Vegetable crops of Russia*. 2024;(5):26-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-5-26-30>
<https://www.elibrary.ru/mpabmg>
45. Lizgunova T.V. Fedulova A. P. On the vernalization of cabbage in seeds. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1954;31(1). (In Russ.)
46. Michaels S.D., Amasino R.M. Memories of winter: vernalization and the competence to flower. *Plant, Cell & Environment*. 2000;23(11):1145-1153. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00643.x>
47. Petrishchev A.V. Using container growing of stecklings in hybrid seed production of white cabbage. Moscow. 2006. 156 p. <https://www.elibrary.ru/nnusjv> (In Russ.)
48. Zvedenyuk A.P., Kazaku V.I. White head cabbage seeds growing from rosette plants. *Vegetable crops of Russia*. 2013;(3):40-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2013-3-40-42>
<https://www.elibrary.ru/rbjtoj>
49. Konyzbekov K., Bastaubaeva Sh., Elnazarkyzy R., Tabynbaeva L., Musagodzhaev N. Growing new sugar beet hybrid stecklings in a greenhouse complex. *Izdenister Natigeler*. 2021;3 (91):103-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.37884/3-2021/12>
50. Logvinov A.V., Shevchenko A.G., Logvinov V.A., Mishchenko V.N., Koshkin S.S., Moiseev V.V., Batrakova N.V. Peculiarities of technological methods of growing crops-shteklings of mother sugar beet on irrigation. *Polythematic online scientific journal of Kuban state agrarian university*. 2020;(159):334-347. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-159-023>
<https://www.elibrary.ru/fpwgkv>
51. Pivovarov V.F., Breeding and seed production of vegetable crops. M.: VNISSOK, 2007. 816 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qkymcp>
52. Bondareva L.L., Frolova S.L. Features of growth and development of seed bushes of varieties and parental lines of cabbage crops. *News of FSVC*. 2021;(3-4):13-19. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2658-4832-2021-3-4-13-19>
<https://www.elibrary.ru/reneek>
53. Schoen A. et al. Reducing the generation time in winter wheat cultivars using speed breeding. *Crop Science*. 2023;63(4):2079-2090. <https://doi.org/10.1002/csc2.20989>
54. Zelenina A.S., Yanovskii A.S., Bizyakina D.O., Nagamova V.M., Rubets V.S., Blinkov A.O., Korobkova V.A., Yurkina A.I., Bepalova L.Yu., Karlov G.I., Divashuk M.G. Methodological recommendations for growing durum wheat under speed breeding conditions to solve breeding problems. *Biotechnology in crop production, animal husbandry and agricultural microbiology*. 2024. P. 27-28. (In Russ.) <https://doi.org/10.48397/19911-9447-6788-e>
<https://www.elibrary.ru/sjyaeb>
55. Watson A. et al. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. 2018;4(1):23-29. <http://dx.doi.org/10.1038/s41477-017-0083-8>
56. Saifetdinov, E. AThe influence of in vitro vernalization timing on the vegetation of winter wheat and triticale in a phytotron-greenhouse complex. *Proceedings of the 24th Conference of Young Scientists with International Participation, Dedicated to Biotechnology in Plant Production, Animal Husbandry, and Agricultural Microbiology*. Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology". 2024. P.116-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.48397/w4265-2672-9751-v>
<https://www.elibrary.ru/ioklty>
57. Popova A.I., Trenikhina M.M. Current issues of modern breeding, biotechnology and botany. *Collection of reports of the All-Russian student scientific and practical conference*. M.: Russian State Agrarian University. 2024. 184 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/hkacoz>

Об авторах:

Светлана Леонидовна Фролова – младший научный сотрудник лаб.

Молекулярно-иммунологических исследований,

<https://orcid.org/0000-0002-2680-9938>, SPIN-код: 6089-4491,

автор для переписки, svetlanaleonidovna95@gmail.ru

Людмила Леонидовна Бондарева – доктор с.-х. наук,

зав. лаб. селекции и семеноводства капустных культур,

<https://orcid.org/0000-0002-0912-5913>,

SPIN-код: 6679-0168,

lyuda_bondareva@mail.ru

About the Authors:

Svetlana L. Frolova – Junior Researcher

of the Laboratory of Molecular Immunological Research.,

<https://orcid.org/0000-0002-2680-9938>,

SPIN-code: 6089-4491,

Corresponding Author, svetlanaleonidovna95@gmail.ru

Lyudmila L. Bondareva – Dr. Sci. (Agriculture), Head of Laboratory Cole Crop

Breeding and Seed Production,

<https://orcid.org/0000-0002-0912-5913>,

SPIN-code: 6679-0168, lyuda_bondareva@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-60-67>
УДК: 635.64-02:631.524.86(571.63)

Е.Г. Козарь*, Н.А. Синиченко²,
О.Н. Пышная¹, И.А. Енгальчева¹

¹Федеральное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ
ФНЦО)
143072, Россия, Московская область, Одинцовский
район, пос. ВНИИССОК,
ул. Селекционная, 14

²Приморская овощная опытная станция –
филиал Федерального государственного
научного учреждения «Федеральный научный центр
овощеводства»
692779, Россия, Приморский край,
г. Артем, с. Суражэвка, ул. Кубанская, д.57/1

*Автор для переписки: kozar_eg@mail.ru

Финансирование. Работа выполнена в рамках
Государственных заданий: FGGF-2024-0010-02
«Создать сорта томата с урожайностью не менее
40 т/га, устойчивые к грибным и бактериальным гнилям
плодов, обладающих общей или адаптивной способ-
ностью к определенным условиям выращивания и с
дифференциацией назначения по использованию»;
FGGF-2025-0003 «Разработка эффективных технологий
предварительного скрининга и выделения ген-источни-
ков для создания сортов и гибридов овощных и бахче-
вых культур с групповой устойчивостью к доминиру-
ющим фитопатогенам на основе иммунологических и
молекулярно-генетических методов».

Вклад авторов. Козарь Е.Г.: концептуализация, адми-
нистрирование данных, создание рукописи и ее редак-
тирование. Синиченко Н.А.: проведение исследования,
формальный анализ, создание черновика рукописи.
Пышная О.Н.: руководство исследованием, создание
рукописи и ее редактирование. Енгальчева И.А.: адми-
нистрирование данных, создание рукописи и ее редак-
тирование.

Конфликт интересов. Пышная О.Н. является членом
редакционной коллегии журнала «Овощи России» с
2008 года, но не имеет никакого отношения к решению
опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в
журнале процедуру рецензирования. Об иных конфлик-
тах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Козарь Е.Г., Синиченко Н.А.,
Пышная О.Н., Енгальчева И.А. Создание исходного
материала томата с устойчивостью к альтернариозу и
комплексом хозяйственно ценных признаков для созда-
ния сортов в условиях Приморского края Дальнего
Востока. *Овощи России*. 2025;(6):60-67.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-60-67>

Поступила в редакцию: 06.11.2025

Принята к печати: 05.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Elena G. Kozar*, Natalya A. Sinichenko²,
Olga N. Pyshnaya¹, Irina A. Engalycheva¹

¹FSBSI Federal Scientific
Vegetable Center (FSBSI FSVS)
14, Selektionnaya str., VNISSOK,
Odintsovo region, Moscow district, 143072, Russia

²Primorskaya vegetable experimental station –
branch of the Federal state budgetary scientific institution
«Federal Scientific Vegetable Center»
(PVES – branch of the FSBSI FSVS)
57/1, Kubanskaya st., Surazhevka,
Artem, Primorsky kray, 6927792, Russia

*Corresponding Author: kozar_eg@mail.ru

Funding. The work was carried out within the framework of
the State Tasks: FGGF-2024-0010-02 "Create tomato varie-
ties with a yield of at least 40 t/ha, resistant to fungal and
bacterial fruit rot, possessing general or adaptive capacity to
specific growing conditions and with differentiation of intend-
ed use"; FGGF-2025-0003 "Development of effective tech-
nologies for pre-breeding screening and gene source isola-
tion for the creation of varieties and hybrids of vegetable and
melon crops with group resistance to dominant phy-
topathogens based on immunological and molecular genet-
ic methods".

Authors' Contribution: Kozar E.G.: conceptualization,
methodology, data curation, review & editing. Sinichenko
N.A.: investigation, visualization, formal analysis, writing –
original draft. Pyshnaya O.N.: supervision, writing – review
& editing. Engalycheva I.A.: data curation, writing – review &
editing.

Conflict of interest. Pyshnaya O.N. has been a member of
the editorial board of the Journal "Vegetable crops of
Russia" since 2008, but had nothing to do with the decision
to publish this manuscript. The manuscript passed the jour-
nal's peer review procedure. The authors declare no other
conflicts of interest.

For citation: Kozar E.G., Sinichenko N.A., Pyshnaya O.N.,
Engalycheva I.A. Creation of tomato source material with
resistance to *Alternaria* and a complex of economically valu-
able traits for the development of varieties in the conditions
of the Primorsky Krai of the Far East. *Vegetable crops of
Russia*. 2025;(6):60-67. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-60-67>

Received: 06.11.2025

Accepted for publication: 05.12.2025

Published: 18.12.2025

Создание исходного материала томата с устойчивостью к альтернариозу и комплексом хозяйственно ценных признаков для создания сортов в условиях Приморского края Дальнего Востока

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Поражение *Solanum lycopersicum* L. альтернариозом, вызываемого микромицетами рода *Alternaria* в условиях муссонного климата Приморского края носит стабильно вредоносный характер. Сезоны с аномально высоким уровнем осадков, провоцируют развитие эпифитотий, в результате чего ежегодные потери урожая могут превышать 30%, достигая у восприимчивых сортов и гибридов 80%. В связи с изменением климата и повышением агрессивности новых рас возбудителей поиск источников устойчивости для селекции всегда остается актуальным.

Цель работы – создание и оценка нового исходного материала, адаптированного к высокому инфекционному фону альтернариоза с различным сочетанием других селекционных признаков.

Материал и методы. Работу проводили в 2020–2025 годах на опытном поле Приморской овощной опытной станции – филиала ФГБНУ ФНЦО на лугово-бурых почвах с тяжелым механическим составом. Изучены 23 линии томата, полученные путем последовательных отборов из расщепляющихся потомств F₂₄ гибридных комбинаций Оттава 30 (линия Л8) с родительскими детерминантными линиями (Л3–Л7), созданными на основе лучших сортов селекции ФГБНУ ФНЦО, сочетающие разнообразие по массе, форме и окраске плодов. Агротехника выращивания – общепринятая для Приморского края. В период вегетации проводили фенологические наблюдения, фитопатологическую оценку, учеты проявления целевых признаков.

Результаты. Испытание созданных линий томата позволила дифференцировать их по селекционной ценности как исходного материала для разных направлений селекции. В качестве перспективного исходного материала для селекции на устойчивость к альтернариозу выделено пять линий: ГК-68/20/26, ГК-87/13/14, ГК-48/1/1, ГК-48/1/2 и ГК-85/3/3. Источниками сочетания таких признаков, как продуктивность, крупноплодность высокое качество плодов могут служить линии ГК-85/3/1, ГК-86/1/1 и ГК-87/1/1. Внедрение нового материала в селекционную практику позволит создать конкурентноспособные устойчивые к альтернариозу сорта и гибриды, минимизировать зависимость агротехнологий от многократных химических обработок, снизить потери продукции и обеспечить устойчивое производство томата, отвечающего требованиям рынка как по продуктивности, так и питательной ценности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Solanum lycopersicum, томат, исходный материал, гибридная комбинация, линии, альтернариоз, устойчивость, качество плодов

Creation of tomato source material with resistance to *Alternaria* and a complex of economically valuable traits for the development of varieties in the conditions of the Primorsky Krai of the Far East

ABSTRACT

Relevance. The infection of *Solanum lycopersicum* L. by *Alternaria*, caused by micromycetes of the genus *Alternaria*, is consistently harmful in the monsoon climate of Primorsky Krai. Seasons with abnormally high rainfall levels trigger the development of epiphytotic, resulting in annual crop losses exceeding 30% and reaching 80% in susceptible varieties and hybrids. Due to climate change and the increasing aggressiveness of new pathogen races, the search for sources of resistance for breeding remains relevant.

The purpose of this work is to create and evaluate a new source material that is adapted to a high background of *Alternaria* infection and has a different combination of other selection traits.

Material and Methods. The work was carried out in 2020–2025 on the experimental field of the Primorskaya Vegetable Experimental Station – a branch of the Federal Scientific Vegetable Center on meadow-brown soils with a heavy mechanical composition. 23 tomato lines were studied, obtained by successive selections from the splitting offspring of F₂₄ hybrid combinations of Ottawa 30 (line L8) with parental determinate lines (L3–L7), created on the basis of the best varieties of breeding of FSBSI FSVS, combining the variety in the mass, shape and color of the fruit. The cultivation technology is the generally accepted for Primorsky Krai. During the vegetation period, phenological observations, phytopathological assessment of the records of the manifestation of target features were carried out.

Results. Testing of the created tomato lines allowed to differentiate them by breeding value as a source material for different directions of breeding. Five lines were selected as a promising source material for breeding for resistance to *alternaria*: GK-68/20/26, GK-87/13/14, GK-48/1/1, GK-48/1/2 and GK-85/3/3. The GK-85/3/1, GK-86/1/1, and GK-87/1/1 lines can serve as sources of a combination of traits such as productivity, large fruit size, and high fruit quality. The introduction of this new material into breeding practices will allow for the creation of competitive varieties and hybrids that are resistant to *Alternaria*, minimizing the dependence of agricultural technologies on repeated chemical treatments, reducing product losses, and ensuring sustainable production of tomatoes that meet market requirements for both productivity and nutritional value.

KEYWORDS:

Solanum lycopersicum, tomato, source material, hybrid combination, lines, *alternaria*, resistance, fruit quality

Введение

Предполагаемый центр происхождения рода *Solanum lycopersicon* – это Галапагосские острова, но единого мнения по этому вопросу на сегодняшний момент нет [1,2]. Тем не менее, томат является одной из наиболее детально изученных культурных растений. Его ботанические и морфологические характеристики систематизированы и описаны еще в ранних классических работах, в частности Д. Д. Брежневым [3], а видовое разнообразие секции *Lycopersicon* хорошо документировано и широко используется в селекционной практике. В медицине плоды томата признаны продуктом с лечебными свойствами, благодаря высокому содержанию биологически активных соединений, прежде всего ликопина – мощного антиоксиданта, а клинические исследования свидетельствуют о наличии обратной корреляции между регулярным потреблением томата и риском развития сердечно-сосудистых заболеваний, сахарного диабета 2-го типа [4,5], что подтверждает его потенциальную роль в профилактической и нутрицевтической медицине [6].

Томат представляет собой ценную овощную культуру, вносящую существенный вклад в обеспечение продовольственной безопасности и укрепление здоровья населения. Однако, высокая восприимчивость многих современных сортов и гибридов к болезням ограничивает стабильность урожая и снижает качество продукции, особенно в условиях интенсивного возделывания и изменяющегося климата [7,8]. В условиях Дальневосточного Приморья проблема устойчивости томата к альтернариозу, от которого потери урожая ежегодно достигают 30% и более, стоит особо остро [9].

Установлено, что в условиях Приморского края Дальнего Востока альтернариоз достигает максимальной интенсивности при температуре 15–25 °C и обильных осадках, особенно в июне и августе при высоком гидротермическом коэффициенте, где динамика распространения инфекции по декадам в первую очередь зависит от количества выпавших осадков [10]. В этих условиях возрастает необходимость целенаправленной селекционной работы, ориентированной на создание нового исходного материала, сочетающего высокую устойчивость к биотическим стрессам, что позволит селекционерам получить конкурентоспособные сорта и гибриды, отвечающие как требованиям устойчивого растениеводства, так и запросам современного рынка здорового питания [11,12]. Исходя из этого, целью нашей работы было создание нового исходного материала с устойчивостью к альтернариозу, адаптированного к условиям Приморского края, с различным сочетанием других селекционных признаков.

Материалы и методы

Условия проведения исследований. Полевые исследования осуществлялись в течение 2020–2025 гг. в условиях прибрежной зоны Приморского края на опытном поле Приморской овощной опытной станции – филиала ФГБНУ ФНЦО (с. Суражевка, Артемовский городской округ). Участок, где проводили исследования расположен на лугово-бурых почвах с тяжелым механическим составом.

Вегетационные сезоны в годы исследований (2020–2025 гг.) характеризовались жарким летом, с превышением температурных норм относительно среднесезонных значений. Исключение составил 2020 год, когда температурный режим соответствовал среднесезонным данным. Режим увлажнения в годы исследований характеризовался дефицитом осадков только в 2021 году. В остальные периоды наблюдался их устойчивый избыток, достигший максимального значения в 2023 году, когда сумма месячных осадков (543 мм) значительно превысила среднесезонную норму (130 мм).

Агротехника выращивания – общепринятая для Приморского края. Семена высевали вручную на гряды в необогреваемой пленочной теплице по маркерным линиям с расстоянием между рядами 10 см и заделывали на глубину 2–3 см, присыпая смесью дерновой почвы и песка. Рассадку высаживали в поле вручную по маркерным бороздкам в первой декаде июня по схеме 90х90х35 см. Размер и размещение делянок – в соответствии с требованиями стандарта ОСТ 46-71-79. В течение вегетации проводили не менее 2-х междурядных обработок и 2-х ручных прополок. Обработку пестицидами (фунгициды, инсектициды, гербициды) не применяли.

Материал исследований: 23 линии томата, полученные путем последовательных отборов из расщепляющихся потомств F₂₋₄ гибридных комбинаций коллекционного образца Оттава 30 (линия Л8) с родительскими детерминантными линиями, созданными на основе лучших сортов селекции ФГБНУ ФНЦО, сочетающие достаточно высокую массу плода и разнообразие по форме и окраске плодов (табл. 1).

Характеристика родительских линий по устойчивости к альтернариозу и другим селекционным признакам: Л8 (Оттава-30) – проявляет высокую устойчивость к болезням, индетерминантный тип роста, мелкоплодная, использована как донор устойчивости при создании новых генотипов; Л3 – салатная линия с относительной устойчивостью к фитофторозу и средней восприимчивостью к альтернариозу, отобрана как источник желтой окраски плодов и компактности расте-

Таблица 1. Характеристика признаков плода родительских линий, включенных в гибридизацию
Table 1. Characterization of fruit traits of parental lines involved in hybridization

Родительская линия	Исходная сортопопуляция	Признаки плода		
		масса, г	цвет	форма
Л3	Росинка	30-45	желтая	округлая
Л4	Грот	75-90	красная	округлая
Л5	Лотос	70-85	розовая	плоско-округлая
Л6	Чаровница	60-75	оранжевая	овально-округлая
Л7	Фитилёк	55-60	оранжевая	цилиндрическая
Л8	Оттава 30	18-21	розовато-красная	округлая

ний; Л4 – среднеранняя линия салатного назначения; включена в селекционный процесс как донор раннеспелости и продуктивности, хотя в годы эпифитотий в Приморье проявляла восприимчивость к болезням; Л5 – линия салатного типа, характеризуется средней урожайностью и относительной устойчивостью к фитофторозу в условиях Приморского края; использована как источник розовой окраски плодов; Л6 – универсальная линия с высокой товарностью плодов; средневосприимчива к альтернариозу и относительной устойчивостью к фитофторозу; Л7 – высокопродуктивная универсальная линия, толерантная к альтернариозу; отличается плодами универсального назначения с повышенным содержанием β -каротина.

Гибридизацию проводили вручную по полной диллельной схеме, согласно действующим методическим пособиями. Отборы из полученных 14 гибридных комбинаций (ГК) от прямых и обратных скрещиваний с линией Л8 были проведены по следующей схеме: $F_{114}(\text{ГК}) \rightarrow F_2$ 10 образцов (из 10 ГК) $\rightarrow F_3$ 9 образцов (из 7 ГК) $\rightarrow F_4$ 23 линии (из 6 ГК).

Наблюдения и учеты. В течение вегетационного периода 2025 года выполняли фенологические наблюдения для определения группы скороспелости, а также морфологическое описание плодов (по окраске, форме и массе), учёт продуктивности и товарности плодов стандартными методами [13].

Фитомониторинг и оценку устойчивости к болезням на естественном инфекционном фоне в полевых условиях проводили в динамике визуальным способом по симптомам поражения листьев и плодов растений. Результаты фитосанитарного обследования выражали в виде следующих основных показателей: распространенность болезни (Р%); индекс (интенсивность) поражения (I, балл); степень развития болезни (R%). Интенсивность поражения растений оценивали в баллах по специальной шкале и рассчитывали индекс поражения образца (средний балл), используя четырехбалльную шкалу: 0 – отсутствие поражения, 1 – поражено до 10% поверхности, 2 – поражено от 11 до 25% поверхности, 3 – поражено от 26 до 50% поверхности, 4 – поражено более 50% поверхности [14,15,16].

Обработку экспериментальных данных выполняли методом дисперсионного анализа [17] с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010.

Достоверность разностей между вариантами определяли по критерию наименьшей существенной разности (НСР) при 5% уровне значимости.

Результаты и обсуждение

Оттава-30, обладая относительной устойчивостью к альтернариозу, имеет ряд негативных селекционных признаков, таких как индетерминантный тип роста и мелкоплодность. Индетерминантный тип является доминантным признаком, поэтому все гибриды первого поколения с этим сортом (далее – линия Л8) имели такой тип роста. В связи с этим, из расщепляющихся потомств F_{2-4} , проводили целенаправленный отбор не только по устойчивости к альтернариозу, но и по типу роста и массе плода. Также следует отметить, что несмотря на то, что в скрещиваниях участвовали в основном среднеспелые родительские формы, в расщепляющихся гибридных потомствах F_{2-4} были выделены и скороспелые формы. В результате последовательных отборов рекомбинантных форм из потомств F_{2-4} различных гибридных комбинаций с участием донора устойчивости сорта Оттава 30 (линия Л8) было получено 23 детерминантных линии томата с разным уровнем устойчивости к альтернариозу и различным сочетанием селекционно-ценных признаков, из которых 9 (39%) линий были раннеспелыми (Рсп), а 14 (61%) линий относились к среднеспелой (Ссп) группе (табл. 2).

По форме плода преобладали линии с округлыми плодами (65%), полученные в результате скрещивания линии Л8 с округлой формой, с линиями, имеющие плоды, округлой, овально-округлой и плоскоокруглой формы. В потомствах скрещиваний линии Л8 с линиями с овально-округлой и цилиндрической формой плодов были отобраны линии с цилиндрическими и овальными плодами, а также линии с оригинальной кубовидной и перцевидной формой. (рис. 1, табл. 2).

По окраске плода почти половина (43%) созданных линий имели красную или оранжево-красную окраску и были выделены практически из всех комбинаций скрещиваний линии Л8 (розовато-красные плоды) в том числе и при скрещивании с желтоплодной линией Л3. Доля таких линий в зависимости от комбинации составила от 20% до 80% (рис. 2). Следует отметить, что в потомствах комбинации линии Л8 с красноплодной линией Л4 были выделены рекомбинантные

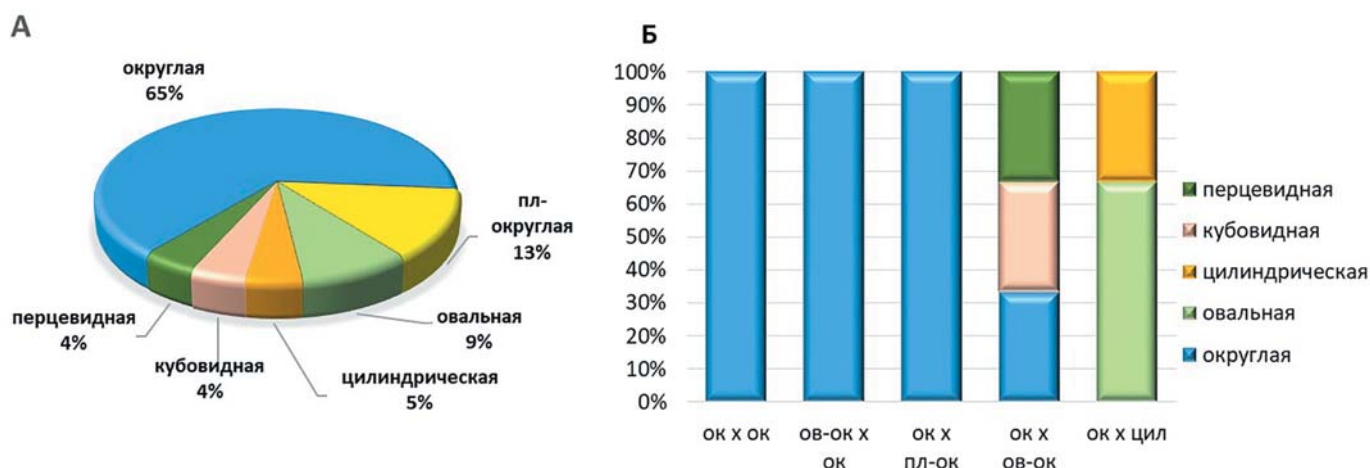


Рис. 1. Общее распределение линий (А) и их соотношение по форме плода в зависимости от комбинации скрещивания родительских компонентов: ок – округлая, ов-ок – овально-округлая, пл-ок – плоско-округлая, ц – цилиндрическая.
Fig. 1. The overall distribution of lines (A) and their ratio according to fruit shape depending on the combination of parental components: ок – round, ов-ок – ovate-round, пл-ок – flat-round, ц – cylindrical.

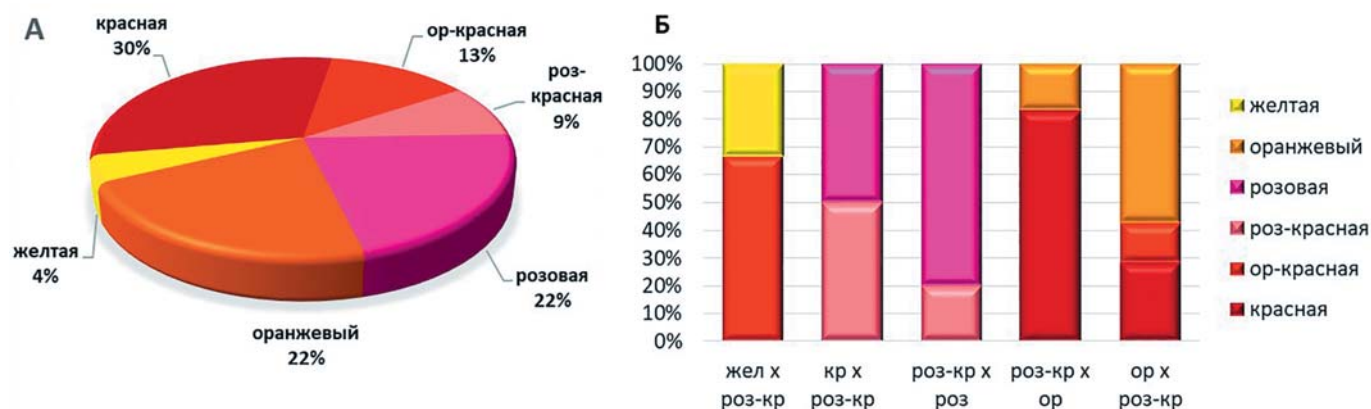


Рис. 2. Общее распределение линий томата (А) и их соотношение по окраске плода в зависимости от комбинации скрещивания родительских компонентов: ж – желтая, ор – оранжевая, роз – розовая, роз-кр – розовато-красная, кр – красная, ор-кр – оранжево-красная

Fig. 2. The overall distribution of tomato lines (A) and their ratio based on fruit color depending on the parental crossing combination: ж – yellow, ор – orange, роз – pink, роз-кр – pink-red, кр – red, ор-кр – orange-red

формы с розово-красной и розовой окраской плодов. Линии с оранжевой окраской плодов были получены, соответственно, из комбинаций с оранжевоплодными линиями Л6 и Л7 (рис. 2, табл. 2).

Масса плодов в изученной выборке линий характеризовалась широким размахом изменчивости – от 20 до 100 г. По этому признаку линии распределились в следующем соотношении: три линии (13%) с массой плода менее 30 г, пять линий (22%) с массой от 30 г до 50г, десять линий (43%) имели массу плодов 50-60г, а пять линий (22%) – с массой плодов 70-100 г. Крупноплодностью (70–100 г) отличались линии из ком-

бинаций Л6хЛ8, Л8хЛ6 и Л8хЛ5 – это ГК-68/20/25, ГК-86/1/1, ГК-86/30/35, ГК-86/30/36, ГК-85/3/1 (табл. 2).

Биохимический анализ плодов селекционных линий томата является важнейшим признаком при создании нового исходного материала, направленного на повышение устойчивости и функциональной ценности продукции. BRIX, % – показатель содержания растворимых твёрдых веществ в плодах, отражающий их технологическую пригодность и коррелирующий с содержанием сахаров. Значения этого показателя варьировали от 3,5% до 6,0%. Наиболее высокие показатели зафиксированы у линий: ГК-38/1/3 (6,0%), ГК-68/1/2 (5,9%), ГК-87/1/1 (5,9%), ГК-86/30/35 (5,9%) и ГК-67/2-

Таблица 2. Группа спелости и признаки плодов новых линий томата, созданных на основе различных комбинаций скрещивания с устойчивой линией Л8
Table 2. Ripeness groups and fruit characteristics of new tomato lines developed based on various crossing combinations with the stable line L8

ГК	Шифр линии	Группа с пелости	Высота растения, м	Признаки плода		
				форма	окраска	масса, г
Л4хЛ8	ГК-48/1/2	Ссп	110	округлая	розово-красная	20
	ГК-48/1/1	Ссп	110	округлая	розовая	20
Л3хЛ8	ГК-38/1/1	Ссп	80	округлая	желтая	30
	ГК-38/1/2	Ссп	80	округлая	оранжево-красная	30
	ГК-38/8/7	Рсп	60	округлая	оранжево-красная	25
Л6хЛ8	ГК-68/1/1	Ссп	70	округлая	оранжевая	50
	ГК-68/1/2	Ссп	70	округлая	желто-оранжевая	50
	ГК-68/1/3	Ссп	70	округлый	оранжевая	50
	Л/68/21/29	Рсп	70	округлая	красная	50
	ГК-68/20/25	Рсп	70	округлая	оранжевая	50
	ГК-68/20/26	Рсп	70	округлая	оранжево-красная	70
	ГК-68/21/28	Рсп	70	округлая	красный	50
Л8хЛ6	ГК-86/1/1	Рсп	80	перцевидная	красная	100
	ГК-86/30/35	Ссп	70	округлая	красная	74
	ГК-86/30/36	Рсп	75	кубовидная	красная	85
Л8хЛ7	ГК-87/1/1	Рсп	80	цилиндрическая	оранжевая	40
	ГК-87/13/14	Рсп	50	овальная	красная	34
	ГК-87/12/12	Ссп	50	овальная	красная	30
Л8хЛ5	ГК-85/3/1	Ссп	70	округлая	розовая	70
	ГК-85/3/2	Ссп	70	плоско-округлая	розовая	60
	ГК-85/3/3	Ссп	70	плоско-округлая	розовая	60
	ГК-85/4/4	Ссп	70	плоско-округлая	розово-красная	60
	ГК-85/36/37	Ссп	80	округлая	розовая	50

9 (5,4%). Минимальные значения – у линий ГК-68/20/25 и ГК-68/20/26 (3,5–3,8 %).

Содержание ликопина в мякоти плодов изменялось от 0,2 до 9,5 мг/100 г сырой массы. Высокие значения отмечены у линий ГК-87/1/1 (7,2 мг/100 г), ГК-85/1/1 (6,8 мг/100 г), а лидером является линия ГК-86/1/1, которая накапливает 9,5 мг/100 г, что значительно превышает все остальные линии. Низкое содержание ликопина, соответственно, отмечено в основном у желто- и оранжевоплодных линий ГК-38/1/3, ГК-38/1/4, ГК-68/20/25, ГК-68/20/26 ($\leq 1,5$ мг/100 г). Содержание каротина в плодах изменялось от 0,3 до 6,5 мг/100 г. Высоким его содержанием отличались линии ГК-67/2-9 – 6,5 мг/100 г, ГК-68/1/2 (5,8 мг/100 г), ГК-87/1/1 (6,0 мг/100 г), ГК-86/1/1 (5,2 мг/100 г); низким – линии ГК-38/1/3, ГК-38/1/4, ГК-68/20/25, ГК-68/20/26 ($\leq 1,0$ мг/100 г). Сумма хлорофиллов (a+b) является косвенным показателем степени зрелости или может свидетельствовать о замедленном достижении плодов полной биологической спелости. Наиболее низкие значения отмечены у линий ГК-38/1/3, ГК-38/1/4, ГК-68/20/25, ГК-68/20/26 ($\leq 0,1$ мг/100 г), которые характеризовались быстрым и равномерным созреванием плодов на растениях. Высокое содержание хлорофиллов в технической зрелости плодов выявлено у линий ГК-87/1/1 (1,1 мг/100 г) и ГК-67/2-9 (0,9 мг/100 г), что скорее всего указывает на замедленное их созревание.

Наиболее перспективными по комплексу качественных признаков (высокий BRIX, ликопин, каротин) как источников высокого качества плодов выделяются линии: ГК-86/1/1, ГК-87/1/1 и ГК-68/1/2, ГК-67/2-9, которые представляют интерес для дальнейшей селекционной работы, направленной на создание сортов и гибридов нового поколения, отвечающих современным требованиям здорового функционального питания.

Анализ результатов фитопатологического мониторинга, выполненного по трём последовательным учётам, позволил оценить уровень устойчивости линий томата на основе интегрального показателя – степени развития болез-

ни R, % (среднее за сезон), рассчитанного на основе распространенности (P, %), среднего индекса развития болезни (I, балл) и промежуточных показателей устойчивости (R, %) по каждому сроку. По данному показателю линии были распределены на следующие группы устойчивости (рис. 3):

- ВУ – три высокоустойчивые линии ($R \leq 30\%$) – ГК-48/1/2, ГК-48/1/1, ГК-87/13/14 ($R=28\%$), у которых, несмотря на последующее заражение, среднее значение R% осталось низким за счёт длительного «латентного периода» развития болезни при полном отсутствии симптомов на первом учёте, что превзошло стандарт устойчивости сорт Оттава 30 ($R=37\%$);

- ОУ – семь относительно устойчивых ($R=30–37\%$), включая стандарт Оттава-30 ($R=37\%$), с усилением развития болезни только на последних этапах вегетации (R%),

- Т – пять толерантных линий ($R=40–44\%$), с монотонным нарастанием степени поражения (R%), что свидетельствует о достаточно высокой их полевой устойчивости;

- СВ – восемь средневосприимчивых линий ($R=45–55\%$), у которых сдерживание развития патогена в течение вегетации после проникновения идет более эффективно, чем у стандарта восприимчивости сорта Талалихин –186 ($R=63\%$).

При анализе степени выровненности созданных линий по устойчивости к альтернариозу было установлено, что наименьшие значения коэффициента вариации V ($V = 0-6\%$) зафиксированы у 9 линий (ГК-48/1/2, ГК-48/1/1, ГК-38/1/4, ГК-38/8/7, ГК-68/1/2, ГК-68/1/3, Л/68/21/29, ГК-68/20/25, Л/68/21/28), причём у семи из них $V=0\%$, что свидетельствует о стабильно высоком уровне генетической детерминированности и выровненности их популяций по данному признаку. Особого внимания заслуживают линии с минимальным $R=28\%$, нулевым поражением на первом учёте, низким индексом болезни, т.е. профилем устойчивости, превосходящим стандарт Оттава-30. Умеренный полиморфизм ($V=7–13\%$) характерен для 11 линий (например, ГК-68/1/1,

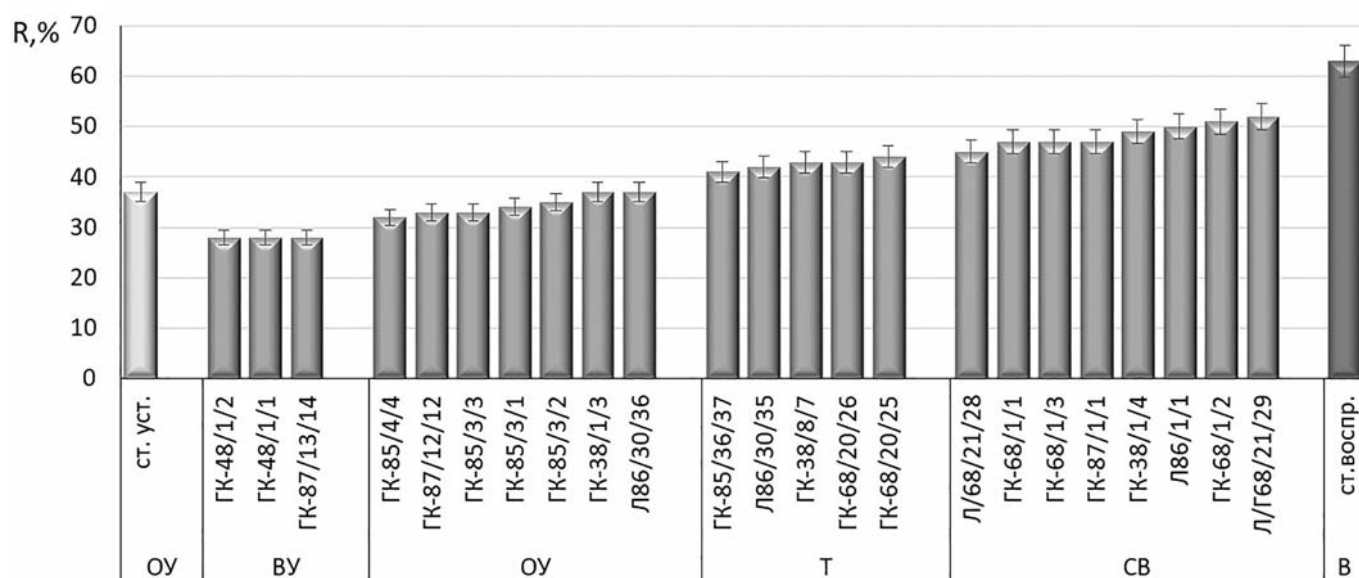


Рис. 3. Распределение линий томата на группы устойчивости по степени развития альтернариоза R, % (среднее за сезон): ВУ – высокоустойчивые; ОУ – относительно устойчивые;

Т – толерантные; СВ – средневосприимчивые; В – восприимчивые; ст.уст. – стандарт устойчивости сорт Оттава-30; ст.воспр. – стандарт восприимчивости – сорт Талалихин-186

Fig. 3. Distribution of tomato lines into resistance groups based on the degree of alternaria development, R% (average over the season): ВУ – highly resistant; ОУ – relatively resistant; Т – tolerant; СВ – moderately susceptible; В – susceptible; resistant standard – Ottawa 30 variety; susceptible standard – Tallichin 186 variety

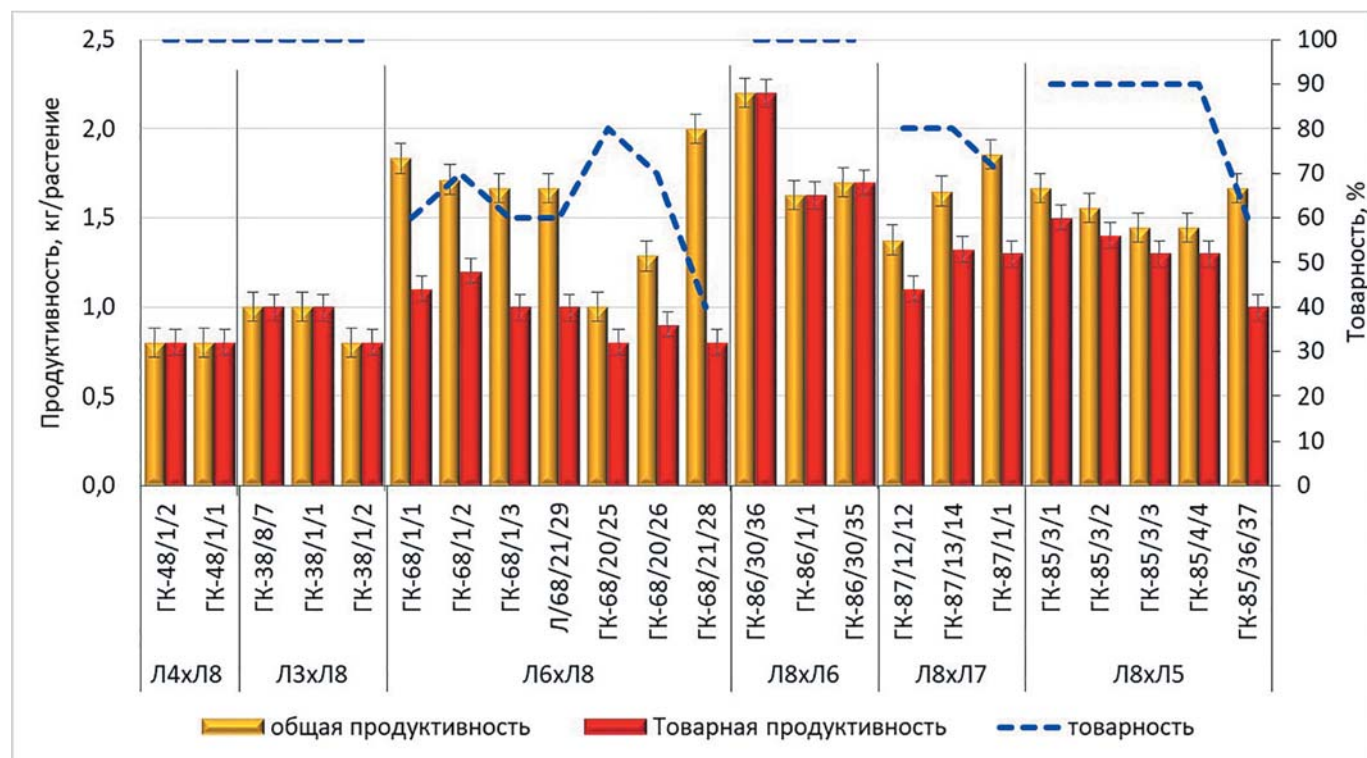


Рис. 4. Общая и товарная продуктивность плодов линий томата, полученных из потомств различных комбинаций скрещивания; пунктирная линия показывает уровень товарности плодов (2024-2025 годы)

Fig. 4. Total and marketable fruit productivity of tomato lines derived from progeny of various crossing combinations; the dashed line indicates the level of fruit marketability (2024-2025)

ГК-85/1/1, ГК-85/36/37, ГК-72/37/39), которые также можно считать достаточно выровненными по устойчивости генотипов. Средний уровень вариабельности ($V=15-28\%$) выявлен у 6 линий (ГК-38/1/3, ГК-68/20/26, Л86/1/1, ГК-87/12/12, ГК-85/2/2, ГК-72/2/2), что свидетельствует о необходимости дальнейшей селекционной работы с данными линиями на устойчивость к альтернариозу.

По продуктивности максимальное значение зафиксировано у линий из комбинации Л8хЛ6: ГК-86/1/1 (1,6 кг/раст.), ГК-86/30/35 (1,7 кг/раст.) и ГК-86/30/36 (2,2 кг/раст.) со 100% товарностью плодов. В целом показатель товарности варьировал от 60% до 100%, причем 100% уровень отмечен не только у перечисленных высокопродуктивных линий, но и у линий с более низкой продуктивностью (0,8-1 кг/раст.) из комбинаций Л4хЛ8 и Л3хЛ8 (рис. 4). Снижение товарности плодов остальных линий преимущественно было связано с фракцией мелких нестандартных плодов. Среди них по высокой общей продуктивности (более 1,5 кг/раст.) можно выделить десять линий: ГК-68/1/1, ГК-68/1/2, ГК-68/1/3, Л/68/21/29, ГК-68/21/28, ГК-87/13/14, ГК-87/1/1, ГК-85/3/2, ГК-

85/36/37, тогда как по товарной – только линию ГК-85/3/1 с товарностью плодов 90% (рис. 4).

Таким образом, оценка созданных новых линий по комплексу различных критериев позволила дифференцировать их по селекционной ценности, и, в первую очередь, как перспективный исходный материал для селекции на устойчивость к альтернариозу. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются линии (рис.5):

- **ГК-68/20/26** – из комбинации Л6хЛ8 (Чаровница × Оттава 30), раннеспелая линия по сочетанию устойчивости к альтернариозу и высокой продуктивности;
- **ГК-87/13/14** – из комбинации Л8хЛ7 (Оттава-30 × Фитилек), раннеспелая линия с высокой общей продуктивностью овальных плодов и устойчивостью к альтернариозу;
- **ГК-48/1/1, ГК-48/1/2** – из комбинации Л4хЛ8 (Грот × Оттава-30), среднеспелые мелкоплодные линии с невысокой продуктивностью, но высокой товарностью плодов и устойчивостью к альтернариозу
- **ГК-85/3/3** – комбинация Л8хЛ5 (Оттава-30 × Лотос), средняя товарная продуктивность, темно розовые плоды и

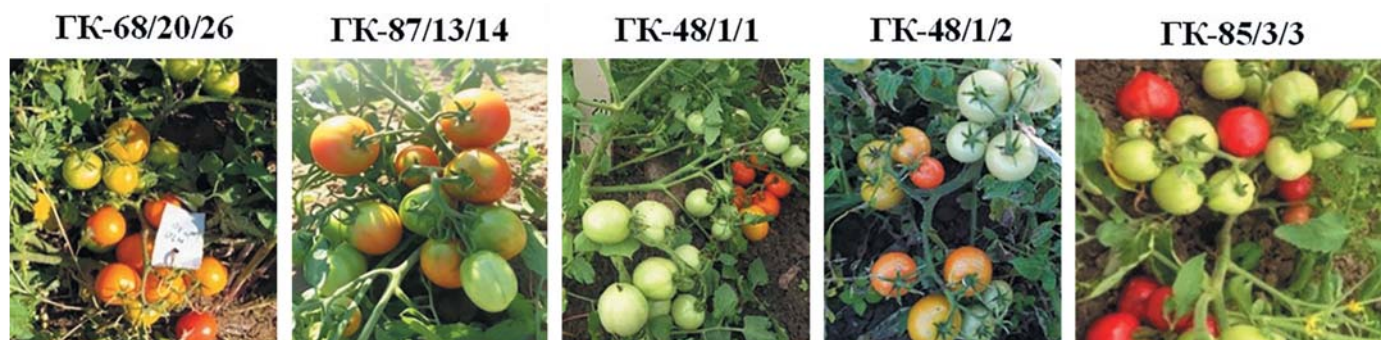


Рис. 5. Новые линии томата с высокой устойчивостью к альтернариозу.
Fig. 5. Tomato lines with high resistance to alternaria leaf spot

ГК-85/3/1



ГК-86/1/1



ГК-87/1/1



Рис. 6. Новые линии томата с высокой продуктивностью, разной окраской и формой плодов
Fig. 6. New tomato lines with high productivity, varying fruit color, and shape

относительная устойчивость к альтернариозу.

Среди источников продуктивности, крупноплодности и качества плодов можно особо выделить следующие линии с разной формой и окраской плодов (рис. 6):

- **ГК-85/3/1** – комбинация Л8хЛ5 (Оттава-30 х Лотос), высокая общая продуктивность, крупные плоды розовой окраски, богатые ликопином.

- **ГК-86/1/1** – комбинация Л8хЛ6 (Оттава 30 х Чаровница), линия со средней продуктивностью, лидер по содержанию пигментов, источник перцевидной формы плодов с высокой массой.

- **ГК-87/1/1** – комбинация Л8хЛ7 (Оттава -30 х Фитилек), сбалансированное качество оранжевых плодов цилиндрической формы, высокие показатели BRIX, содержания ликопина и каротина.

Заключение

Полученные данные подтверждают высокую селекционную ценность индетерминантного и мелкоплодного коллекционного образца Оттава-30 (линия Л8), как донора признака устойчивости к альтернариозу. Он также характеризуется оптимальными биохимическими характеристиками и высокой товарностью плодов. Гибридизация линии Л8 с разными детерминантными более крупноплодными линиями позволяет не только нивелировать нежелательные признаки в гибридном потомстве, но и способствует расширению генетического разнообразия и улучшению комплекса признаков нового линейного материала, включая раннеспелость, форму и окраску плодов, а также устойчивость к альтернариозу. В целом все созданные образцы в результате последовательных отборов в ряду поколений демонстрируют достаточно низкий уровень пораженности растений возбудителями альтернариоза в полевых условиях. Среди них

выделены раннеспелые и среднеспелые образцы, с разнообразной формой и окраской плодов, что расширяет генетический диапазон и потенциальные возможности для практического использования.

Оценка селекционной ценности новых линий, созданных в рамках данного исследования, свидетельствует о их значительном потенциале для развития селекционных программ по различным направлениям. Так, четыре линии с наиболее высоким уровнем устойчивости к альтернариозу (ГК-48/1/2, ГК-48/1/1, ГК-68/20/26 и ГК-87/13/14), превосходящие родительскую линию Л8 и исходную сортопопуляцию Оттава-30, являются наиболее ценными источниками для селекции на иммунитет. Линии из относительно устойчивой и толерантной групп устойчивости с высокой продуктивностью, товарностью и разной формой красных плодов, такие как ГК-86/30/36 (округло-кубовидные плоды), ГК-86/30/35 (округлые плоды) и ГК-86/1/1 (перцевидные плоды) представляют интерес для создания в дальнейшем коммерчески привлекательных гибридов. При этом, линии ГК-86/1/1 и ГК-87/1/1 с ярко оранжевыми цилиндрическими плодами, отличаются высоким содержанием ликопина и каротина, что важно для создания сортов с улучшенными функционально-диетическими питательными свойствами.

Таким образом, в результате проведенных исследований создан новый исходный материал томата с комплексом хозяйственно ценных признаков – устойчивостью к альтернариозу, сбалансированными биохимическими характеристиками, высокой продуктивностью и адаптивностью. Полученный генетически разнообразный материал будет использован в дальнейшей селекции при создании новых сортов и гибридов томата для юга Приморского края Дальнего востока, отвечающих требованиям современного рынка с учетом его региональных особенностей.

Литература

1. Гавриш С.Ф. 100 лет селекции томата для защищенного грунта России 1920–2020. Москва; 2024;(1):14.
2. Никитина Д.А., Карпук М.Ю. История культуры, ботаническая характеристика, биологические особенности томата. *Аграрное образование и наука*. 2022;(2):1. <https://www.elibrary.ru/lpyais>
3. Брежнев Д.Д. Томаты. Ленинград: Колос; 1964. С. 106.
4. Кондратьева И.Ю. Частная селекция томата. Москва: ВНИИССОК; 2010. С. 64. <https://www.elibrary.ru/qlbhtz>

5. Авдеев А.Ю. Селекция томата для разных целей использования, классификации сортов и технологии выращивания в Нижнем Поволжье. Астрахань: Ланихин П.В.; 2012. С. 8.
6. Sampath Kumar K.P., Paswan S., Srivastava S., Bhowmik D. Tomato – A Natural Medicine and Its Health Benefits. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2012;1(1):33.
7. Gannibal Ph.B., Levitin M.M. A manual. Monitoring of alternarioses of crops and identification of fungi of the genus *Alternaria*. St. Petersburg: VIZR; 2011. 70 p.
8. Simmons E.G. *Alternaria: an identification manual*. CBS Biodiversity Series 6. Utrecht: CBS Fungal Biodiversity Centre; 2007. 775 p.

9. Золотарева Е.В. Вредители и болезни овощных культур Дальнего Востока. Хабаровск; 2006. С. 128.
10. Ванюшкина И.А., Синиченко Н.А., Козарь Е.Г., Пышная О.Н. Развитие болезней и защита сортов томата открытого грунта в условиях муссонного климата юга Дальнего Востока России. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2025;19(1):17–31. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2025-19-1-17-31> <https://www.elibrary.ru/xwdxbu>
11. Яковлева Т.В., Першакова Т.В., Чернявская Ю.Н. Современное производство и особенности хранения томатов в России. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2024;90(6):134–152. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2024-6-90-134-152> <https://www.elibrary.ru/hykbkt>
12. Akhtar K.P., Ullah N., Saleem M.Y. et al. Evaluation of tomato genotypes for resistance to early blight caused by *Alternaria solani* in Pakistan. *Journal of Plant Pathology*. 2019;101:937–945. <https://doi.org/10.1007/s42161-019-00304-8>
13. Методические указания по изучению и поддержанию мировой коллекции овощных пасленовых культур (томат, перец, баклажаны). Под ред. Брежнева Д.Д. Ленинград: Всесоюзный институт растениеводства; 1977. 24 с.
14. Хохряков М.К., Потлайчук В.И., Семенов А.Я., Элбакян М.А. Определитель болезней сельскохозяйственных культур. Ленинград: Колос; 1984. С. 304.
15. Ганнибал Ф.Б., Гасич Е.Л., Орина А.С. Оценка устойчивости селекционного материала крестоцветных и пасленовых культур к альтернариозам. Санкт-Петербург: Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений РАСХН; 2011. 20 с.
16. Ганнибал Ф.Б. Мониторинг альтернариоза сельскохозяйственных культур и идентификация грибов рода *Alternaria*. Санкт-Петербург; 2025. 57 с.
17. Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. Москва: Россельхозакадемия, 2011. 650 с.

• References

1. Gavrish S.F. 100 years of tomato breeding for protected ground in Russia 1920-2020. Moscow; 2024. Vol. 1. P. 14. (In Russ.)
2. Nikitina D.A., Karpukhin M.Yu. History of cultivation, botanical description, biological features of tomato. *Agrarnoe obrazovanie i nauka*. 2022;(2):1. (In Russ.) 2022;(2):1. <https://www.elibrary.ru/lpyais>
3. Brezhnev D.D. Tomatoes. Leningrad: Kolos; 1964. P. 106. (In Russ.)
4. Kondrat'eva I.Yu. Private selection of tomatoes. Moscow: VNISSOK; 2010. P. 64. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qlbhtz>

5. Avdeev A.Yu. Breeding tomatoes for various uses, classification of varieties and cultivation technology in the Lower Volga region. Astrakhan: Lanikhin P.V.; 2012. P. 8. (In Russ.)
6. Sampath Kumar K.P., Paswan S., Srivastava S., Bhowmik D. Tomato – A Natural Medicine and Its Health Benefits. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2012;1(1):33.
7. Gannibal Ph.B., Levitin M.M. A manual. Monitoring of alternarioses of crops and identification of fungi of the genus *Alternaria*. St. Petersburg: VIZR; 2011. 70 p.
8. Simmons E.G. *Alternaria: an identification manual*. CBS Biodiversity Series 6. Utrecht: CBS Fungal Biodiversity Centre; 2007. 775 p.
9. Zolotareva E.V. Pests and diseases of vegetable crops in the Far East. Khabarovsk; 2006. P. 128. (In Russ.)
10. Vanyushkina I.A., Sinichenko N.A., Kozar' E.G., Pyshnaya O.N. Development of diseases and protection of open-field tomato varieties in the monsoon climate of the south of the Russian Far East. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*. 2025;19(1):17–31. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2025-19-1-17-31> (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/xwdxbu>
11. Yakovleva T.V., Pershakova T.V., Chernyavskaya Yu.N. Modern production and storage features of tomatoes in Russia. *Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii*. 2024;90(6):134–152. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2024-6-90-134-152> <https://www.elibrary.ru/hykbkt> (In Russ.)
12. Akhtar K.P., Ullah N., Saleem M.Y. et al. Evaluation of tomato genotypes for resistance to early blight caused by *Alternaria solani* in Pakistan. *Journal of Plant Pathology*. 2019;101:937–945. <https://doi.org/10.1007/s42161-019-00304-8>
13. Brezhnev D.D. Guidelines for the study and maintenance of the world collection of vegetable nightshade crops (tomato, pepper, eggplant)]. Leningrad: Vsesoyuznyi institut rastenievodstva; 1977. 24 p. (In Russ.)
14. Khokhryakov M.K., Potlaichuk V.I., Semenov A.Ya., Elbakyan M.A. Guide to diseases of agricultural crops. Leningrad: Kolos; 1984. P. 304. (In Russ.)
15. Gannibal F.B., Gasich E.L., Orina A.S. Evaluation of the resistance of breeding material of cruciferous and nightshade crops to alternariosis. Sankt-Peterburg; 2011. 20 p. (In Russ.)
16. Gannibal F.B. Monitoring of *Alternaria* disease of agricultural crops and identification of fungi of the genus *Alternaria*. S.-P., 2025. 57 p. (In Russ.)
17. Litvinov S.S. Methods of field experiment in vegetable growing. M., 2011. 650 p. (In Russ.)

Об авторах:

Елена Георгиевна Козарь – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатории молекулярно-иммунологических исследований, <https://orcid.org/0000-0002-1319-5631>, SPIN-код: 1148-5177, автор для переписки, kozar_eg@mail.ru

Наталья Александровна Синиченко – старший научный сотрудник сектора селекции и семеноводства овощных культур, <https://orcid.org/0009-0007-0412-4835>, SPIN-код: 1046-1750, natsinichenko@mail.ru

Ольга Николаевна Пышная – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник, зам. директора по науке, <https://orcid.org/0000-0001-9744-2443>, SPIN-код: 7967-8504, pishnaya_o@mail.ru

Ирина Александровна Енгальчева – кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией молекулярно-иммунологических исследований, <https://orcid.org/0000-0003-4843-111X>, SPIN-код: 2084-2830, engirina1980@mail.ru

About the Authors:

Elena G. Kozar – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, SPIN-code: 1148-5177, <https://orcid.org/0000-0002-1319-5631>, Corresponding Author, kozar_eg@mail.ru

Natalya A. Sinichenko – Senior Researcher of the Sector of Breeding and Seed Production of Vegetable Crops, SPIN-code: 1046-1750, <https://orcid.org/0009-0007-0412-4835>, natsinichenko@mail.ru

Olga N. Pyshnaya – Dr. Sci. (Agriculture), Chief Researcher, SPIN-code: 7967-8504, <https://orcid.org/0000-0001-9744-2443>, pishnaya_o@mail.ru

Irina A. Engalycheva – Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Molecular Immunological Research. <https://orcid.org/0000-0003-4843-111X>, SPIN-code: 2084-2830, engirina1980@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-68-77>
УДК: 635.621.3:631.5(470.31)

К.И. Дацюк¹, М.Ю. Маркарова¹,
С.М. Надежкин^{1,2*}, Г.А. Химич¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр овощеводства" (ФГБНУ ФНЦО) 143072, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИССОК, ул. Селекционная, д.14

²Учебно-опытный почвенно-экологический центр МГУ имени М.В. Ломоносова 141592, Россия, Московская область, г.о. Солнечногорск, дер. Чашниково

*Автор для переписки: nadegs@yandex.ru

Вклад авторов: Дацюк К.И.: концептуализация, проведение исследования, создание черновика рукописи. Маркарова М.Ю.: концептуализация, методология, верификация данных, создание рукописи и ее редактирование, формальный анализ. Надежкин С.М.: руководство исследованием, концептуализация, верификация данных, создание рукописи и ее редактирование. Химич Г.А.: концептуализация, ресурсы.

Конфликт интересов. Надежкин С.М. является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2008 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Дацюк К.И., Маркарова М.Ю., Надежкин С.М., Химич Г.А. Совершенствование элементов технологии выращивания кабачка в Нечерноземной зоне РФ. *Овощи России*. 2025;(6):68-77.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-68-77>

Поступила в редакцию: 05.11.2025

Принята к печати: 04.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Kseniya I. Datsyuk¹, Maria Yu. Markarova¹,
Sergey M. Nadezhkin^{1,2*}, Galina A. Khimich¹

¹FSBSI Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC) 14, Selektionnaya str., VNISSOK, Odintsovo region, Moscow district, 143072, Russia

²Educational and Experimental Soil-Ecological Center of Lomonosov Moscow State University Chashnikovo village, Solnechnogorsk, Moscow Region, 141592, Russia

*Corresponding Author: nadegs@yandex.ru

Authors' Contribution: Datsyuk K.I.: conceptualization, investigation, writing – original draft. Markarova M.Yu.: conceptualization, methodology, validation, formal analysis, writing – review & editing. Nadezhkin S.M.: supervision, conceptualization, validation, writing – review & editing.

Conflict of interest. Nadezhkin S.M. has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2008, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citation: Datsyuk K.I., Markarova M.Yu., Nadezhkin S.M., Khimich G.A. Improvement of zucchini cultivation technology in the Non-Black Earth Zone of the Russian Federation. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):68-77. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-68-77>

Received: 05.11.2025

Accepted for publication: 04.12.2025

Published: 18.12.2025

Совершенствование элементов технологии выращивания кабачка в Нечерноземной зоне РФ

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Кабачок (*Cucurbita pepo* subsp. *pepo*) – разновидность тыквы твердокорой семейства Тыквенные (*Cucurbitaceae*). Это одна из наиболее распространенных культур семейства. Он характеризуется ранним формированием урожая, ценными диетическими свойствами, высокой урожайностью и является неотъемлемой составляющей рациона населения Российской Федерации. *Cucurbita pepo* L. уязвим к инфекциям, вместе с тем отзывчив к воздействию регуляторов роста и различных видов удобрений, в том числе и биологических. Изучение особенностей действия биологических пестицидов на ростовые и биохимические характеристики кабачка актуально для совершенствования экотехнологий его возделывания в различных природно-климатических условиях.

Цель работы – изучение влияния регуляторов роста и биофунгицидов для обоснования элементов технологии выращивания кабачка в открытом грунте Нечерноземной зоны РФ.

Материал и методы. Работу проводили в Московской области на опытном поле ФГБНУ ФНЦО в 2023-2024 годах на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах. Изучали воздействие на биохимические показатели и урожайность плодов двух сортов *Cucurbita pepo* L. (Фараон и Якорь) регуляторов роста Микромикс и БИС, и биофунгицидов Глиокладин, Фитоспорин М, Тридем.

Результаты. Выявлена сортоспецифическая реакция растений кабачка на применяемые обработки. У сорта Якорь наибольшее влияние на прирост урожайности оказало применение биофунгицидов Глиокладин и Тридем на основе почвенных грибов рода *Trichoderma*, у сорта Фараон – регулятора роста БИС и биофунгицида Тридем. Отмечено увеличение содержания сухого вещества в плодах при предпосевной обработке семян обоих сортов БИС, а предпосевная обработка семян сорта Фараон биофунгицидом Фитоспорин М оказывало влияние на накопление сахаров в плодах. Накоплению аскорбиновой кислоты в плодах кабачка сорта Фараон способствовала обработка почвы биофунгицидами Глиокладин и Тридем.

Заключение. Интеграция биопрепаратов в технологию возделывания кабачка обеспечивает увеличение урожайности и улучшения биохимических показателей плодов. Наибольший эффект достигается при обоснованном подборе регуляторов роста и биофунгицидов под конкретный сорт, что открывает перспективы для разработки биологизированных технологий возделывания новых сортов и гибридов кабачка в открытом грунте Нечерноземной зоны Российской Федерации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

кабачок, регуляторы роста, биофунгициды, урожайность, биохимические показатели, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma* sp.

Improvement of zucchini cultivation technology in the Non-Black Earth Zone of the Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. Zucchini (*Cucurbita pepo* subsp. *pepo*) is a variety of hard-shelled pumpkin in the *Cucurbitaceae* family. It is one of the most common crops in the family. It is characterized by early crop formation, valuable dietary properties, and high yields, and is an integral part of the diet of the population of the Russian Federation. *Cucurbita pepo* L. is vulnerable to infections, but is responsive to growth regulators and various types of fertilizers, including biological ones. Studying the effects of biological pesticides on the growth and biochemical characteristics of zucchini is important for improving eco-technologies for its cultivation in various natural and climatic conditions.

The aim of this study is to study the effects of growth regulators and biofungicides to substantiate elements of open-field zucchini cultivation technology in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation.

Materials and Methods. The work was conducted in the Moscow Region at the Federal Scientific Vegetable Center experimental field from 2023 to 2024 on sod-podzolic heavy loam soils. The effects of growth regulators Micromix and BIS, and biofungicides Gliocladin, Fitosporin M, and Tridem on the biochemical parameters and fruit yield of two *Cucurbita pepo* L. varieties (Faraon and Yakor) were studied.

Results. Variety-specific responses of zucchini plants to the applied treatments were identified. For the Yakor variety, the greatest yield increase was achieved with the use of biofungicides Gliocladin and Tridem, based on soil fungi of the genus *Trichoderma*, while for the Faraon variety, the greatest impact was achieved with the use of the growth regulator BIS and the biofungicide Tridem. An increase in fruit dry matter content was observed with pre-sowing seed treatment of both BIS varieties, while pre-sowing seed treatment of the Pharaoh variety with the biofungicide Fitosporin M influenced sugar accumulation in the fruit. Ascorbic acid accumulation in the Pharaoh zucchini fruit was promoted by soil treatment with the biofungicides Gliocladin and Tridem.

Conclusions. Integrating biopreparations into zucchini cultivation technology can increase yields and improve fruit biochemical parameters. The greatest effect is achieved with a well-founded selection of growth regulators and biofungicides for a specific variety, opening up prospects for the development of eco-technologies for cultivating new zucchini varieties and hybrids in open ground in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation.

KEYWORDS:

Zucchini, growth regulators, biofungicides, yield, biochemical parameters, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma* sp.

Введение

Тыкву, кабачок и патиссон выращивают повсеместно. Китай, Индия, Россия, Украина, США, Египет, Мексика, Малави, Италия и Испания входят в десятку крупнейших производителей тыквы, кабачка и патиссона в мире (ФАО 2018), особое значение они имеют в Азии, Европе, Америке и Африке как товарная культура. На 2025 год в Государственном реестре сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию, зарегистрировано 110 сортов и 127 гибридов F₁ кабачка (*Cucurbita pepo* L.)

В последние годы особое внимание уделяют правильному и сбалансированному питанию, поскольку оно способствует улучшению качества жизни, поддержанию здоровья, высокой физической и умственной активности, повышению устойчивости к негативным факторам окружающей среды [1]. Овощи являются незаменимыми продуктами в питании человека и одним из ключевых факторов в поддержании здоровья человека, за счет содержания большого набора питательных веществ, необходимых организму, в своем составе [2]. Важную роль в поддержание здорового рациона человека может сыграть кабачок, считающийся диетическим и низкокалорийным продуктом, содержащим в своем составе большое количество полезных витаминов и минеральных солей [3].

Кабачок обладает мягкими вкусовыми качествами, нежной текстурой, пригоден для употребления в пищу на ранних стадиях зрелости и в биологической спелости. В сыром виде содержит примерно 17 калорий, 1,21 г белка, 0,32 г жира, 5 г углеводов и 3,0 г пищевых волокон на 100 г [3, 4]. Кабачки также являются источником необходимых витаминов, таких как витамин С – антиоксидант, который играет решающую роль в иммунной функции и синтезе коллагена и витамин А, который необходим для поддержания здоровья зрения, кожи и слизистых оболочек. Кроме того, кабачки содержат такие минералы, как калий, марганец и магний [4]. В своем составе тыквенные культуры содержат также различные биологически активные соединения: тритерпены, кукурбитацины, стеролы и алкалоиды [5], поэтому *Cucurbita pepo* является превосходной белковой, углеводной, минеральной и жировой добавкой [6]. Особое значение кабачка в питании человека определяется его диетической и лечебно-профилактической ценностью, он допустим при большинстве лечебных диет и детского питания за счет низкой калорийности и аллергенности, широко используются в промышленности и домашней кулинарии [7].

Здоровье и продолжительность жизни населения зависит от качества получаемой продукции, а получение экологически чистой продукции является актуальной тенденцией в сельскохозяйственной сфере. Экологическое земледелие и, в частности, овощеводство, в последние годы вызывает все больший интерес в обществе, и может стать альтернативой традиционным высокоинтенсивным технологиям. Экологическое овощеводство заключается не в полном отказе от при-

менения минеральных удобрений и пестицидов, а в сбалансированном применении оптимальных доз удобрений, максимальном снижении пестицидной нагрузки на агроценоз и применение биометода [8]. Необходимо создавать новые сельскохозяйственные технологии, способные оптимизировать производство продуктов питания и учитывать серьезные климатические изменения, происходящие последнее время, такие технологии также должны быть устойчивыми, не наносить ущерб экосистеме и биоразнообразию, при этом оставаться экономически эффективными [9].

В рамках импортозамещения и обеспечения продовольственной безопасности и увеличения объемов выпуска органической овощной продукции в последние годы приоритетным направлением является разработка и использование технологий, обеспечивающих применение экологически безопасных систем земледелия, одним из ключевых элементов которых является производство и применение биологических фунгицидов, которые при включении в интегрированную систему защиты растений позволяют существенно снизить пестицидную нагрузку [10]. Применение биопрепаратов, которые в основе содержат природные компоненты, микроорганизмы или продукты их жизнедеятельности [11], становится одним из важных элементов высокопроизводительных технологий в сельском хозяйстве [12]. Биопрепараты в зависимости от действующего вещества способны улучшать посевные качества семян и морфометрические показатели растений, стимулировать их рост и развитие, улучшать питание растений за счет повышения коэффициентов использования питательных элементов из удобрений и почвы, оптимизировать фосфорное питание растений, улучшать азотное питание в следствии фиксации атмосферного азота, повышать устойчивость растений к стрессовым условиям болезнями и вредителями, а также их продуктивность на фоне водного дефицита, неблагоприятных температур, повышенной кислотности, засоления или загрязнения почвы [13].

В гибридном семеноводстве представителей семейства Тыквенные (*Cucurbitaceae*) фитогормоны/биостимуляторы используют при необходимости смещения пола растений в мужскую или женскую сторону, а также при выращивании высококачественного посадочного материала. Биопрепараты широко применяют на овощных культурах, таких как томат, перец, капуста, картофель, тыквенные культуры [12]. В основном применяют отдельные элементы технологии органического земледелия с включением биологических пестицидов, поскольку целостная технология пока формируется [13]. Использование микробиологических продуктов в качестве естественных средств биоконтроля для повышения системной устойчивости растений к вирусным и бактериальным инфекциям – многообещающий способ сделать сельское хозяйство более устойчивым и щадящим для окружающей среды [14]. В отличие от химических препаратов биопрепараты характеризуются ярко выраженной избирательной способностью, быстро раз-

лагаются в почве и имеют низкий класс опасности для человека и животных [15].

Одним из важнейших механизмов воздействия ассоциативных бактерий на растение является продуцирование фитогормонов, витаминов и других физиологически активных веществ. *Bacillus subtilis* обладает высокой генетической стабильностью и способностью к секретиции белков, производит различные химические вещества, такие как сцилло-инозитол, гиалуроновая кислота, N-ацетилглюкозамин, вырабатывает множество ферментов, таких как альфа-амилаза, ксиланазы, лихеназа, благодаря чему используется для производства биодобров, биопестицидов и биоразлагаемых материалов [16]. Лабораторные исследования по оценке влияния бактериального препарата, полученного на основе штамма *Bacillus subtilis* показали фунгицидное и стимулирующее действие на посевные качества зерновых культур, которое выразилось в повышении энергии прорастания и лабораторной всхожести семян, увеличении длины и массы проростков овса, пшеницы яровой и сои. Отмечено и стимулирующее свойство изучаемого препарата [17].

Было доказано, что биопрепараты на основе *Trichoderma harzianum album*, *T. koningii*, *Bacillus subtilis* и *Pseudomonas fluorescens* обладают большим потенциалом в борьбе с фузариозной корневой гнилью у тыквенных культур. Обработка семян тыквы способна оказывать положительное влияние на стрессоустойчивость растений, улучшать их рост и усиливать иммунитет [18].

Установленная эффективность биологического контроля фитопатогенов с использованием *Trichoderma* spp. обуславливается способностью триходермы к синтезу ряда вторичных метаболитов с высокой, установленной ранее проведенными исследованиями [19] антибиотической активностью (пептаболы, поликетиды и терпены). При применении препарата Фитоспорин (*Trichoderma* и *Bacillus subtilis*) было установлено снижение поражаемости пшеницы озимой септориозом и мучнистой росой [20].

Испытание экспериментальных биопрепаратов на основе консорциумов живых культур микроорганизмов – МБК Тридем (виды рода *Trichoderma*) и МБК БИС (дрожжи рода *Rhodotorula*), показало перспективность их применения для снижения болезней при выращивании томата сорта Фитилек. На фоне эпифитотии они сдерживали развитие альтернариоза ниже уровня порога вредоносности до стадии плодоношения, оказывали иммуномодулирующее и стимулирующее действие на растения, способствуя увеличению массы товарного плода и ранней урожайности томата при выращивании в условиях открытого грунта Приморского края [10].

Рынок биопрепаратов, согласно данным Государственного каталога пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации, насчитывает порядка 128 микробиологических удобрений и 42 фунгицида на биологической основе [21]. Среди культур, на которых разрешено применение данных пестицидов, кабачка нет. В

связи с этим разработка и изучение влияния новых биопрепаратов фунгицидного и стимулирующего действия является актуальной темой исследований. Таким образом, биопрепараты у нас в стране востребованы и актуальна разработка их новых форм и видов [13].

Цель исследования – изучение влияния регуляторов роста и биофунгицидов для совершенствования элементов технологии выращивания кабачка в открытом грунте Нечерноземной зоны РФ.

Материал и методы

Работу проводили в Московской области на опытном поле ФГБНУ ФНЦО в период с 2023 по 2024 годы на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Агрохимическая характеристика пахотного (0-20 см) слоя почвы: содержание гумуса по Тюрину – 1,82-1,95%, реакция среды рНкcl 6,1-6,3, гидролитическая кислотность 1,29 1,34 мг-экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований 16,3-19,3 мг экв/100 г почвы, степень насыщенности основаниями 92-94%, содержание подвижного фосфора 290-490 мг/кг почвы, обменного калия 151-180 мг/кг почвы, минерального азота 12-19 мг/кг.

Агротехника – общепринятая для Центральных районов Нечерноземной зоны. Предпосевное внесение минеральных удобрений согласно схеме опыта. Система удобрений, принятая для кабачка открытого грунта в ФГБНУ ФНЦО – Фон N90P60K90. Внесение минеральных удобрений осуществлялось перед предпосевной культивацией, с последующей заделкой на глубину 10-15 см.

Посев семян проводили в первой декаде июня. Уход за растениями включал в себя две междурядные обработки: первую культивацию проводили в фазу 2-3-х настоящих листьев, вторую – перед смыканием рядов (6-8 настоящих листьев) и две ручные прополки. Поливы проводили при достижении влажности почвы на уровне 70% от НВ, с поливной нормой 150-300 м³/га. Товарные плоды кабачка убирали с плодоножкой на 7 сутки после образования завязи в фазе технической спелости. Уборка урожая проводилась поделочно вручную.

Кабачок сеяли ручным способом по схеме 70x70 см. Площадь делянки 20 м². Число учетных растений на делянке 40 шт. Расчетная густота стояния 20000 раст./га.

Проведены полевые однофакторные опыты с двумя сортами кабачка.

Сорт Якорь относится к группе раннеспелых сортов, период от полных всходов до первого сбора составляет 41-43 дней. Плод цилиндрический, со сбегом к плодоножке, масса товарного плода 0,45 кг. В биологической спелости плод гладкий, светло-желтый, сетка и рисунок отсутствуют. Ценность сорта: хорошая транспортабельность, лежкость хорошая. По характеристике адаптивных свойств сорт Якорь отнесен в группу интенсивного типа, обеспечивает наивысшую урожайность при благоприятных условиях среды. Наиболее эффективен при включении в интенсивные технологии [22].

Сорт Фараон – высокоурожайный, холодостойкий, скоро-спелый приспособлен для выращивания в Нечерноземной зоне и более северных областях России. Период от массовых всходов до плодоношения составляет 39-49 суток. Одновременно на растении созревает 4-6 плодов, в биологической зрелости плоды длинные, 45-60 см, черно-зеленого цвета, мякоть желтого цвета толщиной 3-4 см, нежная, сочная, хрустящая и очень вкусная. Содержание сухого вещества составляет 5,9%, сахаров – 5 мг%. Плоды универсального назначения, пригодны для всех видов переработки. С одного растения можно собрать 7-9 кг товарных плодов, а товарная урожайность заявлена 80,0 т/га [23].

Схема опыта на обоих сортах по изучению регуляторов роста и биофунгицидов:

1. Фон $N_{90}P_{60}K_{90}$.
2. Фон + БИС (регулятор роста экспериментальный) – предпосевная обработка семян, 0,1% рабочим раствором, экспозиция 2 часа.
3. Фон + Фитоспорин М (биофунгицид стандарт) – предпосевная обработка семян, 1,5% рабочим раствором, экспозиция 2 часа.
4. Фон + Глиокладин (биофунгицид стандарт) – 1 таблетка в лунку при посеве.
5. Фон + Тридем (биофунгицид экспериментальный) – внесение в почву за сутки до посева, 1,0 г/л лунка.
6. Фон + Микромикс (регулятор роста стандарт) – двукратная фоллиарная обработка, норма расхода рабочего раствора 2 л на 10 м².

Микромикс водорастворимое комплексное бесхлорное удобрение с микроэлементами, применяется для подкормки овощных, плодовых, ягодных, цветочно-декоративных культур в комнате, на балконе и даче. Не содержит хлора и тяжёлых металлов. Действующее вещество: N – 11%; P – 11%; K – 21%; Mg – 2,5%+микроэлементы. Норма разведения 20г/10 л, норма расхода при фоллиарной обработке – 1,5-3 л/10 м².

БИС – экспериментальный регулятор роста, в составе которого почвенные дрожжи *Rhodotorula* spp., продуцирующие аминокислоты (экспериментальная разработка ФГБНУ ФНЦО), оказывают на растения ростостимулирующее и антистрессовое воздействие. Титр живых клеток в рабочем растворе БИС составлял 1,5-1,8х10⁷. Препаратом обрабатывали семена, замачивая их на 2 часа в день высадки.

Фитоспорин М – биофунгицид на основе *Bacillus Subtilis*. Препарат используют для замачивания семян, корней рассады, опрыскивания вегетирующих растений. В качестве предпосевной обработки семян применяется свежеприготовленный 1,5% рабочий раствор, экспозиция при замачивании семян 2 часа, норма расхода – 1,5 л на 1 кг семян.

Глиокладин – биофунгицид на основе грибов *Trichoderma* spp. ВИЗР-18, титр не менее 109 КОЕ/г), использовали в форме таблетки в соответствии с рекомендациями разработчика из расчета одна таблетка на лунку, подготовленную на делянках опытного поля.

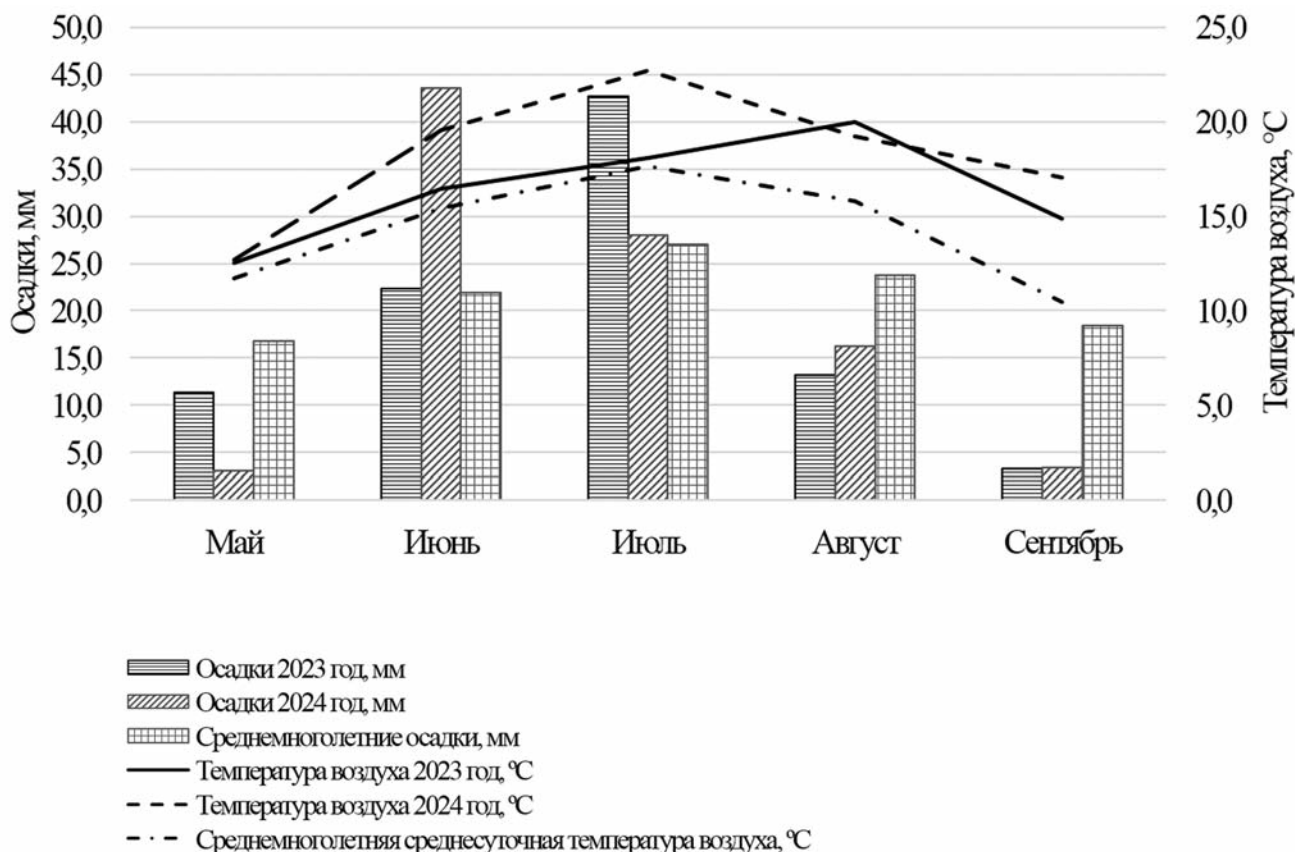


Рис. 1. Погодные условия 2023-2024 годы
Fig. 1. Weather conditions for 2023-2024

Тридем – экспериментальный биофунгицид на основе грибов *Trichoderma* spp. (экспериментальная разработка ФГБНУ ФНЦО). Обработка почвы для посева рассады биофунгицидом Тридем способствует снижению в ризосфере растений патогенных бактерий и грибов [24]. Препарат вносили в почву перед высадкой семян из расчета 1 г препарата на 1 растение.

Погодные условия в годы проведения исследований различались как по температурному режиму, так и количеству выпавших осадков. Температура воздуха в среднем за вегетацию в 2023г. составила +16,5°C, что на 2,3°C выше среднееголетних данных (рис. 1). Следует отметить, что температура воздуха за все месяцы вегетации 2023 года, была выше среднееголетних значений, особенно в августе и сентябре на 4,2 и 4,6°C соответственно, при этом максимум наблюдался также в августе – 20,0°C. В июне-августе (наиболее активный период вегетации) 2023 года, количество выпавших осадков составило 216,8 мм, что на 1,8 мм отличается от среднееголетних значений (215,0 мм), но обращает внимание более чем двукратное увеличение осадков в 3 декаде июля (ливневые дожди) относительно многолетних значений, при их значительном недостатке в течении всего августа – 41% от среднееголетнего количества. В целом погодные условия 2023 года отличались повышенными среднемесячными температурами, а также меньшим количеством осадков – на 23% относительно среднееголетних данных.

Погодные условия 2024 года также характеризовались значительными отклонениями от среднееголетних значений. В первой декаде июня, в период прорастания кабачка, среднесуточная температура воздуха была на 5°C выше среднееголетних значений. В дальнейшем, вплоть до окончания вегетации температура воздуха была выше среднееголетних значений

на 0,6-7,7°C. Без поливов в таких условиях рост и развитие кабачка было бы сильно угнетено. Но благодаря своевременным поливам большинства овощных культур была получена на высоком уровне. В то же время жаркая и сухая погода в середине и конце вегетации способствовала получению высокого урожая кабачка, при выращивании его на орошении.

Определение содержания аскорбиновой кислоты в плодах выполнено методом визуального титрования с использованием реактива Тилманса, содержание сухого вещества – термогравиметрическим высушиванием образцов при 70°C до постоянной массы, нитраты – с использованием ион селективного электрода на иономере Эксперт-001 (ООО «Эконикс». Россия). Содержание моно- и суммы сахаров определяли цианидным методом. Биохимический анализ плодов проводился в стадии технической спелости в первой декаде августа.

Результаты и обсуждение

В исследованиях 2023-2024 годов было установлено, что различные обработки оказывали положительное влияние на товарный урожай выращиваемых сортов кабачка. Прибавка урожайности носила сортоспецифичный характер, что указывает на различную чувствительность испытанных сортов к использованным биопрепаратам (табл. 1).

Наибольшую прибавку товарной урожайности у сорта Якорь в 2023 году обеспечивало применение биофунгицидов Глиокладин и Тридем, прибавка составила 24,7-17,8 т/га или 33,5-24,1% соответственно. Прибавка товарной урожайности у сорта Якорь в 2024 году варьировала от 13,4 до 33,5% по сравнению с контролем. Наибольшую прибавку обеспечил препарат Глиокладин 33,5%, а также БИС и Тридем – 21,7 и 24,1% соответственно.

Таблица 1. Товарная урожайность кабачка, т/га, 2023-2024 гг.
Table 1. Commercial yield of zucchini, t/ha, 2023-2024.

Сорта	Якорь			Фараон					
Вариант	2023	2024	среднее	2023	2024	среднее	среднее по 2 м сортам	± т/га от контроля	± %
Контроль	71,6	73,8	72,7	73,6	84,7	79,2	75,9		
БИС	87,2	89,8	88,5	99,4	96,0	97,7	93,1	17,2	22,6
Фитоспорин М	81,4	83,7	82,6	71,2	92,6	81,9	79,7	3,8	5,0
Глиокладин	96,4	98,5	97,5	70,0	91,0	80,5	89,0	13,1	17,2
Тридем	91,8	91,6	91,7	86,2	93,8	90,0	90,9	14,9	19,7
Микромикс	83,2	89,2	86,2	84,0	91,8	87,9	87,1	11,1	14,7
Среднее	85,3	87,8	86,5	79,1	91,7	85,4	85,9		
НСР ₀₅	7,2	7,7		7,1	7,4		6,7		

Таблица 2. Содержание сухого вещества в плодах кабачка, %, 2023-2024 гг.
Table 2. Dry matter content of zucchini fruits, %, 2023-2024.

Сорта	Якорь			Фараон					
Вариант	2023	2024	среднее	2023	2024	среднее	среднее по 2 сортам	± от контроля	± %
Контроль	4,82	5,63	5,2	3,21	4,83	4,0	4,6		
БИС	5,07	6,04	5,6	3,42	5,36	4,4	5,0	0,35	8,75
Фитоспорин М	4,97	5,62	5,3	4,53	4,83	4,7	5,0	0,37	9,13
Глиокладин	5,10	5,87	5,5	4,93	4,93	4,9	5,2	0,59	14,6
Тридем	4,96	5,66	5,3	3,39	4,83	4,1	4,7	0,09	2,19
Микромикс	5,06	5,73	5,4	4,05	5,01	4,5	5,0	0,34	8,50
Среднее	5,0	5,8	5,4	3,9	5,0	4,4	4,9		
НСР ₀₅	0,31	0,34	0,30	0,33	0,31	0,29	0,32		

Таблица 3. Содержание моносахаров в плодах кабачка, %, 2023-2024 годы
Table 3. Monosugar content in zucchini fruits, %, 2023-2024

Сорта	Якорь			Фараон					
Вариант	2023	2024	среднее	2023	2024	среднее	среднее по 2 сортам	± от контроля	± %
Контроль	2,01	2,79	2,40	1,92	2,20	2,06	2,23		
БИС	1,98	2,79	2,39	2,12	2,34	2,23	2,31	0,08	3,52
Фитоспорин М	2,57	2,92	2,75	2,73	2,25	2,49	2,62	0,39	17,6
Глиокладин	2,52	2,73	2,63	2,07	2,22	2,15	2,39	0,16	7,05
Тридем	2,70	2,92	2,81	1,74	2,18	1,96	2,39	0,16	7,05
Микромикс	2,42	2,82	2,62	2,34	2,18	2,26	2,44	0,21	9,55
среднее	2,37	2,83	2,60	2,15	2,23	2,19	2,39		
НСР ₀₅	0,21	F _ф <F ₀₅	0,21	0,19	F _ф <F ₀₅	0,19	0,18		

Таблица 4. Сумма сахаров в плодах кабачка, %, 2023-2024 гг.
Table 4. Amount of sugars in zucchini fruits, %, 2023-2024.

Сорта	Якорь			Фараон					
Вармант	2023	2024	среднее	2023	2024	среднее	среднее по 2 сортам	± от контроля	± %
Контроль	2,16	2,96	2,56	2,11	2,34	2,23	2,39		
БИС	2,18	2,98	2,58	2,23	2,37	2,30	2,44	0,05	1,98
Фитоспорин М	2,59	2,99	2,79	2,82	2,31	2,57	2,68	0,29	11,9
Глиокладин	2,61	2,91	2,76	2,11	2,30	2,21	2,48	0,09	3,75
Тридем	2,76	2,96	2,86	2,02	2,27	2,15	2,50	0,11	4,58
Микромикс	2,78	3,03	2,91	2,48	2,28	2,38	2,64	0,25	10,4
среднее	2,51	2,97	2,74	2,30	2,31	2,30	2,52		
НСР ₀₅	0,23	F _ф <F ₀	0,22	0,22	F _ф <F ₀₅	0,20	0,21		

Таблица 5. Содержание аскорбиновой кислоты в плодах кабачка, мг. %, 2023-2024 гг.
Table 5. Ascorbic acid content in zucchini fruits, mg.%, 2023-2024.

Сорта	Якорь			Фараон					
Вариант	2023	2024	среднее	2023	2024	среднее	среднее по 2 сортам	± от контроля	± %
Контроль	7,11	7,38	7,25	6,24	6,42	6,33	6,79		
БИС	7,17	7,59	7,38	7,26	6,62	6,94	7,16	0,37	5,49
Фитоспорин М	6,87	6,49	6,68	6,50	6,13	6,32	6,50	-0,29	-4,27
Глиокладин	6,73	6,79	6,76	7,09	7,11	7,10	6,93	0,14	2,10
Тридем	9,32	7,34	8,33	7,13	7,05	7,09	7,71	0,92	13,59
Микромикс	8,36	7,00	7,68	6,74	6,67	6,71	7,19	0,41	5,97
Ср.	7,59	7,10	7,35	6,83	6,67	6,75	7,05		
НСР ₀₅	0,65	0,61	0,53	0,59	0,60	0,55	0,41		

В 2023 году наибольшее влияние на увеличение товарной урожайности кабачка сорта Фараон оказала предпосевная обработка регулятором роста БИС, отклонение от контроля составило 35,1% (25,8 т/га), а в 2024 году увеличение товарной урожайности было наибольшим в вариантах Тридем и БИС и составило 9,1-11,3 т/га или 10,7-13,3% соответственно.

У обоих сортов в 2024 году урожайность была выше, чем в 2023 году. Товарная урожайность у сорта Якорь в среднем за годы исследования была максимальной при обработке почвы биофунгицидом Глиокладин и составила 97,5 т/га, а отклонение от контрольного варианта – 34,1%.

Величина товарной урожайности при предпосевной обработке семян кабачка сорта Фараон биофунгицидом Фитоспорин М вызывает особый интерес, в 2023 году его применение сопровождалось снижением урожайности, тогда как в 2024 году отмечено существенное увеличение. Вероятно, это обусловлено характером действия биофунгицида при различных погодных условиях. В среднем за 2 года по обоим сортам наибольшая прибавка товарной урожайности выявлена при обработке семян регулятором роста БИС – 17,2%, влияние биофунгицидов на основе Триходермы оказалось более эффективным, чем на основе *Bacillus Subtilis*.

При анализе данных о товарности плодов отмечено, что данный показатель выше у сорта Якорь относительно сорта Фараон. У сорта Якорь наибольшее значение товарности в среднем за годы исследования достигалась на вариантах с применением Тридем и Микромикс.

У сорта Фараон на данный показатель наибольшее влияние оказало применение экспериментальных препаратов БИС и Тридем. В среднем по двум сортам за 2 года наилучшей товарностью характеризовались обработка семян экспериментальным препаратом – регулятором роста и иммуномодулятором БИС и обработка почвы экспериментальным биофунгицидом Тридем.

Биохимический состав овощных культур является одним из важнейших хозяйственно-ценных признаков. Так, содержание сухого вещества в плодах наиболее важный показатель, влияющий на срок хранения, а повышение содержания сахаров, положительно сказывается на пригодности для переработки и вкусовых качествах. Увеличение содержания сухого вещества и аскорбиновой кислоты указывает на стимуляцию метаболизма плодов, тогда как умеренное влияние на нитраты подтверждает безопасность применяемых препаратов [24, 25]. В 2023 году было отмечено, что применяемые обработки не оказали существенного влияния на биохимический состав плодов сорта Якорь (табл.2). При применении БИС отмечено наибольшее содержание сухого вещества, отклонение от контроля составило 0,41. При предпосевной обработке семян сорта Фараон препаратом БИС содержание сухого вещества в плодах увеличивалось на 0,53%.

В среднем по двум сортам наибольшее влияние за 2 года на накопление сухого вещества в плодах оказал биофунгицид Глиокладин (увеличение 14,6% от контроля). Наименьшее влияние отмечено после биофунгици-

Таблица 6. Содержание нитратов в плодах кабачка, мг/кг, 2023-2024 гг.
Table 6. Nitrate content in zucchini fruits, mg/kg, 2023-2024.

Сорта	Якорь			Фараон				
Вариант	2023	2024	среднее	2023	2024	среднее	среднее по 2 сортам	± от контроля
Контроль	180	191	186	121	191	156	171	
БИС	165	184	175	135	185	160	167	-4
Фитоспорин М	194	180	187	142	187	165	176	5
Глиокладин	179	175	177	131	177	154	166	-5
Тридем	205	197	201	129	183	156	179	8
Микромикс	198	197	198	147	182	165	181	10
среднее	187	187	187	134	184	159	173	
НСР ₀₅	16	13	12	11	12	10	10	

да Тридем (2,19% от контроля). Регуляторы роста оказали примерно равный эффект (8,50-8,75).

Все обработки оказали положительное влияние на показатели содержания сахаров. В среднем по обоим сортам увеличение моносахаров – от 3,5 (БИС) до 17,6 (Фитоспорин) относительных % от контроля (табл. 3).

Сумма сахаров наибольшей была в плодах сорта Якорь, особенно в условиях 2024 года (табл. 4). В среднем по двум сортам наилучшим образом на данном показателе отразились обработки Фитоспорином (+11,9 % к контролю) и Микромиксом (10,4% к контролю).

В 2023 году наибольшее влияние на увеличение содержания аскорбиновой кислоты в плодах кабачка сорта Якорь оказало применение Тридем и Микромикс отклонение от контроля составило 31,1% и 17,5% соответственно (табл.5). У сорта Фараон достоверное увеличение данного показателя отмечено на всех вариантах, кроме варианта с предпосевной обработкой семян БИС).

В среднем за 2 года и по обоим сортам отмечено, что наибольшему накоплению аскорбиновой кислоты способствовала обработка почвы биофунгицидом Тридем (до 15% от контроля) и регулятором роста Микромикс (до 6% от контроля). Использование биофунгицидов Фитоспорин и Глиокладин приводило к снижению концентрации аскорбиновой кислоты в плодах на 7-8%). Обработка семян регулятором роста БИС по содержанию витамина С незначительно отличала данный вариант от контрольного.

Содержание нитратов на всех вариантах опыта ниже ПДК (400 мг/кг). Достоверного влияния на изменение данного показателя не выявлено (табл. 6). Умеренное влияние на нитраты подтверждает безопасность применяемых препаратов. Подобные результаты согласуются с данными литературы, где отмечается положительное влияние биостимуляторов и микробиологических фунгицидов на качество овощной продукции [25, 26].

Выводы

Выявлена сортоспецифическая реакция растений кабачка на применяемые обработки. У сорта Якорь наибольшее влияние на прирост урожайности оказало применение биофунгицидов Глиокладин и Тридем на основе почвенных грибов рода *Trichoderma*, у сорта Фараон – регулятора роста БИС и биофунгицида Тридем. Отмечено увеличение содержания сухого вещества в плодах при предпосевной обработке семян обоих сортов БИС, а предпосевная обработка семян сорта Фараон биофунгицидом Фитоспорин М оказывала влияние на накопление сахаров в плодах. Накоплению аскорбиновой кислоты в плодах кабачка сорта Фараон способствовала обработка почвы биофунгицидами Глиокладин и Тридем.

Таким образом, применение биопрепаратов позволяет не только повышать урожайность, но и улучшать биохимические показатели плодов кабачка, что делает рациональным их включение в технологию производства продукции.

• Литература

1. Романчук Г.В. Правильное питание как залог здоровья. Культура питания населения Гродненской области. *Современные проблемы гигиены, радиационной и экологической медицины*. 2023;(13):179-189. <https://elibrary.ru/ccsaab>
2. Ахтаров Д.Н., Денежко Л.В. Значение овощей в питании, их лечебное значение. Технические решения в агробизнесе студентов, аспирантов и молодых ученых: Сборник статей Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Екатеринбург, 17 марта 2023 года. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2023. С. 233-237. <https://elibrary.ru/rfsqrl>
3. Шантасов А.М., Соколов С.Д., Бочарников А.Н., Соколов А.С., Измухамбетова Н.Г., Нугманова Ж.Р. Перспективные направления в селекции кабачка. *Овощи России*. 2018;(2):24-27. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-1-24-27>
<https://elibrary.ru/xplujn>
4. Лукин А.А., Штриккер Л.А. Химический состав, пищевая ценность и особенности кулинарной обработки кабачков. *Известия Дагестанского ГАУ*. 2024;3(23):156-161. https://doi.org/10.52671/26867591_2024_3_156
<https://elibrary.ru/lxxwp>
5. Ajuru M., Nmomo F. A review on the economic uses of species of *Cucurbitaceae* and their sustainability in Nigeria. *Amer J Plant boil*. 2017;2(1):17-24. <https://doi.org/10.11648/j.ajpb.20170201.14>
6. Martinez-Gonzalez C., Castellanos-Morales G., Barrera-Redondo J., Sanchez-de la Vega G., Hernandez-Rosales H.S., Gasca-Pineda J., Aguirre-Planter E., Moreno-Letelier A., Escalante A.E., Montes-Hernandez S., Lira-Saade R., Eguarte L.E. Recent and historical gene flow in cultivars, landraces, and a wild taxon of *Cucurbita pepo* in Mexico. *Front. Ecol. Evol*. 2021;(9):656051. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.656051>
7. Котов В.П., Адрицкая Н.А., Пуць Н.М., Завьялова Т.И., Улимбашев А.М. Овощеводство. Санкт-Петербург, 2020. 496 с. <https://elibrary.ru/kvvaub>
8. Аутко А., Забара Ю., Гануш Г. Современные технологии в овощеводстве. Минск, 2012. 490 с. ISBN 978-985-08-1383-1
9. Lopes G.B., Goelzer A., Reichel T., de Resende M.L.V., Duarte W.F. Potential of *Desmodium illinoense* as biofertilizer in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023;(49):102657. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102657>
10. Синиченко Н.А., Ванюшкина И.А., Козарь Е.Г., Маркарова М.Ю. Влияние биопрепаратов различной природы на развитие альтернариоза и урожайность растений томата в условиях Приморского края. *Известия ФНЦО*. 2023;(1):25-31. <https://doi.org/10.18619/2658-4832-2023-1-25-31> <https://elibrary.ru/wovluf>
11. Неменуцкая Л.А. Ключевые тенденции экологизации овощной продукции. Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 24-25 ноября 2022 г. Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет, 2022. С. 406-408. <https://elibrary.ru/datqxs>
12. Гончарова Н.М. Влияние биопрепаратов на семенную продуктивность тыквы крупноплодной. *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2021;1(29):93-99. <https://elibrary.ru/hxbvgr>
13. Мироненко О.В., Асатурова А.М., Шипиевская Е.Ю. Томашевич Н.С., Исмаилов В.Я., Волкова Г.В. Органическое земледелие в Российской Федерации. Биопестициды в производстве органической продукции. Краснодар, 2024. 84 с. ISBN 978-5-93491-991-8 <https://elibrary.ru/igtuk>
14. Abdelkhalek A., Al-Askar A.A., Elbeaino T., Moawad H., El-Gendi H. Protective and curative activities of *Paenibacillus polymyxa* against Zucchini yellow mosaic virus infestation in squash plants. *Biology*. 2022;11(8):1150. <https://doi.org/10.3390/biology11081150>
15. Фадеева Ю. А. Качество зерна ярового ячменя при обработке семян биопрепаратами. Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Материалы международной научно-практической конференции, Йошкар-Ола, 20–21 марта 2025 года. Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2025. С. 114-117. <https://elibrary.ru/qcfjvr>
16. Su Y., Liu C., Fang H., Zhang D. *Bacillus subtilis*: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microb Cell Fact*. 2020;19(1):173. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01436-8>
17. Задорожная В.А. Оценка стимулирующего действия микробиологического препарата на основе штамма *Bacillus subtilis* на посевные качества зерновых культур. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 2022;15(172):136-142. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_136
<https://elibrary.ru/qpqmai>
18. El-Sharkawy E.E.S., Abdelrazik E. Biocontrol of Fusarium root rot in squash using mycorrhizal fungi and antagonistic microorganisms. *Egypt J Biol Pest Control*. 2022;32(1). <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00513-x>
19. Sood M., Kapoor D., Kumar V., Sheteiw M.S., Ramakrishnan M., Landi M., Arani F., Sharma A. Trichoderma: The “Secrets” of a Multitalented Biocontrol Agent. *Plants*. 2020;18,9(6):762. <https://doi.org/10.3390/plants9060762>
20. Дубовка С.Е. Коковихин С.В. Эффективность применения химических и биологических препаратов для защиты пшеницы озимой от болезней. Виртуозы науки: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных за 2023 г, Краснодар, 06–15 ноября 2023 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. С. 110-112. <https://elibrary.ru/wlvpoa>
21. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Часть I. Пестициды. Изд. офиц. Информация в «Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации», приведена по состоянию на 10 декабря 2024 г. <http://www.mcs.gov.ru>
22. Добруцкая Е.Г., Антошкина М.С., Кушнерева В.П., Химич Г.А. Адаптивные свойства сортов кабачка. *Селекция и семеноводство овощных культур*. 2009;(43):166-170. <https://elibrary.ru/ujfmot>
23. Химич Г.А., Кушнерева В.П. Разнообразие овощных тыкв: кабачок и патиссон. *Овощи России*. 2009;(3):43-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2009-3-43-45>
<https://elibrary.ru/oydoqx>
24. Markarova A.E., Markarova M.Y., Razin O.A., Nadezhkin S.M. The microorganisms natural consortia effectiveness in the white cabbage crop cultivation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. P. 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/953/1/012035>
<https://elibrary.ru/jfmsqa>
25. Melini F., Melini V., Luziatelli F., Abou Jaoudé R., Ficca A.G., Ruzzi M. Effect of microbial plant biostimulants on fruit and vegetable quality: current research lines and future perspectives. *Plant*. 2023;(14). <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1251544>
26. Нугманова Т.А., Мойсеяк М.Б., Кабаргина М.В., Шаненко Е.Ф. Исследование влияния полифункционального биопрепарата на показатели качества и питательную ценность растений как сырья для производства продуктов питания. *Saxar*. 2024;(2):47-51. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2024-2-47-51>

• References

1. Romanchuk G. V. Proper nutrition as a guarantee of health. Nutrition culture of the population of the Grodno region. *Modern problems of hygiene, radiation and environmental medicine*. 2023;(13):179-189. (In Russ.) <https://elibrary.ru/cccaab>
2. Akhtarov D.N., Denezhko L.V. The importance of vegetables in nutrition, their medicinal value. Technical solutions in agribusiness of students, graduate students and young scientists: Collection of articles from the International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, Yekaterinburg, March 17, 2023.

- Yekaterinburg: Ural State Agrarian University, 2023. P.233-237. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rfsqrl>
3. Shantasov A.M., Sokolov S.D., Bocharnikov A.N., Sokolov A.S., Izmukhambetova N.G., Nugmanova Zh.R. Promising directions in selection of marrow. *Vegetable crops of Russia*. 2018;(2):24-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-1-24-27> <https://elibrary.ru/xplujn>
 4. Lukin A.A., Shtrikker L.A. Chemical composition, nutritional value and features of culinary processing of zucchini. *Bulletin of the Dagestan State Agrarian University*. 2024;3(23):156-161. (In Russ.) https://doi.org/10.52671/26867591_2024_3_156 <https://elibrary.ru/lxxwp>
 7. Kotov V.P., Adritskaya N.A., Puts N.M., Zavialova T.I., Ulumbashev A.M. Vegetable growing. SPb, 2020. 496 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/kvvaub>
 8. Autko A., Zabara Yu., Ganush G. Modern technologies in vegetable growing. Minsk, 2012. (In Russ.)
 9. Lopes G.B., Goelzer A., Reichel T., de Resende M.L.V., Duarte W.F. Potential of *Desmodesmus abundans* as biofertilizer in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023;(49):102657. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102657>
 10. Sinichenko N.A., Vanyushkina I.A., Kozar E.G., Markarova M.Yu. Influence of biological preparations of various nature on the development of alternariosis and the yield of tomato plants in the conditions of Primorsky Krai. *News of FSVC*. 2023;(1):25-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2658-4832-2023-1-25-31> <https://elibrary.ru/wovluf>
 11. Nemenuschaya L. A. Key trends in the greening of vegetable products. Technical support for innovative technologies in agriculture: collection of scientific articles from the International scientific and practical conference, Minsk, November 24-25, 2022. Minsk: BSATU, 2022: 406-408. <https://elibrary.ru/datqxs>. (In Russ.)
 12. Goncharova N.M. Belokobylskaya E.D. The influence of biological products on the seed productivity of large-fruited pumpkin. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*. 2021;1(29):93-99. (In Russ.) <https://elibrary.ru/hxbvgr>
 13. Mironenko O.V., Asaturova A.M., Shipievskaya E.Yu. Tomashevich N.S., Ismailov V.Ya., Volkova G.V. Organic farming in the Russian Federation. Biopesticides in organic production. Krasnodar: Prosveshchenie-Yug, 2024. (In Russ.) <https://elibrary.ru/igtuk>
 14. Abdelkhalek A., Al-Askar A.A., Elbeaino T., Moawad H., El-Gendi H. Protective and curative activities of *Paenibacillus polymyxa* against Zucchini yellow mosaic virus infestation in squash plants. *Biology*. 2022;11(8):1150. <https://doi.org/10.3390/biology11081150>
 15. Fadeeva Yu.A. Grain quality of spring barley after seed treatment with biopreparations. Current issues of improving the technology of production and processing of agricultural products: Proceedings of the international scientific and practical conference, Yoshkar-Ola, March 20-21, 2025. Yoshkar-Ola: Mari State University, 2025: 114-117. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qcfjvr>
 16. Su Y., Liu C., Fang H., Zhang D. *Bacillus subtilis*: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microb Cell Fact*. 2020;19(1):173. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01436-8>
 17. Zadorozhnaya V.A. Podlesnykh N.V., Sokolenko G.G. Evaluation of stimulating effect of microbiological preparation based on *bacillus subtilis* strain on sowing qualities of grain crops. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(1(72)):136-142. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_136 <https://elibrary.ru/qpqmai> (In Russ.)
 18. El-Sharkawy E.E.S., Abdelrazik E. Biocontrol of Fusarium root rot in squash using mycorrhizal fungi and antagonistic microorganisms. *Egypt J Biol Pest Control*. 2022;32(1). <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00513-x>
 19. Sood M., Kapoor D., Kumar V., Sheteiw M.S., Ramakrishnan M., Landi M., Araniti F., Sharma A. Trichoderma: The "Secrets" of a Multitalented Biocontrol Agent. *Plants*. 2020;18,9(6):762. <https://doi.org/10.3390/plants9060762>
 20. Dubovka S.E., Kokovikhin S.V. The effectiveness of using chemical and biological agents to protect winter wheat from diseases. Virtuosos of science: Collection of abstracts of the International scientific and practical conference of students and young scientists for 2023, Krasnodar, November 06–15, 2023. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 2024:110-112. <https://elibrary.ru/wlvpoa> (In Russ.)
 21. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. State Catalogue of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use in the Russian Federation. Part I. Pesticides. Official Edition. Information in the State Catalogue of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use in the Russian Federation is as of December 10, 2024. <http://www.mcx.gov.ru> (In Russ.)
 22. Dobrutskaia E.G., Antoshkina M.S., Kushnereva V.P., Khimich G.A. Adaptive characteristics of marrow squash varieties. *Selection and growing of vegetable crops*. 2009;(43):166-170 <https://elibrary.ru/ujfmot>
 23. Khimich G., Kushnereva V. Diversity of squashes and pumpkins. *Vegetable crops of Russia*. 2009;(3):43-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2009-3-43-45> <https://elibrary.ru/oydoqx>
 24. Markarova A.E., Markarova M.Y., Razin O.A., Nadezhkin S.M. The microorganisms natural consortia effectiveness in the white cabbage crop cultivation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. P. 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/953/1/012035> <https://elibrary.ru/fmsqa>
 25. Melini F., Melini V., Luziatelli F., Abou Jaoudé R., Ficca A.G., Ruzzi M. Effect of microbial plant biostimulants on fruit and vegetable quality: current research lines and future perspectives. *Plant*. 2023;(14). <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1251544>
 26. Nugmanova T.A., Moiseyak M.B., Kabargina M.V., Shanenko E.F. Study of the effect of a multifunctional biopreparation on the quality indicators and nutritional value of plants as raw materials for food production. *Sugar*. 2024;(2):47-51. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2024-2-47-51> (In Russ.)

Об авторах:

Ксения Игоревна Дацук – младший научный сотрудник лаборатории физиологических основ семеноведения овощных культур, <https://orcid.org/0009-0007-4670-1442>, SPIN-код: 8907-0048, ks_datsyuk@mail.ru

Мария Юрьевна Маркарова – кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник, Scopus ID 96263, <https://orcid.org/00000-0002-7951-2222>, SPIN-код: 9808-8712, myriam@mail.ru

Сергей Михайлович Надежкин – доктор биол. наук, профессор РАН, зав. лабораторно-аналитическим отделом, <https://orcid.org/0000-0001-5786-3454>, Scopus ID: 57193556462, SPIN-код:1564-1159, автор для переписки, nadegs@yandex.ru

Галина Александровна Химич – старший научный сотрудник, SPIN-код: 6237-0156,

About the Authors:

Kseniya I. Datsyuk – Junior Researcher of the Laboratory of Physiological Basis of Seed Science of Vegetable Crops, <https://orcid.org/0009-0007-4670-1442>, SPIN-code: 8907-0048, ks_datsyuk@mail.ru

Maria Yu. Markarova – Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Scopus ID 96263, <https://orcid.org/00000-0002-7951-2222>, SPIN-code: 9808-8712, myriam@mail.ru

Sergey M. Nadezhkin – Dr. Sci. (Biology), Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory and Analytical Department, SPIN-code: 1564-1159, <https://orcid.org/0000-0001-5786-3454>, Scopus ID: 57193556462, Corresponding Author, nadegs@yandex.ru

Galina A. Khimich – Senior Researcher, SPIN-code: 6237-0156,

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-78-86>
УДК: 634.317.34:631.535:631544

П.О. Казаков^{1,2*}, С.В. Акимова^{1*},
И.В. Нечипоренко^{1,2}, Д.П. Паламарчук^{1,2},
А.В. Соловьев¹, А.В. Зубков¹, А.П. Демидова¹

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
127434, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

² Всероссийский Научно-Исследовательский
Институт Фитопатологии
143050, Россия, р.п. Большие Вязёмы,
ул. Института, д.5

*Авторы для переписки:

paulkazako@gmail.com, akimova@rgau-msha.ru

Финансирование: Данное исследование не имеет внешнего финансирования.

Вклад авторов: Казаков П.О.: проведение исследований, концептуализация. Казаков П.О., Нечипоренко И.В., Паламарчук Д.П.: проведение исследований, верификация данных, формальный анализ. Акимова С.В., Соловьев А.В., Зубков А.В.: методология. Казаков П.О., Акимова С.В.: администрирование данных. Нечипоренко И.В., Паламарчук Д.П., Демидова А.П.: создание черновика рукописи. Казаков П.О., Акимова С.В.: создание рукописи и её редактирование.

Конфликт интересов. Акимова С.В. является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2023 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Казаков П.О., Акимова С.В., Нечипоренко И.В., Паламарчук Д.П., Соловьев А.В., Зубков А.В., Демидова А.П. Разработка приемов ускоренного размножения зелеными черенками перспективных для защищенного грунта подвоев цитрусовых культур. *Овощи России*. 2025;(6):78-86.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-78-86>

Поступила в редакцию: 27.09.2025

Принята к печати: 11.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Pavel O. Kazakov^{1,2*}, Svetlana V. Akimova^{1*},
Ivan V. Nechiporenko^{1,2}, Diana P. Palamarchuk^{1,2},
Alexandr V. Solovyev¹, Alexandr V. Zubkov¹,
Alena P. Demidova¹

¹ Russian State Agrarian University - Moscow
Timiryazev Agricultural Academy
Timiryazevskaya street, 49,
Moscow, 127434, Russia

² All-Russian Phytopathology Research Institute
St. Institute, Big Vyazyomy, 143050, Russia

*Corresponding Authors: paulkazako@gmail.com,
akimova@rgau-msha.ru

Authors' Contribution: Kazakov P.O.: investigation, conceptualization. Kazakov P.O., Nechiporenko I.V., Palamarchuk D.P.: investigation, validation, formal analysis. Akimova S.V., Solovyev A.V., Zubkov A.V.: methodology. Kazakov P.O., Akimova S.V.: data curation. Nechiporenko I.V., Palamarchuk D.P., Demidova A.P.: writing – original draft. Kazakov P.O., Akimova S.V.: writing – review & editing.

Conflict of interest. Akimova S.V. has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2023, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citations: Kazakov P.O., Akimova S.V., Nechiporenko I.V., Palamarchuk D.P., Solovyev A.V., Zubkov A.V., Demidova A.P. Development of techniques for accelerated propagation of perspective citrus rootstocks for protected ground using green cuttings. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):78-86. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-78-86>

Received: 27.09.2025

Accepted for publication: 11.11.2025

Published: 18.12.2025

Разработка приемов ускоренного размножения зелеными черенками перспективных для защищенного грунта подвоев цитрусовых культур

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. В настоящее время цитрусовые культуры занимают ведущую позицию в мире по производству продукции. Альтернативой промышленному выращиванию цитрусовых в условиях открытого грунта могут служить интенсивные технологии выращивания в защищенном грунте, для которых важно разрабатывать приемы ускоренного получения посадочного материала. Поэтому, целью наших исследований было выявление оптимальных компонентов состава смеси смачивающего порошка ИМК и ИУК для ускоренного размножения зелеными черенками перспективных подвоев цитрусовых культур, круглогодично выращиваемых в условиях защищенного грунта.

Методы. Зеленые черенки подвоев цитрусовых культур цитрумело (*C. trifoliata* (L.) Raf × *C. paradise* Mcf), цитрус волкамериана (*C. volkameriana* Ten. & Pasq), цитрус макрофилла (*C. macrophylla* Wester) обрабатывали опытными смесями стимуляторов корнеобразования ИМК (индолил-3-масляная кислота) и ИУК (индол-3-уксусная кислота), соответствующих вариантам эксперимента (ИМК 0,5% (контроль); ИМК 1,0%; ИМК 0,5% + ИУК 0,5%; ИМК 0,5% + ИУК 1,0%; ИМК 1,0% + ИУК 0,5%; ИМК 1,0% + ИУК 1,0%) и высаживали в кассеты с субстратом, после чего укореняли в пленочном тоннеле с туманообразующей установкой, при влажности 85-90% и температуре +20...+25°C.

Результаты. При размножении исследуемых подвоев выявлена видоспецифическая реакция на разрабатываемые приемы. Для обработки зеленых черенков перед посадкой на укоренение для каждого подвоя эффективно использовать смачивающийся порошок с различным компонентным составом ИМК и ИУК: для *C. trifoliata* × *C. paradisi* смесь ИМК 1,0% + ИУК 1,0%; *C. volkameriana* – смесь ИМК 1,0% + ИУК 0,5%, для *C. macrophylla* смесь ИМК 0,5% + ИУК 0,5%.

Заключение. Основываясь на полученных результатах, применение оптимальных компонентов состава позволяет получить не только максимальные показатели укореняемости зеленых черенков (66,7-100%), но и достоверные различия по числу и суммарной длине корней.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

цитрусовые культуры, подвой, зелёные черенки, укоренение, фитогормоны, защищенный грунт

Development of techniques for accelerated propagation of perspective citrus rootstocks for protected ground using green cuttings

ABSTRACT

Relevance. Currently, citrus crops occupy a leading position in the world in terms of production. An alternative to industrial cultivation of citrus fruits in open ground can be intensive cultivation technologies in protected ground, for which it is important to develop methods for accelerated production of planting material. Therefore, the aim of our research was to identify the optimal components of the mixture of IBA and IAA wetting powder for the accelerated propagation of green cuttings of promising citrus rootstocks grown year-round in protected ground conditions.

Methods. Green cuttings of citrus rootstocks citrumelo (*C. trifoliata* (L.) Raf × *C. paradise* Mcf), citrus volkameriana (*C. volkameriana* Ten. & Pasq), and citrus macrophylla (*C. macrophylla* Wester) were treated with experimental mixtures of root formation stimulants IBA (indolyl-3-butyric acid) and IAA (indole-3-acetic acid) corresponding to the experimental variants (IBA 0.5% (control); IAA 1.0%; IBA 0.5% + IAA 0.5%; IBA 1.0%; IBA 1.0% + IAA 0.5%; IBA 1.0% + IAA 1.0%) and planted in cassettes with substrate, after which they were rooted in a film tunnel with a fogging unit, at a humidity of 85-90% and a temperature of +20...+25°C.

Results. During propagation of the rootstocks under study, a species-specific reaction to the techniques being developed was observed. For the treatment of green cuttings before planting for rooting, it is effective to use a wettable powder with different component compositions of IBA and IAA for each rootstock: for *C. trifoliata* × *C. paradisi*, a mixture of IBA 1.0% + IAA 1.0%; *C. volkameriana* – a mixture of IBA 1.0% + IAA 0.5%, for *C. macrophylla* a mixture of IBA 0.5% + IAA 0.5%.

Conclusion. Based on the results obtained, the use of optimal components of the composition allows not only to achieve maximum rooting rates of green cuttings (66.7-100%), but also to obtain reliable differences in the number and total length of roots.

KEYWORDS:

Citrus crops, rootstock, green cuttings, rooting, phytohormones, protected ground
Funding. This research received no external funding.

Введение

В настоящее время цитрусовые культуры занимают лидирующие позиции в мире по площади насаждений и объемам производства продукции [1, 2]. Их выращивают в субтропических и тропических регионах более чем в 140 стран мира, благодаря популярности среди потребителей из-за высоких вкусовых качеств и значительного содержания биологически активных веществ – фенольных соединений (флавоноидов, фенольных кислот и кумаринов), терпеноидов (лимоненоидов и каротиноидов), а также пектина [3, 4].

Ежегодные объемы мирового производства цитрусовых составляют около 162 миллиона тонн, при этом основные объемы приходятся на апельсины (46%), мандарины (27%), лимоны и лаймы (13%) [5, 6]. Причем за последние 60 лет мировое производство цитрусовых увеличилось почти в 5,5 раз, а основными производителями являются: Китай, Бразилия, Индия, США, Австралия, ЮАР, а также страны средиземноморского бассейна, такие как Греция, Италия, Испания, Тунис и Турция [7, 8, 9]. При этом, Российская Федерация является одним из крупнейших потребителей цитрусовых в мире, занимая в 2024 году 3 место по объему импорта в размере 1,9 млн. тонн [10, 11, 12]. На фоне значительного объема потребления цитрусовых, внутреннее производство сильно ограничено. Во многом, это связано с высокими требованиями цитрусовых культур к почвенно-климатическим условиям. Помимо этого, выращивание в России в условиях открытого грунта возможно только на ограниченной территории субтропического региона Черноморского побережья Краснодарского края [13].

Альтернативой традиционному выращиванию цитрусовых в условиях открытого грунта могут быть многочисленные способы выращивания в защищенном грунте в условиях лимонариев, оранжерей, зимних садов и теплиц. Историческими примерами могут служить оранжерейное выращивание в Российской Империи, а также траншейная культура, получившая широкое распространение в Южных республиках СССР [14, 15]. В настоящее время, в Российской Федерации также существуют крупные лимонарии, например – Учебно-опытное хозяйство ГБПОУ "Уфимский лесотехнический техникум" площадью 1 га с объемом производства 20-22 тонн плодов в год [16].

Однако вследствие высоких затрат на строительство и обслуживание культивационных сооружений, выращивание цитрусовых растений в защищенном грунте может быть экономически выгодно только при разработке и применении интенсивных технологий круглогодичного выращивания, значительно повышающих урожайность на ограниченной площади теплиц [17, 18].

Одним из вариантов повышения продуктивности насаждений цитрусовых при интенсивном выращивании в условиях защищенного грунта и обеспечивающих непрерывность роста, является применение перспективных вечнозеленых подвоев [19], позволяющих управлять силой роста привитых сортов и контролировать период вегетации [20, 21, 22, 23].

Наиболее распространенный способ получения подвоев цитрусовых – семенное размножение [24]. Высокая эффективность этого метода основана на свойственном некоторым видам явлению полиэмбриональности (многозародышевости). Это тип спорофитного апомиксиса, когда ранний эмбриогенез в семязпочке способствует развитию нуцеллярных зародышей, сформированных бесполом путем из центральной части семязпочки. Нуцеллярные сеянцы генетически идентичны материнскому растению, поэтому полученные из них подвои отличаются высокой однородностью [25].

Однако при производстве привитого посадочного материала может наблюдаться недостаток качественных подвоев. Это вызвано ограниченной доступностью семян, низкой урожайности семенных маточных насаждений и длительным сроком вступления в фазу полного плодоношения новых маточных насаждений [26, 27, 28].

Решение данной проблемы – ускоренное вегетативное размножение перспективных подвоев зелеными черенками. Помимо скорости размножения, полученный материал также является генетически однородным, что способствует использованию в интенсивном производстве [29, 30].

Наиболее распространенным подвоем для цитрусовых насаждений субтропического района Черноморского побережья Краснодарского края является лимон трехлисточковый (*C. trifoliata* (L.) Raf) [31]. Однако из-за сдержанного роста, ярко выраженного периода покоя и несовместимости со многими сортами лимона [32], данный подвой мало пригоден для интенсивного выращивания цитрусовых в условиях защищенного грунта.

Альтернативой могут являться основные мировые интенсивные коммерческие подвои цитрусовых, не имеющие ярко выраженного периода покоя и обладающие высокой энергией роста – цитрумело (*C. trifoliata* (L.) Raf × *C. paradise* Mcf), цитрус волкамериана (*C. volkameriana* Ten. & Pasq), цитрус макрофилла (*C. macrophylla* Wester).

Выбор данных подвоев обусловлен их видовой специализацией:

C. trifoliata × *C. paradisi* – один из наиболее подходящих подвоев для производства посадочного материала апельсинов и грейпфрутов [33, 34];

C. volkameriana – наиболее подходящий подвой для лимонов, вследствие высокой совместимости сорто-подвойных комбинаций и обеспечивающий высокое качество плодов [35];

C. macrophylla – благодаря генетической близости является наиболее подходящим подвоем для получения посадочного материала кафрского лайма (*C. hystrix* DC), плоды и особенно листья которого широко используются в пищевых, косметических и лекарственных целях. При этом, экспорт свежей продукции кафрского лайма в Российскую Федерацию ограничен короткими сроками хранения, а переработка влечет за собой естественную потерю качества, поэтому данный вид цитрусовых культур имеет большие перспективы для расширения площадей возделывания в защищенном грунте [36, 37].

При вегетативном размножении подвоев цитрусовых культур зелеными черенками важным этапом технологии является применение стимуляторов корнеобразования – фитогормонов класса ауксинов, которые по многочисленным исследованиям положительно влияют на укореняемость зеленых черенков [38, 39, 40].

Поэтому целью наших исследований было выявление оптимальных компонентов состава смеси смачивающего порошка (СП) ИМК и ИУК для ускоренного размножения зелеными черенками перспективных подвоев цитрусовых культур, круглогодично выращиваемых в условиях защищенного грунта.

1. Материалы и методы

Опыты проводили в 2023 году в учебно-научно-производственном центре садоводства и овощеводства имени В.И. Эдельштейна ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева по методикам М.Т. Тарасенко [41, 42].

Объектами исследований служили подвои цитрусовых культур *C. trifoliata* × *C. paradisi*, *C. volkameriana*, *C.*

Таблица 1. Схема опыта и состав используемых смесей стимуляторов корнеобразования
Table 1. Experimental scheme and composition of root formation stimulant mixtures used

Вариант	Масса навески талька, г	Масса навески ИМК, г	Масса навески ИУК, г
ИМК 0,5% (контроль)	99,5	0,5	-
ИМК 1,0%	99,0	1,0	-
ИМК 0,5% + ИУК 0,5%	99,0	0,5	0,5
ИМК 0,5% + ИУК 1,0%	98,5	0,5	1,0
ИМК 1,0% + ИУК 0,5%	98,5	1,0	0,5
ИМК 1,0% + ИУК 1,0%	98,0	1,0	1,0

macrophylla, с которых нарезали зеленые черенки для укоренения.

При подготовке зеленых черенков к укоренению использовали смеси стимуляторов корнеобразования ИМК (индол-3-масляная кислота) и ИУК (индол-3-уксусная кислота или гетероауксин) (табл.1.).

Стимуляторы корнеобразования применяли в препаративной форме смачивающегося порошка (СП) (ГОСТ 21507-2013), который готовили за трое суток до эксперимента.

Подготовленные навески ИМК (производитель: HiMedia Laboratories), ИУК (производитель: HiMedia Laboratories), соответствующие исследуемым вариантам, растворяли в 50 мл этилового спирта 96%. Далее готовили навески выступавшего буферным наполнителем фармацевтического талька (производитель: ООО «Тальксиб»), после чего смешивали навески талька и спиртовые растворы фитогормонов.

Полученные смеси тщательно перемешивали, после чего высушивали в термостате при температуре +25°C в течение 48 часов. После полного высыхания смесей, производили их измельчение в фарфоровых ступках, затем исследуемые варианты стимуляторов корнеобразования были готовы к использованию.

Перед началом эксперимента с опытных растений подвоев растений рода *Citrus* L. срезали вызревшие зеленые черенки. При этом их отбирали из средней части побегов, длиной 8-10 см с двумя-тремя междоузлиями и листьями, (нижний лист и колючки удаляли). Срезы выполняли прямыми, нижний располагали на 1 см под почкой, верхний – на 0,5 см над верхней почкой.

После обработки базальной части зеленых черенков опытными СП стимуляторов корнеобразования, их высаживали в пластиковые кассеты (25 ячеек, объем ячейки 380 см²) с торфяным субстратом, состоящим из смеси верхового нейтрализованного торфа низкой степени разложения «Агробалт-Н» (производитель: ООО «Пиндstrup») с агроперлитом (производитель: ООО «Завод минеральных удобрений») в соотношении 5:1. Укоренение черенков проводили в пленочном тоннеле с туманообразующей установкой низкого давления. Режим работы установки с 8:00 до 20:00 составлял 5 секунд работы с интервалом 15 минут. В ночное время увлажнение не производили. Влажность воздуха в тоннеле поддерживали на уровне 85-90%, температура воздуха +20...+25°C.

Учет морфометрических показателей развития корневой и надземной системы проводили на 40 сутки укоренения и при этом учитывали: % укорененных черенков, количество корней (шт.), длина корней (см), суммарная длина корней

(см), суммарную длину приростов (см), количество листьев (шт.).

Повторность опытов трёхкратная, по 10 черенков в повторности. Статистическую обработку проводили методом однофакторного дисперсионного анализа по методикам В.Ф. Моисейченко и А.В. Исачкина [43, 44] с использованием компьютерных программ Microsoft Office Excel 2019 и PAST 4., что подтвердило достоверность полученных результатов исследований. Статистически значимые различия средних значений проверяли с помощью t-критерия ($P < 0.05$). Данные представлены в виде средних значений и стандартной ошибки среднего ($M \pm SEM$).

2. Результаты исследований

Результаты исследований, полученные на 40 день укоренения зеленых черенков, перспективных для круглогодичного интенсивного выращивания в условиях защищенного грунта подвоев цитрусовых культур, показали видовую реакцию на разрабатываемые приемы.

При укоренении зеленых черенков подвоя *C. trifoliata* × *C. paradisi*, выявлено преимущество совместного применения ИМК и ИУК в концентрациях 1,0%, при применении которых укореняемость составила 66,7% против 0% в контроле. Помимо этого в данном варианте были выявлены лучшие морфометрические показатели развития корневой системы, превосходящие показатели укорененных черенков в остальных вариантах. Так, количество корней составило 6,07 ± 0,83 шт. против 1,47 ± 0,28–1,93 ± 0,48 шт. в остальных вариантах; длина корней составила 6,07 ± 0,83 см против 1,05 ± 0,31–3,47 ± 0,65 см в остальных вариантах; суммарная длина корней составила 37,40 ± 5,12 см против 6,15 ± 1,76–10,56 ± 2,68 см в остальных вариантах (табл. 2, рис. 1).

Что касается результатов наблюдений за морфометрическими показателями развития надземной системы у подвоя *C. trifoliata* × *C. paradise*, то на момент проведения учетов (40 суток укоренения), приросты у укорененных черенков отсутствовали.

На 40 день укоренения зеленых черенков подвоя цитрусовых культур *C. volkameriana* установлено преимущество всех вариантов смесей стимуляторов корнеобразования, при применении которых укореняемость составила 86,7-100%. Однако, только в варианте с применением ИМК 1,0% + ИУК 0,5% выявлены достоверные различия с контролем по всем учитываемым показателям, за исключением длины корней. При этом, число корней составило 9,17 ± 0,49 шт. против 6,27 ± 0,54 шт. в контроле, суммарная длина корней – 54,72 ± 1,41 см по сравнению с 37,69 ± 3,24 см в контроле,

Таблица 2. Морфометрические показатели развития корневой системы укорененных черенков подвоя *C. trifoliata* × *C. paradise*
Table 2. Morphometric parameters of root system development in rooted cuttings of *C. trifoliata* × *C. paradise* rootstock

Вариант	Укореняемость, %	Количество корней, шт.	Длина корней, см	Суммарная длина корней, см
ИМК 0,5% (контроль)	0	-	-	-
ИМК 1,0%	0	-	-	-
ИМК 0,5% + ИУК 0,5%	36,7	1,93±0,48	2,08±0,54	10,56±2,68
ИМК 0,5% + ИУК 1,0%	53,3	1,47±0,28	3,47±0,65	9,07±1,71
ИМК 1,0% + ИУК 0,5%	30,0	1,80±0,52	1,05±0,31	6,15±1,76
ИМК 1,0% + ИУК 1,0%	66,7	6,07±0,83a	4,14±0,56a	37,40±5,12a
НСР ₀₅	-	1,85	1,75	10,32

НСР₀₅ рассчитана при помощи однофакторного дисперсионного анализа: результаты выражены как среднее значение ± стандартное отклонение; разница между средними с контролем достоверна на основе сравнения разниц между средними с НСР на 5% уровне значимости.



ИМК 0,5% + ИУК 1,0%



ИМК 1,0% + ИУК 0,5%



ИМК 1,0% + ИУК 1,0%

Рис. 1. Внешний вид укорененных черенков подвоя *C. trifoliata* × *C. paradise* на 40 сутки наблюдений
Fig. 1. External appearance of rooted cuttings of *C. trifoliata* × *C. paradise* rootstock on the 40th day of observation

Таблица 3. Морфометрические показатели развития укорененных черенков подвоя *C. volkameriana*
Table 3. Morphometric indicators of rooting development in *C. volkameriana* rootstock cuttings

Вариант	Укореняемость, %	Количество корней, шт.	Длина корней, см	Суммарная длина корней, см	Длина прироста, см	Количество листьев, шт.
ИМК 0,5% (контроль)	83,3	6,27±0,54	5,06±0,44	37,69±3,24	10,90±0,95	5,87±0,52
ИМК 1,0%	86,7	7,90±0,62	5,68±0,45	50,96±3,97a	17,60±1,40a	9,67±0,85a
ИМК 0,5% + ИУК 0,5%	93,3	5,77±0,41	6,13±0,44	38,79±2,83	17,07±1,24a	9,40±0,77a
ИМК 0,5% + ИУК 1,0%	96,7	6,80±0,33	6,27±0,31	43,35±2,16	16,50±0,74a	8,73±0,51a
ИМК 1,0% + ИУК 0,5%	100	9,17±0,49a	6,16±0,18	54,72±1,41a	22,10±0,56a	11,60±0,43a
ИМК 1,0% + ИУК 1,0%	96,7	7,67±0,36	6,20±0,29	48,31±2,15	17,43±0,75a	8,03±0,35
НСР ₀₅	-	1,89	Fe<Ft	11,10	3,97	2,42

НСР₀₅ рассчитана при помощи однофакторного дисперсионного анализа: результаты выражены как среднее значение ± стандартное отклонение; разница между средними с контролем достоверна на основе сравнения разниц между средними с НСР на 5% уровне значимости. «Fe<Ft» – F эмпирическое < F теоретическое, не доказана разница между средними с НСР на 5 % уровне значимости



ИМК 0,5%



ИМК 1,0%



ИМК 0,5% + ИУК 0,5%



ИМК 0,5% + ИУК 1,0%



ИМК 1,0% + ИУК 0,5%



ИМК 1,0% + ИУК 1,0%

Рис. 2. Внешний вид укорененных черенков подвоя *C. volkameriana* на 40 сутки наблюдений
Fig. 2. External appearance of rooted cuttings of *C. volkameriana* on the 40th day of observation

Таблица 4. Морфометрические показатели развития укорененных черенков подвоя *C. macrophylla*
Table 4. Morphometric indicators of rooting development in *C. macrophylla* rootstock cuttings

Вариант	Укореняемость, %	Количество корней, шт.	Длина корней, см	Суммарная длина корней, см	Длина прироста, см	Количество листьев, шт.
ИМК 0,5%	93,3	6,23±0,41	6,94±0,48	47,44±3,19	20,13±1,34	10,33±0,67
ИМК 1,0%	96,7	8,27±0,32a	8,06±0,36	68,21±2,78a	24,07±0,91a	12,07±0,48a
ИМК 0,5% + ИУК 0,5%	100	11,27±0,27a	7,20±0,15	80,43±1,73a	23,90±0,43a	10,63±0,24
ИМК 0,5% + ИУК 1,0%	100	6,33±0,24	7,61±0,44	46,58±2,25	20,87±0,65	9,27±0,40
ИМК 1,0% + ИУК 0,5%	100	6,83±0,20	7,80±0,39	52,57±2,50	21,60±0,49	10,73±0,29
ИМК 1,0% + ИУК 1,0%	100	8,23±0,22a	7,64±0,22	62,13±1,65a	23,97±0,53a	9,80±0,18
НСР ₀₅	-	1,16	Fe<Ft	9,72	3,19	1,67

НСР₀₅ рассчитана при помощи однофакторного дисперсионного анализа: результаты выражены как среднее значение ± стандартное отклонение; разница между средними с контролем достоверна на основе сравнения разниц между средними с НСР на 5% уровне значимости. «Fe<Ft» – F эмпирическое < F теоретическое, не доказана разница между средними с НСР на 5 % уровне значимости



ИМК 0,5%



ИМК 1,0%



ИМК 0,5% + ИУК 0,5%



ИМК 0,5% + ИУК 1,0%



ИМК 1,0% + ИУК 0,5%



ИМК 1,0% + ИУК 1,0%

Рис. 3. Внешний вид укорененных черенков подвоя *C. macrophylla* на 40 сутки наблюдений.
Fig. 3. External appearance of rooted cuttings of *C. macrophylla* on the 40th day of observation



А



В

Рис. 4. Динамика изменения надземной системы исследуемых черенков подвоя *C. macrophylla* на 1 сутки (А) и 40 сутки (В) исследований
Fig. 4. Dynamics of changes in the above-ground system of the investigated *C. macrophylla* rootstock cuttings on day 1 (A) and day 40 (B) of the research

длина приростов $22,10 \pm 0,56$ см по сравнению с $10,90 \pm 0,95$ см в контроле и количество листьев $11,60 \pm 0,43$ шт. против $5,87 \pm 0,52$ шт. в контроле (табл. 3, рис. 2).

При укоренении зеленых черенков подвоя цитрусовых культур *C. macrophylla* также установлено преимущество всех вариантов стимулятора корнеобразования с сочетаниями ИМК и ИУК, при применении которых укореняемость составила 100%.

Однако достоверные различия с контролем по числу и суммарной длине корней получены в вариантах с обработкой базальных частей зеленых черенков стимулятором корнеобразования с ИМК в концентрации 1,0%, а также при совместном применении ИМК 0,5% + ИУК 0,5% и ИМК 1,0% + ИУК 1,0%. При этом лучшие результаты получены в варианте с ИМК 0,5% + ИУК 0,5% при применении которых число корней составило $11,27 \pm 0,27$ шт. против $6,23 \pm 0,41$ шт. в контроле, суммарная длина корней $80,43 \pm 1,73$ см против $47,44 \pm 3,19$ см в контроле (Табл. 4, рис. 3).

Обсуждение

При вегетативном размножении зелеными черенками перспективных для круглогодичного интенсивного выращивания в условиях защищенного грунта подвоев цитрусовых культур нами было установлено, что *C. trifoliata* × *C. paradisi*, *C. volkameriana* и *C. macrophylla* показали значительную видовую специфичность по всем учитываемым показателям.

Так, при укоренении зелёных черенков подвоя *C. trifoliata* × *C. paradisi*, укореняемость отмечена только в вариантах стимулятора корнеобразования с совместным применением ИМК и ИУК. Вероятно, это связано с низким уровнем эндогенной ИУК у данного подвоя, отсутствие которой, по некоторым исследованиям, может отрицательно сказываться на укоренении зеленых черенков цитрусовых культур [45]. В вариантах с компонентами смеси, включающей в своем составе ИУК (ИМК 1,0% + ИУК 1,0%), укореняемость зеленых черенков значительно возрастала и достигая максимума 66,7 % против 0% в контроле (ИМК 0,5%). Также, в данном варианте были выявлены лучшие морфометрические показатели развития корневой системы, превосходящие показатели укорененных черенков в остальных вариантах. Отсутствие приростов подвоя *C. trifoliata* × *C. paradise* на 40 сутки укоренения можно объяснить медленным развитием корневой системы по сравнению с другими подвоями.

При укоренении зеленых черенков подвоя *C. volkameriana* было установлено преимущество всех опытных вариантов, в которых укореняемость составила 86,7-

100%. Однако, только в варианте ИМК 1,0% + ИУК 0,5% выявлены достоверные различия с контролем по всем учитываемым показателям. Подобное влияние ИМК и ИУК согласуется с результатами исследований Ahmed M.E.E. и др. [46], посвященных размножению и укоренению *C. volkameriana* в культуре *in vitro*. Согласно результатам исследований, наибольший процент укоренения (100%) был получен при преобладании ИМК на фоне низких концентраций других фитогормонов. А также с результатами исследований Pio, R. и др. [47], согласно которым наибольший процент укоренения регенерировавших соматических гибридов, а также *C. volkameriana* был при совместном применении ИМК и ИУК.

При укоренении зеленых черенков подвоя *C. macrophylla* установлено преимущество всех опытных смесей ИМК и ИУК, при применении которых укореняемость составила 100%. Эти результаты также согласуются с результатами исследований Tallón C.I. и др. согласно которым укоренение микропобегов *C. macrophylla* в культуре *in vitro* было наилучшим (100%) при совместном применении ИМК и ИУК в диапазоне от 0,5 до 2 мг/л на среде MS половинной концентрации [48].

При этом согласно результатам наших исследований, достоверные различия с контролем по числу и суммарной длине корней были получены в вариантах с обработкой базальных частей ИМК 1,0%; ИМК 0,5% + ИУК 0,5% и ИМК 1,0% + ИУК 1,0, что может свидетельствовать о видовой специфичности данного подвоя касательно реакции на повышенные дозы исследуемых фитогормонов или на их синергетическое действие при равных соотношениях.

Заключение

При размножении зелеными черенками различных по происхождению перспективных для круглогодичного интенсивного выращивания цитрусовых культур в условиях защищенного грунта подвоев (*C. trifoliata* × *C. paradisi*, *C. volkameriana*, *C. macrophylla*) выявлена видоспецифическая реакция на разрабатываемые приемы.

Для обработки регуляторами роста базальных частей зеленых черенков перед посадкой на укоренение для каждого подвоя эффективно использовать смачивающийся порошок с различным компонентным составом ИМК и ИУК: для *C. trifoliata* × *C. paradisi* – смесь ИМК 1,0% + ИУК 1,0% (укореняемость 66,7 % против 0% в контроле); для *C. volkameriana* – смесь ИМК 1,0% + ИУК 0,5%; для *C. macrophylla* – смесь ИМК 0,5% + ИУК 0,5% (укореняемость 100 % против 83,3-93,3% в контроле).

• Литература

- Li Q., Zhu L., Zeng Y., Huang Y., Ling L., Peng., Chun C. Differences in fruit quality between Jinjia Shatangju tangerine (*Citrus reticulata* 'Jinjia Shatangju') grafted on two types of rootstocks and the relationship with absorption, distribution, and utilization of nitrogen. *Scientia Horticulturae*. 2024;328:112926. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112926>
- Das A.K., Pachare H.G., Kumar A. Phytophthora spp. associated with citrus: diversity, diagnostics and integrated management with a focus on India. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2025;140:102853. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102853>
- Farag M.A., Abib B., Ayad L., Khattab A.R. Sweet and bitter oranges: An updated comparative review of their bioactives, nutrition, food quality, therapeutic merits and biowaste valorization practices. *Food Chemistry*. 2020;331:127306.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127306>
- Vetere M.L., Iobbi V., Lanteri A.P., Minuto A., Minuto G., Tommasi N.D., Bisio A. The biological activities of *Citrus* species in crop protection. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025;22:102139. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102139>
- Kaur S., Singh V., Vern P., Panesar S.P. From citrus waste to value-added products: Exploring biochemical routes for sustainable valorization. *Process Biochemistry*. 2025;158:81-98. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.08.009>
- Gonzatto M.P., Santos J.S. Citrus Research – Horticultural and Human Health Aspects; eds. Gonzatto M.P., Santos J.S. Intech Open; 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110519>
- Lombardo M.F., Panebianco S., Azzaro A., Timpanaro G., Polizzi G., Cirvilleri G. Copper-alternative products to control anthracnose and *Alternaria* Brown spot on fruit of Tarocco sweet oranges and lemon in Italy. *Crop Protection*. 2024;176:106520.

<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106520>

8. Wang S., Xie W., Yan X. Effects of future climate change on Citrus quality and yield in China. *Sustainability*. 2022;14:9366.

<https://doi.org/10.3390/su14159366>

9. Blasco J., Cubero S., Moltó E. Chapter 12 - Quality Evaluation of Citrus Fruits. Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation (Second Edition); 2016; 305-325. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00012-8>

10. Abu Hatab A. Demand relationships in orange exports to Russia: a differential demand system approach focusing on Egypt. *Agric Econ*. 2016;4(22). <https://doi.org/10.1186/s40100-016-0066-5>

11. Kelemetov E., Platonovskiy N., Shuldyakov A., Neiskashova E., Sinelnikova O. Global export and import of oranges: volume, countries, trends. *Moscow Economic Journal*. 2024;9(4).

https://doi.org/10.55186/2413046X_2024_9_4_216

12. По данным информационной системы «Аргус-Фито» Россельхознадзора россияне стали больше употреблять фруктов и овощей. Россельхознадзор; 2025 [обновлено 10 января 2025; процитировано 23 октября 2025]. Доступно:

<https://fsvps.gov.ru/news/po-dannym-informacionnoj-sistemy-argus-fito-rosselkhozнадзора-rossijane-stali-bolshe-upotrebljat-fruktoy-i-ovoshhei/>

13. Avdeev S.M., Belolubtse A.I. The probability of cultivation of citrus crops on the territory of the Black Sea coast of the Caucasus. *BIO Web of Conferences*. 2023;66:02005.

<https://doi.org/10.1051/bioconf/20236602005>

14. Веселова С.С. Зимние сады российских дворцов и особняков XVIII-XIX вв.: образы в живописи и литературе. *Вестник Московского университета*. 2010;3:124-142.

<https://elibrary.ru/mvnpkul>

15. Григорцевич Л.Н., Сурма М.А., Алехна А.И., Телеш А.Д. Агротехнические особенности выращивания цитрусовых культур в оранжерейных условиях. *Труды БГТУ*. 2015;1(174):223-226.

<https://elibrary.ru/whcpbph>

16. О лимонарии. Учебно-опытное хозяйство ГБПОУ «Уфимский лесотехнический техникум»; 2016 [обновлено 31 декабря 2016; процитировано 23 октября 2025]. Доступно:

<https://lemonarium.ru/index.php/o-limonarii>

17. Kudiyarov R.I., Dyamurshayeva E.B., Sauytbayeva G.Z., Evgenievna D.G., Taiteli M.A. Tuleubayev Z. Performance Indicators of the Improved Technology of Soilless Growth the Tomato in the PreAral Sea Region. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2023;23(1):109-116. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2023.109.116>

18. Nyaki D.C. Comparative analysis of open-field and protected vegetable cultivation in Arusha, Tanzania. *Int J Hortic Food Sci*. 2023;5(1):120-124.

<https://doi.org/10.33545/26631067.2023.v5.i1b.206>

19. Belmonte-Ureña L., Garrido-Cardenas J., Camacho-Ferrer F. Analysis of world research on grafting in horticultural plants. *HortScience*. 2020;55(1):112-120.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI14533-19>

20. Rubio-Cabetas M. J., Felipe A. J., Bielsa B. Pilowred®, a nematode-resistant and low-vigor rootstock for *Prunus*. *HortScience*. 2025;60(4):565-569. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI18285-24>

21. Geng F., Moran R., Day M., Halteman W., Zhang D. *In vitro* shoot proliferation of apple rootstocks «B.9», «G.30», and «G.41» grown under red and blue light. *HortScience*. 2015;50(3):430-433.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.3.430>

22. Fidanci A., Burak M., Erenoglu B., Akçay M.E. Determination of *in vitro* propagation techniques for some clonal cherry rootstocks. *Acta Hortic*. 2008;795:409-412.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.795.61>

23. Rathore M.S., Sharma P., Dhiman V.K., Thakur M. An efficient *in vitro* propagation of clonal cherry rootstock Gisela-6 and validation of genetic stability through SCoT markers. *Indian Journal of Horticulture*. 2024;81(02):181-190. <https://doi.org/10.58993/ijh/2024.81.2.10>

24. Alves S., Girardi A., Alves F., Soranz R., Coletta H. Advances in Citrus propagation in Brazil. *Revista Brasileira Fruticultura Jaboticabal*. 2019;41(6):e-422. <http://doi.org/10.1590/0100-29452019422>

25. Villegas-Monter, A., Del Carmen Matínez-Ochoa, E., Andrade-

Rodriguez, M., Villegas-Velázquez, I. Citrus Polyembryony. *IntechOpen*. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105994>

26. Albrecht U., Bordas M., Lamb B., Meyering B., Bowman K.D. Influence of propagation method on root architecture and other traits of young Citrus rootstock plants. *HortScience*. 2017;52(11):1569-1576.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI12320-17>

27. Bisi R.B., Albrecht U., Bowman K.D. Seed and seedling nursery characteristics for 10 USDA Citrus rootstocks. *HortScience*. 2020;55(4):528-532. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14598-19>

28. Tardivo C., Patel S., Bowman K. D., Albrecht U. Nursery characteristics and field performance of nine novel Citrus rootstocks under HLB-endemic conditions. *HortScience*. 2025;60(6):931-939.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI18529-25>

29. Albrecht U., Bodaghi S., Meyering B., Bowman K.D. Influence of rootstock propagation method on traits of grafted sweet orange trees. *HortScience*. 2020;55(5):729-737.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI14928-20>

30. Abobatta W.F. Intensive fruit orchards cultivation. *J Plant Sci Phytopathol*. 2021;5:072-075.

<https://doi.org/10.29328/journal.jpssp.1001064>

31. Gorchkov V.M. P. trifoliata root system as a specialized nutrition organ of the citrus genus. *Fruit growing and viticulture of South Russia* 2022;5(77):169-175. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-5-77-169-175> <https://elibrary.ru/ntuczx>

32. Al-Jaleel, A., Zekri, M., Hammam, Y. Yield, fruit quality, and tree health of «Allen Eureka» lemon on seven rootstocks in Saudi Arabia. *Scientia Horticulturae*. 2005;105(4):457-465.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.02.008>

33. Wang P., Liu F., Sun Y., Liu X., Jin L. Physiological and Molecular Insights into Citrus Rootstock–Scion Interactions: Compatibility, Signaling, and Impact on Growth, Fruit Quality and Stress Responses. *Horticulturae*. 2025;11:1110.

<https://doi.org/10.3390/horticulturae11091110>

34. Wutscher H.K., Shull A.V. Performance of 13 Citrus Cultivars as Rootstocks for Grapefruit 1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 1972;97(6):778–781.

<https://doi.org/10.21273/JASHS.97.6.778>

35. Zogas V., Kokkinos E., Karagianni A., Ntamposi E., Voulgarakis A.S., Hussain S.B. Effect of Rootstock Selection on Tree Growth, Yield, and Fruit Quality of Lemon Varieties Cultivated in Greece. *Agronomy*. 2023;13:2265. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092265>

36. Luro F., Baccati C., Paoli M., Marchi E., Costantino G., Gibernau M., Ollitrault P., Tomi F. Phylogenetic and taxonomic status of *Citrus halimii* B.C. Stone determined by genotyping complemented by chemical analysis of leaf and fruit rind essential oils. *Scientia Horticulturae*. 2022;299:111018. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111018>

37. Budiarto R., Wathoni N., Mubarak S., Hamdani J., Ujilestari T., Darsih C., Sari R., Rukmana R., Sholikin M. Recent overview of kaffir lime (*Citrus hystrix* DC) dual functionality in food and nutraceuticals. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024;18:1-16.

<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101384>

38. Pinto K.G.D., Albertino S.M.F., Leite B.N., Pereira Soares D.O., Castro F.M.D., Gama L.A., Clivati D., Atroch A.L. Indole-3-butyric acid improves root system quality in Guarana Cuttings. *HortScience*. 2020;55(10):1670-1675. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14984-20>

39. Supriya B., Singh R., Effect of auxin and media for rooting of different fruit crop cuttings: A review. *Int J Res Agron*. 2024;7(7S):687-691.

<https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i7Sj.1176>

40. Saini N., Anmol. The potential of plant growth regulator (auxin) in enhancing fruit crop propagation via Stem Cuttings. *Int. J. Adv. Biochem. Res*. 2024;8(5):1001-1007.

<https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i5l.1230>

41. Тарасенко М.Т. Разработка научных основ вегетативного размножения садовых культур и промышленной технологии выращивания посадочного материала. *Известия ТСХА*. 1982;(6):120-131.

42. Тарасенко М.Т. Размножение растений зелёными черенками. М.: Колос; 1967. 351 с.

43. Исачкин А.В., Крючкова В.А. Основы научных исследований в садоводстве: учебник для вузов; под редакцией А.В. Исачкина. Санкт-Петербург: Лань; 2020. 420 с. <https://elibrary.ru/adexkc>

44. Моисейченко В.Ф., Заверюха А.Х., Трифонова М.Ф. Основы научных исследований в плодоводстве, овощеводстве и виноградарстве. М.: Колос, 1994. 383 с.
45. Sagee O., Raviv M., Medina S., Becker D., Cosse A. Involvement of rooting factors and free IAA in the rootability of citrus species stem cuttings. *Scientia Horticulturae*. 1992;51(3-4):187-195. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(92\)90118-V](https://doi.org/10.1016/0304-4238(92)90118-V)
46. Ahmed M.E.E., Abido A.I.A., Aly M.A., Abdulla M.M., Abo EL-Fadl R.E.E. *In vitro* propagation of Volkamer lemon using nodal cutting segments. *J. Adv. Agric. Res. (Fac. Agric. Saba Basha)*. 2017;22(3):498-513.
47. Pio R., de Assis Alves Mourão Filho F., Mendes B.M.J., Entelmann F.A., Alves A.S.R. Propagation of citrus somatic hybrids with potential for utilization as rootstocks. *Fruits*. 2006;61:1-7. <https://doi.org/10.1051/fruits:2006001>
48. Tallón C.I., Porras I., Pérez-Tornero O. Efficient propagation and rooting of three citrus rootstocks using different plant growth regulators *in vitro*. *Cell.Dev.Biol.-Plant*. 2012;48:488-499. <https://doi.org/10.1007/s11627-012-9457-9>

• References

12. According to data from the Rosselkhoznadzor's Argus-Fito information system, Russians are consuming more fruit and vegetables. Rosselkhoznadzor; 2025. [Electronic resource]. Access mode: [https://fsvps.gov.ru/news/po-dannym-informacionnoj-sistemy-argus-](https://fsvps.gov.ru/news/po-dannym-informacionnoj-sistemy-argus-fito-rosselkhoznadzora-rossijane-stali-bolshe-upotrebljat-fruktoy-i-ovoshhej)

- [fito-rosselkhoznadzora-rossijane-stali-bolshe-upotrebljat-fruktoy-i-ovoshhej](https://fsvps.gov.ru/news/po-dannym-informacionnoj-sistemy-argus-fito-rosselkhoznadzora-rossijane-stali-bolshe-upotrebljat-fruktoy-i-ovoshhej). Date of access (23.10.2025)
14. Veselova S.S. Winter gardens of Russian palaces and mansions of the 18th-19th centuries: images in painting and literature. *Moscow university bulletin. Series 8: history*. 2010;3:124-142. (In Russ.) <https://elibrary.ru/mvvpkul>
15. Grigortsevich L.N., Surma M.A., Alekhna A.I., Telesh A.D. Agrotechnical features of cultivation of citrus crops in the greenhouse conditions. *Works of BGTU*. 2015;1(174):223-226. (In Russ.) <https://elibrary.ru/whcphb>
16. About lemonaria. Educational and experimental farm of the Ufa Forestry Technical College; 2016 [Electronic resource]. Access mode: <https://lemonarium.ru/index.php/o-limonarii>. Date of access (23.10.2025)
41. Tarasenko M.T. Development of scientific foundations for vegetative propagation of garden crops and industrial technology for growing planting material. *Izvestiya TSHA*. 1982;(6):120-131. (In Russ.)
42. Tarasenko M.T. Propagation of plants green cuttings. M. Kolos; 1967. P. 351. (In Russ.)
43. Isachkin A.V., Kryuchkova V.A. Fundamentals of scientific research of horticulture: textbook for universities; ed. Isachkin A.V. Saint Petersburg: Lan; 2020. 420 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/adexkc>
44. Moiseyichenko V.F. Fundamentals of Scientific Research in Fruit Growing, Vegetable Growing and Viticulture. Moscow: Kolos; 1994. 383 p. (In Russ.)

Об авторах:

Павел Олегович Казаков – аспирант кафедры плодоводства, виноградарства и виноделия, института Садоводства и ландшафтной архитектуры (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), младший научный сотрудник (ФГБНУ ВНИИФ), SPIN-код 6777-1099, <https://orcid.org/0000-0001-9387-9015>; автор для переписки, paulkazako@gmail.com

Светлана Владимировна Акимова – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры плодоводства, виноградарства и виноделия института Садоводства и ландшафтной архитектуры, SPIN-код 1786-0008, <https://orcid.org/0000-0002-7267-1220>, Scopus ID: 56872788000; автор для переписки, akimova@rgau-msha.ru

Иван Владиславович Нечипоренко – аспирант кафедры плодоводства, виноградарства и виноделия института Садоводства и ландшафтной архитектуры (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ ВНИИФ), SPIN-код 2977-7349, <https://orcid.org/0000-0002-1904-2695>, Scopus ID: 57946985700, Researcher ID: HHS-2436-2022; vannechiporenko@gmail.com

Диана Павловна Паламарчук – аспирант кафедры плодоводства, виноградарства и виноделия института Садоводства и ландшафтной архитектуры (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), младший научный сотрудник (ФГБНУ ВНИИФ), SPIN-код 8544-3181, <https://orcid.org/0000-0003-3787-4118>; dianapalamar22@mail.ru

Александр Валерьевич Соловьев – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой плодоводства, виноградарства и виноделия института Садоводства и ландшафтной архитектуры, <https://orcid.org/0000-0002-3186-9767>, Scopus ID: 57204731886; SPIN-код: 8245-2748, a.solovev@rgau-msha.ru

Александр Валерьевич Зубков – кандидат экономических наук, доцент кафедры плодоводства, виноградарства и виноделия института Садоводства и ландшафтной архитектуры, <https://orcid.org/0000-0003-2410-152X>, Scopus ID: 57946823000; SPIN-код: 7829-0105, a.zubkov@rgau-msha.ru

Алена Павловна Демидова – ассистент кафедры ландшафтной архитектуры института Садоводства и ландшафтной архитектуры, <https://orcid.org/0000-0003-2522-2470>, Scopus ID: 59189195300, SPIN-код: 8245-6901, a.demidova@rgau-msha.ru

About the Authors:

Pavel O. Kazakov – PhD Student of the Department of Fruit Growing, Viticulture and Winemaking, Institute of Horticulture and Landscape Architecture, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9387-9015>;

SPIN-code: 6777-1099, Corresponding Author, paulkazako@gmail.com

Svetlana V. Akimova – Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Fruit Growing, Viticulture and Winemaking, Institute of Horticulture and Landscape Architecture, <https://orcid.org/0000-0002-7267-1220>,

Scopus ID: 56872788000; SPIN-code 1786-0008,

Corresponding Author, akimova@rgau-msha.ru

Ivan V. Nechiporenko – PhD Student of the Department of Fruit Growing, Viticulture and Winemaking, Institute of Horticulture and Landscape Architecture Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Junior Researcher,

<https://orcid.org/0000-0002-1904-2695>,

Scopus ID: 57946985700, Researcher ID:

HHS-2436-2022, SPIN-code: 2977-7349, vannechiporenko@gmail.com

Diana P. Palamarchuk – PhD Student of the Department

of fruit Growing, Viticulture and Winemaking, Institute of Horticulture and Landscape Architecture Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3787-4118>,

SPIN-code: 8544-3181, dianapalamar22@mail.ru

Alexandr V. Solovyev – Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Department of Fruit Growing, Viticulture and Winemaking Institute of Horticulture and Landscape Architecture, <https://orcid.org/0000-0002-3186-9767>, Scopus ID: 57204731886; SPIN-code: 8245-2748, a.solovev@rgau-msha.ru

Alexandr V. Zubkov – Cand. Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Fruit Growing, Viticulture and Winemaking, Institute of Horticulture and Landscape Architecture, <https://orcid.org/0000-0003-2410-152X>,

Scopus ID: 57946823000; SPIN-code: 7829-0105, a.zubkov@rgau-msha.ru

Alena P. Demidova – Assistance Lecturer of the Department of Landscape Architecture, Institute of Horticulture and Landscape Architecture, <https://orcid.org/0000-0003-2522-2470>,

Scopus ID: 59189195300, SPIN-code: 8245-6901, a.demidova@rgau-msha.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-87-94>
УДК: 635.64:631.531

В.П. Горобей¹,
Л.В. Павлов², В.Ю. Москалевич³

¹ ФГБУН «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах»
НИИЦ «Курчатовский институт»
298600, Россия, Республика Крым,
г. Ялта, ул. Кирова, 31

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБУН ФНЦО)
143072, Россия, Московская область,
Одинцовский район, п. ВНИИССОК,
ул. Селекционная, д.14

³ ФГАОУ ВО «КФУ имени В.И. Вернадского»,
Институт «Агротехнологическая академия»,
295492, Россия, Республика Крым, п. Аграрное

*Автор для переписки: magarach@rambler.ru

Вклад авторов. Горобей В.П.: концептуализация, создание рукописи и ее редактирование; Павлов Л.В.: методология, администрирование проекта; Москалевич В.Ю.: программное обеспечение, верификация данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Горобей В.П., Павлов Л.В., Москалевич В.Ю. Выделение семян томата для селекционных исследований. *Овощи России*. 2025;(6):87-94.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-87-94>

Поступила в редакцию: 15.07.2025

Принята к печати: 22.10.2025

Опубликована: 18.12.2025

Vasily P. Gorobey¹,
Leonid V. Pavlov², Vadim Yu. Moskalevich³

¹ All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking
"Magarach" RAS
st. Kirova, 31, Yalta,
Republic of Crimea, Russia, 298600

² Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC)
14, Selektionnaya str., VNISSOK,
Odintsovo region, Moscow district, 143072,
Russia

³ V.I. Vernadsky Crimean Federal University",
Institute "Agrotechnological Academy"
Agrarnoe settlement,
Republic of Crimea, 295492, Russia

*Corresponding Author: magarach@rambler.ru

Authors' Contribution: Gorobey V.P.: conceptualization, manuscript preparation and editing; Pavlov L.V.: methodology, project administration; Moskalevich V.Yu.: software, data verification.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Gorobey V.P., Pavlov L.V., Moskalevich V.Yu. Separation of tomato seeds for breeding research. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):87-94. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-87-94>

Received: 15.07.2025

Accepted for publication: 22.10.2025

Published: 18.12.2025

Выделение семян томата для селекционных исследований

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Для достижения необходимого уровня самообеспеченности продукцией овощеводства необходимо соответствующее технико-технологическое обеспечение их производителей. Для решения данной задачи требуется внедрение инновационных технологий производства продукции овощеводства, а также обеспечение необходимым количеством современной высокопроизводительной техники и оборудования. Особое значение имеет механизация селекционных исследований с томатами, повышение эффективности выделения семян томатов за счет совершенствования технических решений и конструктивных особенностей машины, направленных на снижение энергоёмкости процесса и повышение производительности.

Материал и методика. Машина для выделения семян из селекционных партий томатов, содержит раму, электродвигатель, клиноременную передачу, бункер, вал, шнек, бичи, сито, кожух, щиток, сборник, лоток секций сепаратора и семьявыделителя. Секции сепаратора и семьявыделителя установлены на общей раме и снабжены приводами ведущих валов через клиноременную передачу от одного электродвигателя. Для регулирования эффективности работы машины за шнеком сепаратора установлен пропеллер под углом β , за ним установлены две пары последовательно расположенных бичевых планок с фиксированными углами опережения α_1 и α_2 . Семьявыделитель имеет на ведущем валу цилиндрический шнек и четыре бича, установленных попарно с возможностью регулирования угла опережения α_3 . Для теоретических исследований разработана эквивалентно-силовая схема шнека приемной камеры машины для выделения семян из плодов селекционных партий томата к определению силы резания плодов томата кромкой шнека с прерывистыми витками и учтены теоретические наработки по обоснованию конструктивно-режимных параметров измельчителя с зигзагообразным расположением ножей в режущем аппарате.

Результаты. Показано, что расчетная сила резания плодов томатов загрузочным шнеком сепаратора машины для выделения семян из селекционных партий зависит от состояния кромок витков. С вырезными сегментами на витках в рассматриваемом диапазоне прочностных характеристик прочности кожицы томатов она ниже, чем со сплошными. С вырезными сегментами сила резания изменяется от 55 Н до 200 Н, а со сплошными от 80 Н до 280 Н, что в среднем показывает снижение на 30 %. Приведены значения высоты свободного падения томатов из бункера на шнек со сплошной кромкой и предлагаемыми вырезными сегментами для оптимизации эффективности работы машины для выделения семян томатов в непрерывном режиме.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

томат, селекция, семена, выделение, сепаратор, семьявыделитель, шнек, кромка витка, вырезной сегмент, сила резания, параметры

Isolation of tomato seeds for breeding research

ABSTRACT

Relevance. To achieve the required level of self-sufficiency in vegetable products, it is necessary to provide their producers with appropriate technical and technological support. To solve this problem, it is necessary to introduce innovative technologies for the production of vegetable products, as well as to provide the necessary amount of modern high-performance machinery and equipment. Of particular importance is the mechanization of breeding research with tomatoes. Increasing the efficiency of tomato seed selection by improving technical solutions and design features of the machine, aimed at reducing the energy intensity of the process and increasing productivity.

Material and Methodology. A machine for separating seeds from selection lots of tomatoes, comprising a frame, an electric motor, a V-belt drive, a hopper, a shaft, auger, beaters, a sieve, a casing, a shield, a collector, a tray of separator sections and a seed extractor. The separator and seed extractor sections are mounted on a common frame and are equipped with drives for the drive shafts via a V-belt drive from one electric motor. To regulate the efficiency of the machine, a propeller is installed behind the separator auger at an angle β , followed by two pairs of successively arranged flail bars with fixed advance angles α_1 and α_2 . The seed extractor has a cylindrical auger on the drive shaft and four flails installed in pairs with the ability to regulate the advance angle α_3 . For theoretical studies, an equivalent-force diagram of the auger of the receiving chamber of the machine for separating seeds from fruits of tomato selection lots was developed to determine the cutting force of the auger edge with intermittent turns of cutting tomato fruits by the auger edge and theoretical developments were taken into account to substantiate the design and operating parameters of a chopper with a zigzag arrangement of knives in the cutting apparatus.

Results. It is shown that the calculated cutting force of tomato fruits by the loading auger of the separator of the machine for extracting seeds from breeding lots depends on the state of the edges of the turns. With cut segments on the turns in the considered range of strength characteristics of the tomato skin, it is lower than with solid ones. With cut segments, it changes from 55 N to 200 N, and with solid ones from 80 N to 280 N, which on average shows a decrease of 30 %. The values of the free fall height of tomatoes from the hopper onto the auger with a solid edge and the proposed cut segments are given to optimize the efficiency of the machine for extracting tomato seeds in a continuous mode.

KEYWORDS:

tomato, selection, seeds, extraction, separator, seed extractor, auger, edge of the turn, cut segment, cutting force, parameters

Введение

Среди основных направлений ускорения развития сельскохозяйственного производства особое значение имеет селекционная работа. Одной из задач при создании новых сортов томатов является выделение семян из томатов селекционных участков и участков элитного семеноводства. Семеноводство овощных культур сложно и трудоемко. Некоторые технологические процессы не отработаны в производственных условиях. Кроме того, в связи с большим разнообразием технологических процессов производства семян необходимо применять механизацию с учетом биологических и агротехнических особенностей культуры.

Народная селекция, а позднее профессиональные селекционеры, используя самые разнообразные методы, добились больших успехов и получили сорта и гибриды культурного типа, имеющие плоды от мелких вишневидных (черри) до «гигантов» – массой 800 г и более [1]. Для обеспечения потребности овощеводческих хозяйств элитными семенами необходимы сельскохозяйственные машины и оборудование для их выращивания и уборки, так как нагрузка на технику для овощеводства значительно превышает существующие нормативы. Технологический уровень и техническая оснащенность большинства семеноводческих хозяйств не сопоставимы с уровнем современных зарубежных селекционно-семеноводческих центров и компаний [2-5]. Селекционерами проводятся исследования по оценке и отбору коллекционного материала томата, как одной из наиболее распространенных овощных культур, стоящей по площади возделывания на первом месте, обнаружению новых доноров и генетических источников с набором ценных признаков и использования их для создания новых линий и сортов [6], изучение высокопродуктивных сортов и гибридов томата отечественной и зарубежной селекции с высокой транспортабельностью с хорошим отделением от плодоножки на пригодность для механизированной уборки [7]. Отмечается направление селекции томата по созданию сортов, которые, наряду с декоративно-эстетической раскраской плода, не уступают по урожайности и вкусовым качествам уже существующим, включающее отбор исходного донорского материала с комплексом хозяйственно-ценных признаков, межсортовую гибридизацию, отбор растений и линий на селективируемые признаки, беккроссирование и последующий отбор с целью передачи сортам заданных отдельных или комплекса признаков [8]. Для перспектив производства высококачественных семян томата, борьбы с патогенами, передающимися через семена и получения сильной рассады проводятся работы по определению влияния метода экстракции семян на их физиологическое качество [9,10].

Селекционеры, для извлечения семян из образцов (селекционных номеров) плодов томата, обычно имеют дело с большим количеством образцов. Технологические приемы проведения селекционных работ выполняются, в основном, за счет ручного труда для ускорения выведения новых перспективных сортов. Требуется создание техники и оборудования для работы с небольшими партиями, так как использование для этих целей машин и оборудования механизированных линий для подготовки выделения семян томатов на семеноводческие цели практически нереально.

Известно технико-экономическое исследование потенциального влияния рабочих параметров машины на выделение семян томата. Анализ данных показал, что при работе машины со скоростью барабана 15,71 м/с (600 об/мин), загрузке 150 кг/ч плодов томата и выборе барабана с диаметром отверстий

5 мм были достигнуты следующие результаты экономической эксплуатации разработанной машины: производительность (9,12 кг/ч), эффективность (96,80%), чистота семян (92%), процент потерь семян (3,20%) и удельное энергопотребление (0,042 кВт·ч/кг). Испытания на всхожесть показали, что механическое извлечение семян не ухудшает их всхожесть по сравнению с ручным методом. Стоимость ручного процесса выделения семян на 42 и 182% больше по сравнению со стоимостью механической системы до и после вычета выручки от продажи томатной мякоти соответственно [11].

Наиболее близким устройством для практического решения технических задач выделения семян томатов для селекционных исследований является выделитель ВСТ-0,5. Машина предназначена для извлечения семян из образцов (селекционных номеров) плодов томата на третьем и четвертом этапах работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве [12,13]. Производительность в час основного времени – 764 кг, потребляемая мощность 2 кВт. Состоит из двух кинематических независимых устройств: сепаратора, предназначенного для дробления плодов томатов и отделения семян и сока от кожицы, с диаметром отверстия сита 5 мм и семявыделителя, предназначенного для выделения семян из сока, с диаметром отверстия сита 1,2 мм. Привод стационарный, от трех электродвигателей. Производительность в час основного времени по исходному материалу при непрерывной подаче – не менее 500 кг. Машина применяется при работе с партиями томатов при сортоиспытаниях и в первичном семеноводстве, которые значительно отличаются по объему и количеству обрабатываемых образцов на различных этапах селекционной работы. Недостатками известного устройства при получении семян из селекционных партий томатов являются потери семенного материала, большая энергоемкость процесса и низкая производительность при выделении семян из партий образцов томатов с малыми массами (от 2–3 до 100 кг).

Отмечается целесообразность технико-технологической модернизации производственных процессов имеющейся в них базовой сельскохозяйственной техники для повышения обеспеченности сельскохозяйственных организаций сельскохозяйственной техникой и оборудованием для овощеводства [14, 15], а для достижения необходимого уровня самообеспеченности продукцией овощеводства необходимо соответствующее технико-технологическое обеспечение их производителей. Для решения данной задачи требуется внедрение инновационных технологий производства продукции овощеводства, а также обеспечение необходимым количеством современной высокопроизводительной техники и оборудования [16].

По результатам ранее проведенных исследований для обоснования выбора рабочих органов и узлов перспективного устройства выделения семян томата [17] предложена машина для выделения семян томата из селекционных партий [18], состоящая из секций сепаратора и семявыделителя. Ее устройство может быть также применено для выделения семян из столовых и технических сортов винограда для исследований и переработки.

Цель исследований – повышение эффективности механизированного выделения семян томатов для ускорения работы в селекции за счет совершенствования технических решений и конструктивных особенностей машины, включающей секции сепаратора и семявыделителя, направленных на снижение энергоемкости процесса и повышение производительности, в частности, обоснования параметров шнекового узла сепаратора.

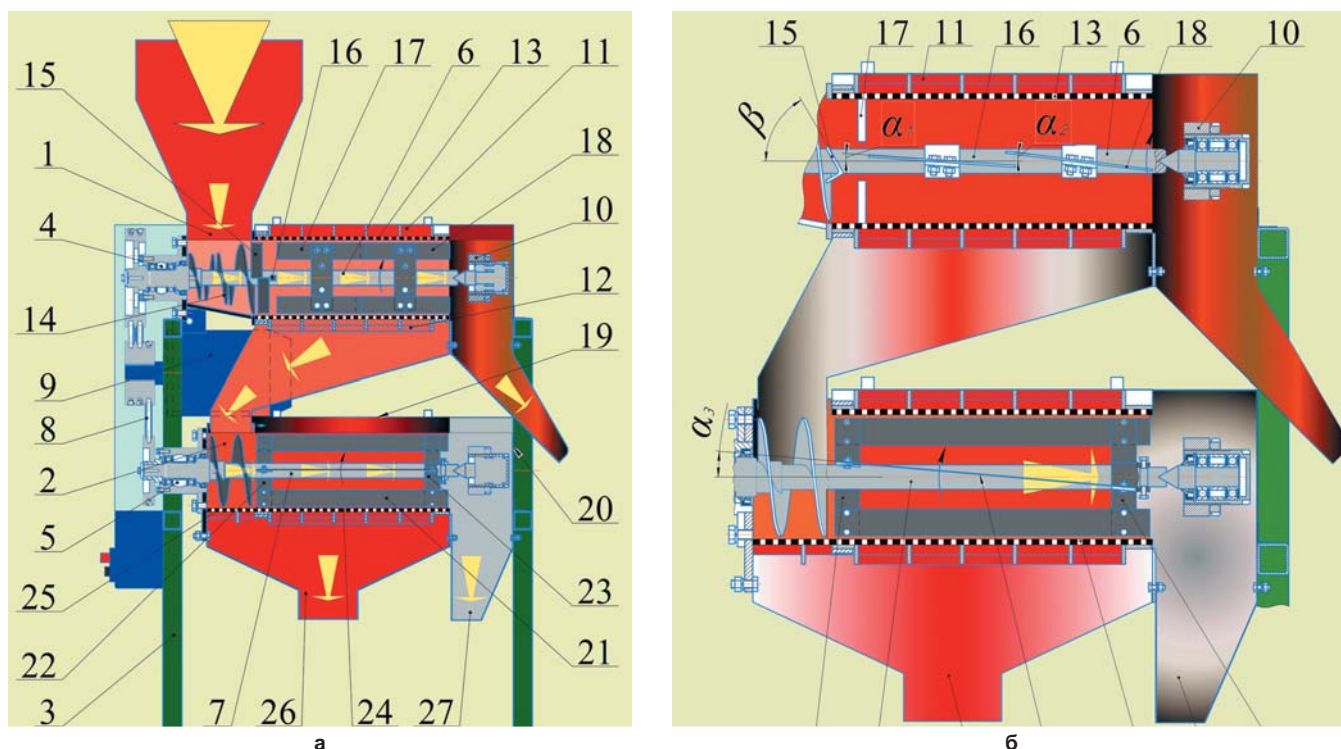


Рис. 1. Схематическое изображение машины для выделения семян томата из селекционных партий: а – вид сбоку, б – продольный разрез фрагментов секций сепаратора и семявыделителя
Fig. 1. Schematic representation of a machine for separating tomato seeds from breeding lots: а – side view, б – longitudinal section of fragments of the separator and seed extractor sections

Материал и методы исследований

При проведении исследований были учтены технические решения и конструктивные особенности машины для выделения семян томата из селекционных партий (рис. 1, а), включающей секции сепаратора 1 и семявыделителя 2, которые установлены на общей раме 3 и снабжены приводами 4, 5 ведущих валов 6, 7 через клиноременную передачу 8 от электродвигателя 9 [18].

На ведущем валу 6 сепаратора, один конец которого соединен крестообразной полумуфтой с приводом 4, а противоположный установлен на опорной траверсе 10, состоящей из резьбового корпуса, в котором на подшипниках установлен вал с конусообразной оконечностью, уплотнением сальником и фиксационной контргайкой, закрепленной на соединении верхнего 11 и нижнего 12 каркасов, охватывающих сетчатый цилиндр 13, расположены шнек 14, пропеллер 15 противорез 16 и последовательно расположенные бичевые планки 17, 18. Семявыделитель содержит такие же составные части, как и сепаратор: полуцилиндрические каркасы: верхний и нижний, траверсу, щитки верхний 19 и торцевой 20, привод аналогичной конструкции, отличающийся шкивом, ведущий вал, цилиндрический шнек, четыре бича 21 на неподвижно закрепленном на валу кронштейне 22 и подвижном кронштейне 23 для регулирования угла опережения α_3 , сетчатый цилиндр 24, сетчатый полуцилиндр 25, сборник сока 26, приемник семян 27.

Для регулирования эффективности работы машины за шнеком сепаратора установлен пропеллер разнолопастной двухлопастной под углом β к оси приводного вала. За ним установлены две пары последовательно расположенных бичевых планок с отверстиями для крепления эластичных накладок на спиралевидных кронштейнах с фиксированными углами опережения α_1 и α_2 (рис. 1, б). Пропеллер и бичи расположены в ситчатом цилиндре, установленном обечайкой в полукольца полуцилиндрических

каркасов, закрепленных одним торцом в станине, а другим замками на раме. Каркасы имеют ребра жесткости, причем кольцевые выполнены вертикальными и контактируют с цилиндрическим ситом, а продольные установлены под наклоном, имеют с ситом технологический просвет и снабжены противорезами квадратного сечения, расположенными между пропеллером и бичевыми пластинами. Семявыделитель имеет на ведущем валу цилиндрический шнек и под ним ситчатый полуцилиндр, четыре бича, установленных попарно на неподвижно закрепленном кронштейне и подвижном кронштейне для регулирования угла опережения α_3 (рис. 1, б). Сепаратор и семявыделитель имеют унифицированные цилиндрические сита, отличающиеся размером отверстий, а частота вращения валов их приводов регулируется и различна. Один конец ведущего вала секций соединен разъемно с приводом, а второй – запирается конусообразной оконечностью вала траверсы с оперативной возможностью регулировки положения перемещением резьбового корпуса с последующей его фиксацией при сборе машины при смене образца.

Для исследований повышения эффективности работы машины для выделения семян из селекционных партий рассмотрены технические решения шнека сепаратора с формой активно измельчающего томата участка кромки шнека, выполненного по конической логарифмической спирали с участками длины дуги кромки шнека со сплошной формой витка и с вырезными сегментами. Для теоретического обоснования резания плодов томата кромкой шнека учтены теоретические наработки по обоснованию конструктивно-режимных параметров измельчителя с зигзагообразным расположением ножей в режущем аппарате [19], создана эквивалентно-силовая схема к определению силы резания плодов томата кромкой шнека с прерывистыми витками в программе КОМПАС-3D, расчеты выполняли в MS Excel.

Результаты и обсуждение

Согласно техническим решениям, машина для выделения семян из селекционных партий томатов, содержащая раму, электродвигатель, клиноременную передачу, бункер, вал, шнек, бичи, сито, кожух, щиток, сборник, лоток секций сепаратора и семьявыделителя, содержит секции сепаратора и семьявыделителя, которые установлены на общей раме и снабжены приводами ведущих валов через клиноременную передачу от одного электродвигателя.

В отличие от базовой машины для выделения семян из томатов после загрузки исходного сырья в бункер сепаратора, в предлагаемой конструкции для выделения семян разрушение плодов томатов осуществляется при транспортировке шнеком 14, имеющим на диаметрально противоположных сторонах витков трапецевидные вырезные сегменты (рис. 2). Деформированные плоды томатов подхватываются разнополюсным двухлопастным пропеллером 15, установленным перед неподвижным противорезом 16 к оси вала под углом β , и дальше томатная масса подается на протирку семян с соком через отверстия сетчатого цилиндра двумя парами последовательно расположенных бичевых планок 17, 18 (с различным фиксированными углами опережения α_1 и α_2) с эластичными накладками (рис. 1, а, б).

Для теоретического обоснования резания плодов томата кромкой шнека учтены теоретические наработки

по обоснованию конструктивно-режимных параметров измельчителя с зигзагообразным расположением ножей в режущем аппарате [19].

Эквивалентно-силовая схема шнека приемной камеры машины для выделения семян из плодов селекционных партий томата к определению силы резания кромкой шнека с прерывистыми витками представлена на рис. 2. На схеме обозначены участки шнека: АВ – заходный цилиндрической формы шнека со сплошной кромкой витка, ВС – активно измельчающий конической формы со сплошной кромкой режущей части витка (или вырезными сегментами), СЕ – подающий конической формы со сплошной формой кромки витка.

Общая длина L винтовой линии кромки шнека складывается из длины L_1 кромки заходного цилиндрического участка шнека со сплошной формой витка, длины L_2 активно измельчающего конического участка кромки шнека и длины L_3 подающего конического участка шнека со сплошной формой кромки витка. Длина L_1 дуги винтовой линии заходного цилиндрического участка шнека со сплошной формой витка определяется по выражению [20]:

$$L_1 = \sqrt{s^2 + (\pi D)^2}, \quad (1)$$

где s – шаг винтовой линии;

D – диаметр цилиндрической части шнека.

Учитывая форму активно измельчающего участка кромки шнека по конической логарифмической спирали, длину L_2 дуги кромки шнека со сплошной формой витка на этом участке определим по формуле [21]:

$$L_2 = \frac{\sqrt{(1+q^2)k^2+1}}{k} (r_2 - r_1), \quad (2)$$

где q – наклон образующих конуса к его основанию;

k – коэффициент показателя степени в уравнении логарифмической спирали $r(\varphi) = ae^{k\varphi}$;

r_1 и r_2 – длины радиус-векторов начала и конца дуги логарифмической спирали, очерчивающей кромку витка шнека на режущем участке.

Длину L_{2B} дуги измельчающего участка кромки шнека по конической логарифмической спирали с вырезными сегментами найдем по выражению:

$$L_{2B} = L_2 - \Delta L, \quad (3)$$

где ΔL – длина дуги вырезных сегментов.

Длину L_3 подающего конического участка шнека со сплошной формой кромки витка определим по выражению [21]:

$$L_3 = \frac{\sqrt{(1+q^2)k^2+1}}{k} (r_3 - r_2), \quad (4)$$

где r_2 и r_3 – длины радиус-векторов начала и конца дуги логарифмической спирали, очерчивающей кромку витка шнека на выходном участке.

Силу F резания плодов томата кромкой шнека на режущем участке можно определить по выражению [19]:

$$F = S \cdot \sigma_p, \quad (5)$$

где S – площадь кромки шнека, находящейся в контакте с поверхностью плода томата;

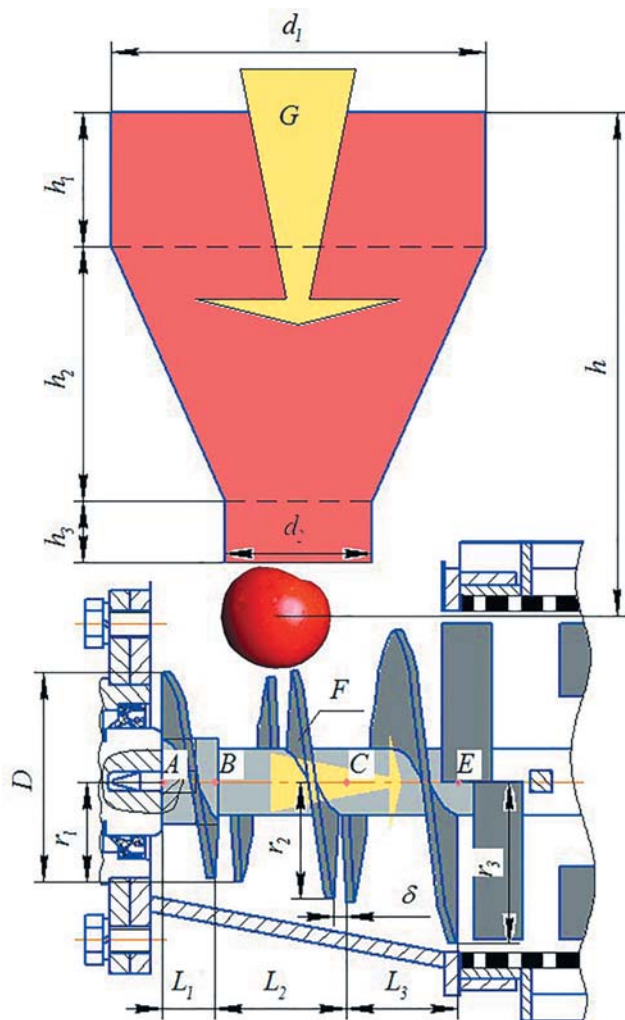


Рис. 2. Эквивалентно-силовая схема к определению силы резания плодов томата кромкой шнека с прерывистыми витками
Fig. 2. Equivalent force drawing for determining the cutting force of tomato fruits by the edge of a screw with intermittent turns

σ_p – разрушающее контактное напряжение (прочность кожицы) плодов томата.

Площадь измельчающего участка кромки шнека со сплошной формой витка определим по формуле:

$$S = \delta \cdot L_2 \cdot \sigma_p, \quad (6)$$

где δ – толщина кромки шнека;

L_2 – длина режущего конического участка кромки шнека.

Площадь измельчающего участка кромки шнека по конической логарифмической спирали с вырезными сегментами определим по формуле:

$$S = \delta \cdot L_{2B} \cdot \sigma_p, \quad (7)$$

где δ – толщина кромки шнека;

L_{2B} – длина режущего конического участка кромки шнека с вырезными сегментами.

Принимая прочность кожицы томатов красных в пределах $\sigma_p = 0,2\text{--}0,7$ Н/мм² [22], выполнили расчет в MS Excel силы F резания плодов томата кромкой шнека и построили графики зависимости F от σ_p для сплошного и вырезного шнека (рис. 3).

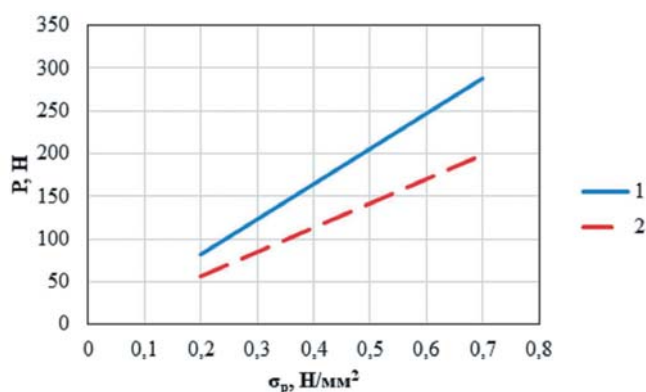


Рис. 3. Зависимость силы резания плодов от прочности кожицы томатов загрузочным шнеком сепаратора машины для выделения семян из селекционных партий:

1 – со сплошными витками, 2 – с вырезными сегментами
Fig. 3. Dependence of the cutting force of fruits on the strength of the tomato skin by the loading auger of the separator of the machine for separating seeds from selection lots:
 1 – with solid turns, 2 – with cut segments

Полученные величины расчетных параметров загрузочного шнека сепаратора составили: $L_1 = 177$ мм; со сплошными витками $L_2 = 274$ мм; с вырезными сегментами $L_{2B} = 190$ мм; $L_3 = 371$ мм; $r_1 = 37$ мм; $r_2 = 46$ мм; $r_3 = 60$ мм.

Расчетная сила резания плодов томатов загрузочным шнеком сепаратора машины для выделения семян из селекционных партий зависит от состояния кромок витков. С вырезными сегментами на витках в рассматриваемом диапазоне прочностных характеристик прочности кожицы томатов по полученным данным представленным в виде графиков на рис. 3 она ниже чем со сплошными. С вырезными сегментами она изменяется от 55 Н до 200 Н, а со сплошными от 80 Н до 280 Н, что в среднем показывает снижение на 30 %. Данное обстоятельство способствует также скорости прохождения материала через рассматриваемый узел машины.

Для преодоления силы F резания создается сила веса G плодов томатов в бункере:

$$G = mg, \quad (8)$$

где m – масса плодов томатов в бункере, кг;

g – ускорение свободного падения, кг·м/с²,

$$m = \rho \cdot V, \quad (9)$$

где ρ – объемный вес плодов томатов, кг/м³;

V – объем бункера, м³.

Объем бункера найдем как сумму объемов его частей: верхней цилиндрической V_1 высотой h_1 , средней конической V_2 высотой h_2 и нижней цилиндрической V_3 высотой h_3 согласно рис. 1 по выражению [23]:

$$V = \frac{1}{4}\pi d_1^2 h_1 + \frac{1}{12}\pi h_2 (d_1^2 + d_1 \cdot d_2 + d_2^2) + \frac{1}{4}\pi d_2^2 h_3, \quad (10)$$

где d_1 и d_2 – диаметры соответственно верхней загрузочной и нижней выходной горловин бункера.

С учетом размеров бункера $d_1 = 280$ мм, $d_2 = 110$ мм, $h_1 = 100$ мм,

$h_2 = 190$ мм, $h_3 = 46$ мм его объем по формуле (7) получили $V = 0,013$ м³. Принимая объемный вес плодов томатов, равный 600 кг/м³ [16], при полном заполнении бункера, по формулам (5), (6) получаем $G = 76,5$ Н.

Скорость падения плодов томатов на шнек определим из закона сохранения импульса [24], [18]:

$$A \cdot t = m_1 \cdot v, \quad (11)$$

$$v = \frac{F \cdot t}{m_1}, \quad (12)$$

где t – продолжительность взаимодействия плода с кромкой шнека;

m_1 – масса одного плода.

Минимальную высоту h падения плодов томатов на шнек, необходимую для разрушения их кожицы кромкой шнека, найдем из закона сохранения энергии [24]:

$$EK = EP, \quad (13)$$

$$\frac{m_1 v^2}{2} = m_1 g h, \quad (14)$$

$$h = \frac{v^2}{2g}, \quad (15)$$

Принимая массу одного плода средней крупности $m_1 = 0,17$ кг в обозначенных пределах σ_p [16], выполнили расчет в MS Excel минимальной высоты h падения плодов томатов на шнек и построили графики зависимости h от σ_p для сплошного и вырезного шнека (рис. 4).

При анализе процесса разрушения плодов томата шнеком согласно представленной графической зависимости (рис. 4) установлено, что разрушение всех плодов томата шнеком со сплошной кромкой витков осуществляется при свободном падении плодов с высоты $h=58$ см, а с предлагаемыми вырезными сегментами – $h=28$ см. Поэтому для оптимизации эффективности работы машины для выделения семян томатов в непрерывном режиме высота бункера для приема исходного сырья должна быть не менее указанных значений.

Рабочие органы и основные технологические узлы машины изготовлены из пищевой коррозионностойкой нержавеющей

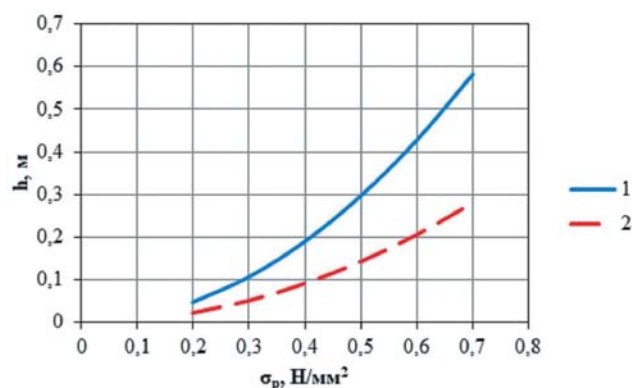


Рис. 4. Зависимость минимальной высоты h падения плодов томатов на шнек от прочности кожицы томатов загрузочным шнеком сепаратора машины для выделения семян из селекционных партий:

1 – со сплошными витками, 2 – с вырезными сегментами
 Fig. 4. Dependence of the minimum height h of falling tomato fruits on the auger of the separator of the machine for separating seeds from selection lots:
 1 – with solid turns, 2 – with cut segments

щей стали 316. Бункер сепаратора для загрузки томатов имеет размеры 250×280 мм в верхней части и 110×120 мм на входе в зону открытой части шнека с витками диаметром от 80 до 110 мм с трапециевидными вырезами оснований в среднем 8-13 мм, диаметр ситчатого цилиндра 120 мм, длина 328 мм, перфорация 5 мм. Ширина полок двухлопастного пропеллера 20×32 мм, длина лопасти 46 мм, противорез имеет квадратное сечение 8 мм, длиной 43 мм, установлен к оси ведущего вала под углом $\beta = 60^\circ$. Углы опережения первой пары бичевых планок с эластичными накладками сепаратора $\alpha_1 = 1,5^\circ$, второй пары – $\alpha_2 = 4^\circ$, бичевых планок семявыделителя $\alpha_3 = 5^\circ$. Радиальный зазор между бичевой пластиной и ситчатым цилиндром в передней части устанавливаются в пределах 6-7 мм, а на выходе – 3-4 мм. Электродвигатель 380/220 В асинхронный АИР80А6, мощностью 0,75 кВт, $d=22$ мм, масса 11,9 кг (электрошкаф оснащен преобразователем частоты CFM 110). Шкив электродвигателя $d=100$ мм, $n=1000$ об/мин, на номинальных оборотах приводит во вращение вал привода сепаратора $n=625$ об/мин (шкив $d=160$ мм) и вал привода семявыделителя $n=909$ об/мин (шкив $d=110$ мм). Ситчатый цилиндр и полуцилиндр семявыделителя имеют перфорацию размером 1,2 мм, по размерам ситчатый цилиндр унифицирован с сепаратором, диаметр витков цилиндрического шнека семявыделителя 110 мм.

Сравнительные технико-технологические характеристики выделителя семян томата ВСТ-0,5 и машина для выделения семян томата из селекционных партий (МВСТСП)

Техническая характеристика	ВСТ - 0,5	МВСТСП
Производительность в час эксплуатационного времени, кг	460	240
Потребляемая мощность, кВт	2	0,75
Размеры загрузочного бункера, мм	280×430	250×280
Чистота семян, %	8,5	8,5
Площадь, занимаемая машиной, м ²	2	0,5
Габаритные размеры, мм	1140 ×1860×1530	850×550×1220
Масса, кг	336	140

Результаты приведенных теоретических исследований машина для выделения семян томата из селекционных партий [18] (далее МВСТСП). и экспериментальной апробации ее узлов по выделению семян томата, семян из образцов технических и столовых белых и красных сортов винограда, а также сравнительные технико-технологические характеристики (таблица) с базовым выделителем семян томата ВСТ-0,5, разработчик и изготовитель НПО «Селекционная техника», г. Симферополь [25], (согласно акта приемки опытного образца № 2173 от 23.12.1987) показывают перспективность предлагаемых технических решений для решения обозначенных задач при проведении селекционных работ.

При выделении семян из ягод винограда были установлены ситчатый цилиндр в сепараторе перфорацией 9 мм, в семявыделителе – 2 мм, угол опережения бичей семявыделителя $\alpha_3 = 3 \dots 12^\circ$, скорость вращения ведущего вала сепаратора – 700 об./мин., семявыделителя 980 об./мин.

Заключение

Предлагаемые технические решения направлены на повышение эффективности операции механического разрушения образцов партий плодов томатов в секции сепаратора и извлечения семян из образцов (селекционных номеров) плодов томата в секции семявыделителя на втором и третьем этапах работ в селекции.

Исследованиями машины для выделения семян томата из селекционных партий установлено, что расчетная сила резания плодов томатов загрузочным шнеком сепаратора зависит от состояния кромок витков. С вырезными сегментами на витках в рассматриваемом диапазоне прочностных характеристик прочности кожицы томатов она ниже, чем со сплошными. С вырезными сегментами сила резания изменяется от 55 Н до 200 Н, а со сплошными от 80 Н до 280 Н, что в среднем показывает снижение на 30%.

Приведены значения высоты свободного падения томатов из бункера на шнек со сплошной кромкой и предлагаемыми вырезными сегментами для оптимизации эффективности работы машины для выделения семян томатов в непрерывном режиме. Полученные данные могут быть использованы для разработки конструкторской документации на опытный образец машины для выделения семян томата из селекционных партий.

• Литература

1. Пивоваров В.Ф. Овощи России. М.: ГНУ ВНИИССОК, 2006. 384 с. <https://elibrary.ru/qkxtmt>
2. Таран В.В., Алпатов А.В., Александров И.А. и др. Методические подходы к расчету потребности в основных видах сельскохозяйственной техники для сельского хозяйства. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2024;9(115):73–81. <https://doi.org/10.33938/249-73>
<https://elibrary.ru/fvnizz>
3. Алексеев К.И., Мельников А.Б., Новоселов Э.А. и др. Современное состояние машинно-тракторного парка производителей овощных культур в России. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2024;1(107):112–121. <https://doi.org/10.33938/241-112>
<https://elibrary.ru/ynaeeo>
4. Аксенов А.Г., Сибирев А.В. Состояние технического обеспечения производства овощных культур в Российской Федерации. *Картофель и овощи*. 2021;(8):3–8. <https://doi.org/10.25630/PAV.2021.85.47.001>
<https://www.elibrary.ru/lohulj>
5. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С., Сибирев А.В. Современное состояние технологического обеспечения производства овощных культур в Российской Федерации. *Овощи России*. 2023;(5):5–17. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-5-5-17>
<https://elibrary.ru/cylubg>
6. Капанова Р. Х., Кигашпаева О.П., Гулин А.В. Изучение коллекционных образцов томата. *Сельскохозяйственный журнал*. 2020;5(13):36-41. <https://doi.org/10.25930/2687-1254/006.5.13.2020>
<https://elibrary.ru/xuahnc>
7. Батыров В.А., Гарьянова Е.Д., Киселева Г.Н. Подбор сортов томата для механизированной уборки в условиях прикаспийской низменности. *Вестник КрасГАУ*. 2020;(7):26-30. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-7-26-30>
<https://elibrary.ru/hrfjpn>
8. Авдеев А.Ю., Кигашпаева О.П., Джабраилова В.Ю., Сисенгалиева С.Т. Оригинальные фенотипические проявления окраски плодов томата. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020;1(183):5-10. <https://elibrary.ru/kgcwpc>
9. Alemu Degwale, Tiru Tesfa, Belete Meseret et al. Effect of Seed Extraction Methods of Tomato on Physiological Quality of Seeds and Seedlings, 02 November 2020, PREPRINT (Version 1), available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-49268/v1>
10. Alemu Degwale, Tiru Tesfa, Belete Meseret, Solomon Fantaw Seed extraction methods affect the physiological quality of tomato seed and developing seedlings. *International Journal of Vegetable Science*. 2023;29(1):16-24. <https://doi.org/10.1080/19315260.2022.2083042>
11. Soliman Ahmed M.I., El-Nono M.A., Mustafa M.M.; El-Amin M. A. Manufacturing a tomato seed extracting machine. *Misr. Journal of Agricultural Engineering*. 2017;34(1):65-82. <https://doi.org/10.21608/mjae.2012.102553>
12. Семенов Ю.А., Некипелов Ю.Ф. Каталог для заказа машин, приборов, лабораторного оборудования для механизации работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве сельскохозяйственных культур. М.: АгроНИИТЭИИТО, 1988. 149 с.
13. Павлов Л.В., Павлов С.А., Дринча В.М., Некипелов Ю.Ф. и др. Машины для механизации селекционно-семеноводческих работ в овощеводстве: Справочное пособие. М., 2005. С. 98–99.
14. Аварский Н.Д., Таран В.В., Гасанова Х.Н. Актуальные вопросы материально-технического обеспечения агропродовольственного сектора России. *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2024;3(109):96–108. <https://doi.org/10.33938/243-96>
<https://elibrary.ru/ftpzrw>
15. Аварский Н.Д., Таран В.В., Гасанова Х.Н. и др. Проблемы технической модернизации сельскохозяйственных товаропроизводителей и их реализация на современном этапе. *АПК: экономика, управление*. 2023;(3):85–96. <https://doi.org/10.33305/233-85>
<https://elibrary.ru/dsjogg>
16. Солдатенко А.В., Аварский Н.Д. Технологическая оснащенность производства овощных культур в России. *Овощи России*. 2025;(1):92–101. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-92-101> <https://www.elibrary.ru/hrwify>
17. Горобей В.П., Москалевич В.Ю., Пивоваров В.Ф., Павлов Л.В. Исследование и создание рабочих органов устройства выделителя семян томата. *Овощи России*. 2022;(4):73-79. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-4-73-79>
<https://www.elibrary.ru/ojefuc>
18. Горобей В.П. Пат. 2824020 РФ. Машина для выделения семян томата из селекционных партий. № 2023133163; опубл. 31.07.2024, Бюл. № 22.
19. Антонов Н.М., Лебедь П.И., Искуснов Ю.В. Результаты экспериментальных исследований по определению усилий резания плодов и корнеплодов. *Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2012;2(26):37–141. <https://elibrary.ru/oyylrj>
20. https://razvitie-pu.ru/?page_id=4440
21. https://en.wikipedia.org/wiki/Conical_spiral
22. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. М.: Колос, 1970. 423 с.
23. Корн Г.А., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы. СПб.: Лань, 2003. 831 с.
24. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 560 с.
25. Шишкина Е.А. Выделитель семян томата ВСТ-0,5. Листок-каталог № 1589. АгроНИИТЭИИТО. 1988. 4 с.

• References

1. Pivovarov V.F. Vegetables of Russia. Moscow: GNU VNISSOK, 2006. 384 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qkxtmt>
2. Taran V.V., Alpatov A.V., Aleksandrov I.A. et al. Methodological approaches to calculating the need for the main types of agricultural machinery for agriculture. *Economy, labor, management in agriculture*. 2024;9(115):73- 81. (In Russ.) <https://doi.org/10.33938/249-73>
<https://elibrary.ru/fvnizz>

3. Alekseev K.I., Melnikov A.B., Novoselov E.A. et al. Current state of the machinery and tractor fleet of vegetable producers in Russia. *Economy, labor, management in agriculture*. 2024;1(107):112-121. (In Russ.) <https://doi.org/10.33938/241-112>
<https://elibrary.ru/ynaeeo>
4. Aksenov A.G., Sibirev A.V. State of technical support for the production of vegetable crops in the Russian Federation. *Potato and vegetables*. 2021;(8)3-8. (In Russ.)
<https://doi.org/10.25630/PAV.2021.85.47.001>
<https://www.elibrary.ru/lohulj>
5. Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S., Sibirev A.V. The current state of technological support for vegetable crops production in the Russian Federation. *Vegetable crops of Russia*. 2023;(5):5-17. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-5-5-17>
<https://elibrary.ru/cylubg>
6. Kapanova R.Kh., Kigashpaeva O.P., Gulina A.V. Study of collectible tomato samples. *Agricultural Journal*. 2020;5(13):36-41. (In Russ.)
<https://doi.org/10.25930/2687-1254/006.5.13.2020>
<https://elibrary.ru/xuahnc>
7. Batyrov V.A., Garyanova E.D., Kiseleva G.N. Selection of tomato varieties for mechanized harvesting in the Caspian lowland. *Bulletin of KSAU*. 2020;(7):26-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-7-26-30> <https://elibrary.ru/hrfjpn>
8. Avdeev A.Yu., Kigashpaeva O.P., Dzhabrailova V.Yu., Sisengalieva S.T. Original phenotypic manifestations of color of tomato fruits. *Bulletin of Altai State Agrarian University*. 2020;1(183):5-10. (In Russ.)
<https://elibrary.ru/kgcwpc>
9. Alemu Degwale, Tiru Tesfa, Belete Meseret et al. Effect of Seed Extraction Methods of Tomato on Physiological Quality of Seeds and Seedlings, 02 November 2020, PREPRINT (Version 1), available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-49268/v1>
10. Alemu Degwale, Tiru Tesfa, Belete Meseret, Solomon Fantaw. Seed extraction methods affect the physiological quality of tomato seed and developing seedlings. *International Journal of Vegetable Science*. 2023;29(1):16-24.
<https://doi.org/10.1080/19315260.2022.2083042>
11. Ahmed M.I. Soliman; M.A. El-Nono; M.M. Mustafa; El-Amin M. A. Manufacturing a tomato seed extrating machine. *Misr. Journal of Agricultural Engineering*. 2017;34(1):65-82.
<https://doi.org/10.21608/mjae.2012.102553>
12. Semenov Yu.A., Nekipelov Yu.F. Catalog for ordering machines, devices, laboratory equipment for the mechanization of work in selection, variety testing and primary seed production of agricultural crops. Moscow: AgroNIITEITO, 1988. 149 p. (In Russ.)
13. Pavlov L.V., Pavlov S.A., Drincha V.M., Nekipelov Yu.F. et al. Machines for the mechanization of selection and seed production work in vegetable growing: A reference manual. Moscow, 2005. P. 98-99. (In Russ.)
14. Avarsky N.D., Taran V.V., Gasanova H.N. Actual issues of material and technical support of the agro-food sector of Russia. *Economy, labor, management in agriculture*. 2024;3(109):96-108. (In Russ.)
<https://doi.org/10.33938/243-96> <https://elibrary.ru/ftpzrw>
15. Avarsky N.D., Taran V.V., Gasanova H.N. et al. Problems of technical modernization of agricultural producers and their implementation at the present stage. *AIC: economics, management*. 2023;(3):85-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.33305/233-85>
<https://elibrary.ru/dsjogg>
16. Soldatenko A.V., Avarskii N.D. Technical and technological equipment of vegetable crops production in Russia. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(1):92-101. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-92-101>
<https://www.elibrary.ru/hrwify>
17. Gorobey V.P., Moskalevich V.Y., Pivovarov V.F., Pavlov L.V. Research and creation of working organs of the tomato seed separator device. *Vegetable crops of Russia*. 2022;(4):73-79. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-4-73-79>
<https://www.elibrary.ru/ojefuc>
18. Gorobey V.P. Patent. 2824020 RF. Machine for isolating tomato seeds from breeding lots. No. 2023133163; publ. 31.07.2024, Bull. № 22. (In Russ.)
19. Antonov N.M., Lebed P.I., Iskusev Yu.V. Results of experimental studies to determine the cutting forces of fruits and root crops. *Proceedings of Lower Volga agro-university complex: science and higher education*. 2012;2(26):37-141. (In Russ.)
<https://elibrary.ru/oaylrj>
20. https://razvitie-pu.ru/?page_id=4440
21. https://en.wikipedia.org/wiki/Conical_spiral
22. Physical and mechanical properties of plants, soils and fertilizers. - M.: Kolos, 1970. -- 423 p.
23. Korn G.A., Korn T. Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers: Definitions. Theorems. Formulas. St. Petersburg: Lan, 2003. 831 p. (In Russ.)
24. Trofimova T.I. Physics Course. Moscow: Publishing Center "Academy", 2006. 560 p. (In Russ.)
25. Shishkina E.A. Tomato seed extractor VST-0.5. Catalogue sheet No. 1589. AgroNIITEITO. 1988. 4 p. (In Russ.)

Об авторах:

Василий Петрович Горобей – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник сектора разработки и исследований макетных и экспериментальных технологических установок,
<https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>, автор для переписки, magarach@rambler.ru

Леонид Васильевич Павлов – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, эксперт-консультант по отраслевым стандартам качества

Вадим Юрьевич Москалеви – доктор технических наук, доцент кафедры технических систем в агробизнесе,
<https://orcid.org/0000-0003-4818-3910>,
SPIN-код: 3595-5845, v_moskalevich@mail.ru

About the Authors:

Vasiliy P. Gorobey – Dr. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Sectors for the development and research of prototype and experimental technological installations,
<https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>,
Corresponding Author, magarach@rambler.ru

Leonid V. Pavlov – Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Expert Consultant on Industry Quality Standards

Vadim Y. Moskalevich – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technical Systems in Agribusiness,
<https://orcid.org/0000-0003-4818-3910>,
SPIN-code: 3595-5845, v_moskalevich@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-95-104>
УДК: 635.64:631.816.12:631.559(470.31)

Я.П. Туксер^{1*}, С.М. Надежкин^{1,3},
А.А. Байков^{1,4}, М.Р. Енгальчев¹,
И.Ю. Кондратьева¹, А.Ф. Пэлий¹,
Д.Р. Шафигуллин¹, М.С. Гинс^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр овощеводства" (ФГБНУ ФНЦО)
143072, Россия,
Московская область, Одинцовский район,
п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)
117198, Россия, г. Москва,
ул. Миклухо-Маклая, д. 6

³ УОПЭЦ МГУ имени М.В. Ломоносова
141592, Россия, Московская область,
г.о. Солнечногорск, дер. Чашниково

⁴ Акционерное Общество "Апатит"
162625, Россия, Вологодская обл.,
г. Череповец, Северное ш., 75, АО "Апатит"

*Авторы для переписки: physiol@inbox.ru, yanatukuser@mail.ru

Вклад авторов: М.С. Гинс: руководство исследованием, методология, верификация данных, ресурсы, редактирование рукописи. С.М. Надежкин: концептуализация, курирование данных, редактирование рукописи. Я.П. Туксер: проведение исследований, изучение литературы, создание черновика рукописи и ее редактирование. А.А. Байков: редактирование и оформление рукописи. М.Р. Енгальчев: проведение исследований. И.Ю. Кондратьева: руководство исследованием, редактирование рукописи. А.Ф. Пэлий: ресурсы. Д.Р. Шафигуллин: визуализация.

Конфликт интересов. М.С. Гинс и С.М. Надежкин являются членами редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2008 года, но не имеют никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Туксер Я.П., Надежкин С.М., Байков А.А., Енгальчев М.Р., Кондратьева И.Ю., Пэлий А.Ф., Шафигуллин Д.Р., Гинс М.С. Влияние листовых подкормок ApaSil и Apaliqua ЖКУ на урожайность томата (*Solanum lycopersicum* L.) при выращивании на капельном поливе в условиях открытого грунта Центрального района Нечерноземной зоны *Овощи России*. 2025;(6):95-104.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-95-104>

Поступила в редакцию: 05.11.2025

Принята к печати: 25.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Yana P. Tukuser^{1*}, Sergey M. Nadezhkin^{1,3},
Alexey A. Baikov^{1,4}, Myazar R. Engalychiev¹,
Irina Yu. Kondratyeva¹, Aleksandr F. Pely¹,
Dmitry R. Shafigullin¹, Murat S. Gins^{1,2}

¹ FSBSI Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC)
14, Selektionnaya str., VNISSOK, Odintsovo region,
Moscow district, 143072, Russia

² Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russia

³ Educational and Experimental Soil and Ecological Center Chashnikovo
of Lomonosov Moscow State University
Chashnikovo Village, Solnechnogorsk Urban District,
Moscow Region, 141592, Russia

⁴ Joint Stock Company "Apatit"
75, Severnoye Shosse, JSC "Apatit" Cherepovets,
Vologda Region, 162625, Russia

*Corresponding authors: physiol@inbox.ru,
yanatukuser@mail.ru

Authors' Contributions: M.S. Gins: supervision, methodology, validation, resources, writing – review & editing. S.M. Nadezhkin: conceptualization, data curation, writing – review & editing. Ya.P. Tukuser: investigation, writing – original draft. A.A. Baikov: writing – review & editing. M.R. Engalychiev: investigation. I.Yu. Kondratyeva: supervision, writing – review & editing. A.F. Pely: resources. D.R. Shafigullin: visualization.

Conflict of interest. M.S. Gins and S.M. Nadezhkin are members of the editorial board of the journal "Vegetable crops of Russia" since 2008, but have no relation to the decision to publish this article. The article passed the journal's accepted peer-review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citation: Tukuser Ya.P., Nadezhkin S.M., Baikov A.A., Engalychiev M.R., Kondratyeva I.Yu., Pely A.F., Shafigullin D.R., Gins M.S. The effect of foliar fertilizers ApaSil and Apaliqua LCF on the yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) when grown on drip irrigation in open ground conditions of the Central district of the Non-Chernozem zone. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):95-104. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-95-104>

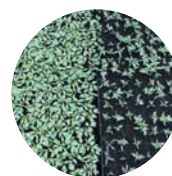
Received: 05.11.2025

Accepted: 25.11.2025

Published: 18.12.2025

Влияние листовых подкормок ApaSil и Apaliqua ЖКУ на урожайность томата (*Solanum lycopersicum* L.) при выращивании на капельном поливе в условиях открытого грунта Центрального района Нечерноземной зоны

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Растущий спрос на продукты питания в условиях сокращения водных ресурсов обуславливает необходимость внедрения ресурсосберегающих технологий в сельском хозяйстве. В Центральном районе Нечерноземной зоны России в условиях открытого грунта, где в периоды вегетаций томата рост температуры воздуха сопровождается уменьшением количества осадков, применение капельного полива и удобрений становится критически важным элементом технологии возделывания. Капельное орошение является перспективной технологией, позволяющей значительно экономить воду (на 30-70%) и повышать урожайность (на 20-90%). Томат – одна из важнейших овощных культур мирового значения, требовательная к водному и питательному режиму. Однако потенциал сочетания капельного орошения с применением препаратов ApaSil (регистрационный номер – 445-10-3473-1) и Apaliqua ЖКУ (регистрационный номер – 312-10-1656-1), для повышения продуктивности томата в открытом грунте Центрального района Нечерноземной зоны Московской области не изучен.

Материалы и методы. Исследования проводились в 2020-2023 гг. в открытом грунте на опытном участке ФГБНУ ФНЦО. Объектами исследования являлись сорта томата культурного *Solanum lycopersicum* L. из коллекции лаборатории селекции и семеноводства пасленовых культур ФГБНУ ФНЦО: Магнат, Благодатный, Гном.

Результаты. Наивысшая масса плода у сортов: Магнат 195,4 г (+10% к контролю), Благодатный – 116,4 г (+19,3%), Гном – 59,3 г (+10,3%), получена при комплексном применении препаратов ApaSil (400 г/га) и Apaliqua ЖКУ (40 л/га). Урожайность при той же обработке увеличилась до 74,3 т/га (Магнат, +26,8%), 88,1 т/га (Благодатный, +27,4%) и 67,1 т/га (Гном, +18,2%). Комбинированное использование препаратов оказалось эффективнее их раздельного применения.

Заключение. Анализ данных показал, что листовые подкормки ApaSil (400 г/га) и Apaliqua ЖКУ (40 л/га) при капельном орошении эффективно повышают продуктивность томата в открытом грунте Центрального района Нечерноземья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Solanum lycopersicum L., открытый грунт, капельный полив, применение листовых подкормок, масса плода, урожайность

The effect of foliar fertilizers ApaSil and Apaliqua LCF on the yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) when grown on drip irrigation in open ground conditions of the Central district of the Non-Chernozem zone

ABSTRACT

Relevance. The growing demand for food in the context of shrinking water resources necessitates the introduction of resource-saving technologies in agriculture. In the Central district of the Non-Chernozem zone of Russia under open ground conditions, where an increase in air temperature is accompanied by a decrease in precipitation during the tomato vegetation period, the use of drip irrigation and fertilizers becomes a critically important element of the cultivation technology. Drip irrigation is a promising technology that allows significant water savings (30-70%) and increases yield (20-90%). Tomato is one of the most important vegetable crops of global significance, demanding in terms of water and nutrient regimes. However, the potential of combining drip irrigation with the application of ApaSil (registration number – 445-10-3473-1) and Apaliqua LCF (registration number – 312-10-1656-1) preparations to increase tomato productivity in the open ground of the Central district of the Non-Chernozem zone of Moscow Region has not been studied.

Materials and Methods. The research was conducted in 2020-2023 in open ground at the experimental plot of FSBSI FSVC. The objects of the study were cultivars of cultivated tomato *Solanum lycopersicum* L. from the collection of the laboratory of breeding and seed production of solanaceous crops of FSBSI FSVC: Magnat, Blagodatny, Gnom.

Results. The highest fruit weight for the cultivars: Magnat 195.4 g (+10% to control), Blagodatny – 116.4g (+19.3%), Gnom - 59.3g (+10.3%), was obtained with the combined application of ApaSil (400 g/ha) and Apaliqua LCF (40 l/ha) preparations. The yield with the same treatment increased to 74.3 t/ha (Magnat, +26.8%), 88.1 t/ha (Blagodatny, +27.4%) and 67.1 t/ha (Gnom, +18.2%). The combined use of the preparations was more effective than their separate application.

Conclusion. Analysis of the data showed that foliar fertilizing with ApaSil (400 g/ha) and Apaliqua LCF (40 l/ha) under drip irrigation effectively increases tomato productivity in the open ground of the Central district of the Non-Chernozem zone.

KEYWORDS:

Solanum lycopersicum L., open ground, drip irrigation, application of foliar fertilizers, fruit weight, yield

Введение

Растущий спрос на продукты питания и сокращение водных ресурсов вызывают необходимость в поиске новых технологий для эффективного использования воды и удобрений в сельском хозяйстве. Ресурс осадков распределяется в мире неравномерно. Из-за ограниченного количества осадков засушливые районы широко распространены в Африке, Азии, Америке и Европе. В засушливых регионах сельскохозяйственные культуры часто страдают от засухи. Многочисленные исследователи продемонстрировали, что водный стресс почвы оказывает большое влияние на сопротивление растительного покрова и эвапотранспирацию [1,2,3,4].

Нехватка воды является основным препятствием для производства сельскохозяйственной продукции, приоритетом должно быть принятие соответствующих стратегий орошения, которые помогают экономить поливную воду [5]. Поэтому эффективное использование ограниченных доступных ресурсов пресной воды в орошаемом земледелии требует использования систем орошения под давлением, таких как поверхностные и подземные капельные системы, для повышения урожайности и качества плодов [6]. Таким образом, методы и управление орошением имеют большое значение для состояния почвы и воды для растений. Исследования во многих странах показали, что при правильном эксплуатировании капельное орошение может позволить сэкономить использование воды на 30-70% и повысить урожайность на 20-90% в зависимости от почвы и климата [7,8]. Кроме того, с учетом экономии воды и повышения урожайности за счет капельного орошения эффективность водопользования также увеличивается как минимум на 50% [9].

Капельное орошение – это новая технология, которая применяется во всем мире и имеет огромный потенциал для улучшения плодородия почвы, увеличения урожайности и качества овощной продукции. Капельное орошение позволяет гарантировать, что каждое растение получает именно то количество воды, которое ему нужно, поскольку оно использует гибкие трубки из полиэтилена, подключенные к отдельным капельницам. Капельницы подведены к корневой зоне каждого растения и через капельницу растение получает определенное количество воды в каждом цикле полива [10].

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) является одной из наиболее широко выращиваемых овощных культур в мире. Мировое годовое производство томата в настоящее время составляет около 180 миллионов тонн [11]. Плоды томата имеют большое пищевое значение, а также высокую питательную ценность благодаря наличию многочисленных антиоксидантных соединений, таких как каротиноиды, фенольные соединения, витамин С и Е. Эти соединения полезны для здоровья человека, например снижают риск воспалительных процессов, онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний [12].

Правильное сочетание воды и питательных веществ является предпосылкой для получения более высоких урожаев и хорошего качества продукции томата. Способ применения удобрений также важен для повышения эффективности использования питательных веществ. Поскольку орошение и внесение удобрений неразрывно связаны, для томата, требуется соответствующее управление орошением, чтобы избежать выщелачивания питательных веществ и загрязнения грунтовых вод. Это

очень важно, особенно в системах выращивания томата, которые требуют значительного количества азотных удобрений [13]. Кроме того, Локасио и др. обнаружили, что урожайность крупных и общих плодов томата на мелкозернистых песках увеличивается при капельном внесении N и K по сравнению с предпосевным внесением [14]. Подобно частому поливу, дробное внесение удобрений путем фертигации улучшает качество и количество плодов томата по сравнению с обычной практикой. Хеббар и др. сообщили, что урожайность томата была на 33% выше при использовании водорастворимых NPK-удобрений, чем при ленточном и бороздковом орошении [15]. Водный режим томата, как и остальных овощных культур, во многом зависит от равномерности и мощности потока воды, который во все время суток постоянно поднимается через растение из корневой системы в листья, где значительная ее часть испаряется. Если испарение восполняется поступлением оросительной влаги, то в растениях устанавливается бездефицитный водный баланс [16].

В различные периоды вегетации растения томата расходуют неодинаковое количество влаги, наибольшее потребление воды растениями отмечается с начала массового цветения и до массового завязывания плодов томата, в среднем это количество находится в пределах от 53 до 58 м³/га [17]. В Центральном районе Нечерноземной зоны России, где в периоды вегетаций томата, рост температуры воздуха сопровождается уменьшением количества осадков, то применение орошения и удобрений становится критически важным элементом в технологии возделывания [18]. В настоящее время капельный полив и фертигация нашли широкое применение во многих странах мира для возделывания сельскохозяйственных культур. В таких странах, как Израиль, Кипр, Испания, Чили, доля капельного орошения превышает 70-80%, в США она составляет около 40-50% [19]. Россия в этом плане сильно отстает. Общая площадь орошаемых земель в России: составляет примерно 4,5-5 млн гектар [20]. Технология внесения удобрений при капельном орошении основана на питании. Орошение создает предпосылки для эффективного применения минеральных удобрений под все культуры и на всех почвах. Применение только одного орошения без использования удобрения и поднятия общего уровня агротехники не может дать эффекта и обеспечить большие урожаи и высокую оплату оросительной воды. И наоборот, удобрения, применяемые в засушливой зоне без орошения, не будут эффективно использованы растениями и не окажут решающего влияния на повышение урожая. Орошение повышает эффективность удобрений при возделывании томата в 3-5 раз. В то же время эффективность орошения на фоне удобрений возрастает в 1,5-2,0 раза. Основное условие получения максимального эффекта от применения минеральных удобрений в орошаемом земледелии это оптимальное сочетание поливного режима и удобрений [21].

Многими учеными уделялось большое внимание изучению вопроса – поступление и наличие элементов минерального питания во время роста и развития растений томата. Содержание отдельных элементов в листьях, стеблях и плодах томата дает возможность судить о потребности культуры в питательных веществах. Независимо от фона питания усвоение растениями

азота, фосфора и калия возрастало в первую половину вегетации (до плодоношения) и соответствовало приростам органического вещества растений. Во вторую половину вегетации, в период плодоношения томата, темп суточного накопления минеральных веществ растениями снижался [22]. Ученые Байрамбеков и Анишко отмечали, что растения томата по своей биологии характеризуются способностью к продолжительному росту и новообразованию органов, в связи с чем имеют большие потенциальные возможности формирования высокой продуктивности. Улучшение условий питания позволяет активизировать ростовые процессы, цветение и плодообразование продолжается в течение большей части вегетационного периода [23].

Из элементов минерального питания томат наиболее отзывчив на фосфорные удобрения. Урожайность при этом находится в прямой зависимости от содержания в почве легкорастворимых фосфатов, а также от норм внесения азотного удобрения. Особенно чувствительны растения томата к недостатку фосфора в первый период вегетации. При малом содержании фосфора в почве повышенные дозы азота до посева ухудшали поступление фосфора в растения и угнетали их развитие, вследствие чего растения проявляют признаки не только фосфорного, но и азотного голодания. При нормальном содержании фосфора в почве действие повышенных доз азота ослаблялось или устранялось полностью. Однако урожайность плодов томата в ранние сроки при этом все же уменьшалась. Недостаток азота при высоком содержании фосфора тоже снижает урожайность плодов в ранние сроки и на конец сборов. Калий томаты используют в наибольшем количестве, особенно в период плодоношения растений. Роль калия важна и на первых этапах развития томата. Он необходим для формирования стеблей и завязей, активной ассимиляции углекислоты и передвижения ассимилятов, в том числе и белковых веществ в растениях. Калий участвует в ферментных системах, которые катализируют превращение фосфорорганических соединений в другие вещества [24]. Между тем в отечественной и зарубежной литературе опубликовано большое количество научных исследований, показывающих положительное влияние кремнийсодержащих удобрений и при возделывании овощных культур [25, 26]. Однако механизмы действия этого элемента на растения до настоящего времени изучены недостаточно. Ряд авторов отмечали, что особую роль кремний играет в повышении устойчивости растений к неблагоприятным внешним факторам, биогенным и абиогенным стрессам [27, 28]. Несмотря на распространенность этого элемента в природе и высокое содержание его в почве, доступность его растениям является крайне низкой, а применение различных кремнийсодержащих препаратов способно как увеличить урожай, так и улучшить его качество [29]. Отдельные авторы указывают на усиление использования растениями основных элементов питания (NPK) при применении кремнийсодержащих препаратов [30, 31]. На текущий момент в широком ассортименте минеральных удобрений, в зависимости от состава и способа применения, выделяют: кремнийсодержащие мелиоранты (например, цеолиты, диатомиты и др.), которые используются для внесения в почву в больших количествах; кремниевые удобрения для внесения в почву, предпосевной обработки семян и подкормок (к ним относятся силикаты

натрия и калия, аморфный SiO_2 и др.); кремнийсодержащие биостимуляторы для обработки растений в течение вегетации [32]. Наиболее известными и эффективными синтетическими кремниевыми удобрениями являются Biosil (производится в Европе) и Zumsil (производится в США). По химическому составу оба препарата представляют собой концентрированный раствор монокремниевой кислоты, поэтому их применение основано на опрыскивании растений разбавленными водными растворами. Низкие дозы этих препаратов (2-6 л/га) обеспечивают высокий эффект [33]. Самый известный российский препарат «Силиплант» – содержит кремний (до 7%) в биодоступной форме, а также калий и микроэлементы в хелатной форме. Используется для листовых подкормок и полива [34]. «МикроСилк/MicroSilk» – концентрированные жидкости на основе коллоидного кремния [35]. «Энерген» – основное действующее вещество – гуминовые кислоты, также содержит соединения кремния [36]. Среди водорастворимых удобрений на данный момент наиболее распространенные препараты: Fertika (Кемира) [37], Agricola [38], Чистый Лист [39], Master (Valagro) [40], Plantafol (Valagro) [41].

Очевидно, что эффективное использование воды и удобрений напрямую влияют на повышение урожайности и качества плодов томата. Тем не менее, современных знаний о повышении урожайности и качестве плодов томата выращенных в условиях открытого грунта при капельном орошении с внесением удобрения недостаточно.

Цель исследований – изучить влияния капельного орошения с применением листовых подкормок АраSil и Араliqua ЖКУ на повышение урожайности томата в условиях открытого грунта Центрального района Нечернозёмной зоны.

Условия, материалы и методы

Исследования проводили в 2020-2023 годах в открытом грунте на опытном участке ФГБНУ ФНЦО. Объектами исследования являлись сорта томата культурного *Solanum lycopersicum* L. из коллекции лаборатории селекции и семеноводства паслёновых культур ФГБНУ ФНЦО: Магнат, Благодатный, Гном. Оригинатор – ФГБНУ ФНЦО, Россия.

Полевые опыты закладывали согласно Методическим указаниям по селекции сортов и гибридов томата для открытого и защищенного грунта (1986) [42]. Агротехника возделывания включала общепринятые приемы для рассадной культуры томата с плотностью посадки 2,5 растений на м^2 . В течение вегетационного периода осуществлялись фенологические наблюдения по фазам развития: бутонизация, цветение, начало плодоношения, техническая и биологическая спелость согласно «Методическим указаниям по апробации овощных и бахчевых культур (2018)» [43] и «Методике полевого опыта в овощеводстве» С.С. Литвинова [44]. Оценка основных морфологических признаков была проведена с подробным описанием по методике UPOV [45]. В условиях землепользования ФГБНУ ФНЦО Московской области томаты высаживали рассадным способом. Перед высадкой рассады проводили обработку почвы фрезой Ф-200 на глубину 10-12 см. Для получения рассады (рис.1А) 25 апреля проводился посев семян в кассетах с размером ячейки 5х5 см вручную на глубину 1,0-1,5 см.



А

Б

Рис. 1. Выращивание томата культурного в условиях открытого грунта Центрального района Нечернозёмной зоны (А – рассада томата в кассетах в условиях пленочной теплицы; Б – опытное поле томата с системой капельного полива)

Fig. 1. Cultivation of tomato in open ground conditions of the Central district of the Non-Chernozem zone (A – tomato seedlings in trays in a film greenhouse; B – experimental tomato field with a drip irrigation system)

Высадку рассады в грунт ежегодно проводили во II декаде июня, когда среднесуточная температура воздуха достигала $+20...+21^{\circ}\text{C}$. Июнь был жарким, температуры воздуха в отдельные дни достигали $+27^{\circ}\text{C}$. В среднем по декадам температура воздуха варьировала $+20...+26^{\circ}\text{C}$. В общем погодные условия для растений томата в период вегетации в 2020-2023 годах сложились благоприятно [46]. Сборы по сортам ежегодно начинали проводить во II декаде августа, а последние во II декаде сентября. Всего за сезон было проведено 3 сбора. Параметры капельной ленты: тип капельной ленты – эмиттерная, плюсами которой являются повышенная устойчивость к засорению и равномерный водовылив; расстояние между капельницами – 20 см; водовылив одной капельницы – 1,1 л/час (рис.1Б).

Перед высадкой рассады проводили полив. После высадки рассады поливы проводили через день для поддержания влажности почвы на уровне 80-85% НВ для лучшей приживаемости рассады. Для сортов томата в опыте была выбрана схема посадки 90х45см (рис.1Б). Согласно проведенным исследованиям по изучению норм удобрений при выращивании томата в почвенно-климатических условиях Московской области, установлено, что наиболее оптимальными дозами на га $\text{N}_{60}\text{P}_{120}\text{K}_{90}$ - азотных 15-20 г/м²; суперфосфата -60-80 г/м²; калийной соли 20-25 г/м² [21].

В качестве удобрений использовали ниже описанные коммерческие препараты компании ФосАгро.

Адаптоген ApaSil – инновационный продукт ФосАгро с содержанием оксида кремния 31,5%. ApaSil поставляется растениям биологически доступный кремний. Кремний повышает устойчивость растений к таким стрессовым факторам, как засуха, высокая концентрация солей в почвенном растворе, поражение болезнями и повреждение вредителями, а также обработка гербицидами. Кремний усиливает защитные реакции растений против болезнетворных микро-

организмов.

По литературным данным растения из семейства паслёновых хорошо отзываются на применение кремний содержащих препаратов. Проводимые исследования показали, что на паслёновых культурах (картофель, томат) возможно некорневое применение сравнительно высоких доз кремния. Благодаря применению возрастающих концентраций ApaSil распространённость альтернариоза в фазу начала созревания плодов первой кисти снижается в 1,4–1,5 раза, а степень развития болезни уменьшается в 1,6–1,8 раза. Применение ApaSil способствует увеличению высоты растения на 6–12%, массы растения – на 27–42%, количества побегов на растении – на 15–35%, количества кистей на растении – на 13–24%, количества плодов с одного растения – на 7–16%, а массы плода – на 10–14% относительно контроля, не получавшего агрохимикат. Существенный прирост общей урожайности плодов на 6,9–18,7 т/га, или на 10–28%, относительно контроля. Аналогичным образом увеличивается и товарная урожайность томата при внесении возрастающих доз препарата ApaSil [47].

Апаликва ЖКУ N:P 11:37. Жидкое азотно-фосфорное удобрение производит компания «ФосАгро», Россия. Предыдущими исследованиями показана высокая степень доступности и усвоения растениями фосфора по сравнению с традиционными твёрдыми фосфорсодержащими удобрениями, особенно на почвах с высоким содержанием карбоната кальция. Также обеспечивает получение хорошей прибавки урожайности на разных культурах при проведении листовых подкормок, максимально эффективно в условиях засухи [15]. Важно отметить удобство хранения в хозяйствах. Преимущества: широкие сроки применения; высокоэффективное фосфорное удобрение; жидкая форма – не требует влаги для растворения; пролонгированное фосфорное питание; подходит для листовых и прикорневых подкормок.

Таблица 1. Схема опыта внесения удобрений
Table 1. Scheme of the experiment for fertilizer application

Сорта: 1.Магнат 2.Благодатный 3.Гном	Средняя масса плода, г Урожайность, т/га			
	Araliqua ЖКУ, л/га			
ApaSil, г/га	0	10	20	40
0	0	+	+	+
100	+	+	+	+
200	+	+	+	+
400	+	+	+	+

мок; эффективные низкие дозы применения. Применение – осенью, весной или летом. Можно вносить при посеве и перед посевом, под любые почвы [48].

Почва опытного участка относится к типу дерново-подзолистая, по гранулометрическому составу среднесуглинистая, с рН=5,6-5,8. Содержание гумуса составляет 2,5-3,2%. Содержание элементов питания составляет: P_2O_5 20,1-25,0 мг на 100г абсолютно сухой почвы и K_2O 8,1-17,0 мг на 100г абсолютно сухой почвы. Прополки в период роста и развития растений томата проводились вручную. Обработку от фитофторы проводили трижды за сезон – Ридомил Голд (50 г/л).

В опытах (табл. 1) использовали сорта томата селекции ФГБНУ ФНЦО: Магнат, Благодатный и Гном.

Исследования проведены на 3 сортах томата селекции ФГБНУ ФНЦО имеющих красную окраску плодов, но с различным типом куста, массой плода и группой спелости.

В течение вегетационного периода постоянно проводились фенологические наблюдения (дата посева, единичные и массовые всходы, начало и массовое созревание) и морфологическое описание признаков томата. Уборку и учет урожая проводили вручную по вариантам опыта по мере массового созревания плодов. Плоды убирали в полной зрелости (с окраской, присущей сорту). Сборы начинали с момента начала зрелости у 10–15% растений. Учет биологической урожайности с учетных растений проводился регулярно по мере созревания плодов. Продуктивность сортов томата оценивали по урожайности. Всего за сезон было проведено 3 сбора. Листовые обработки удобрениями проводили 3 раза за вегетационный период с концентрациями указанными в схеме опыта.

Результаты исследований

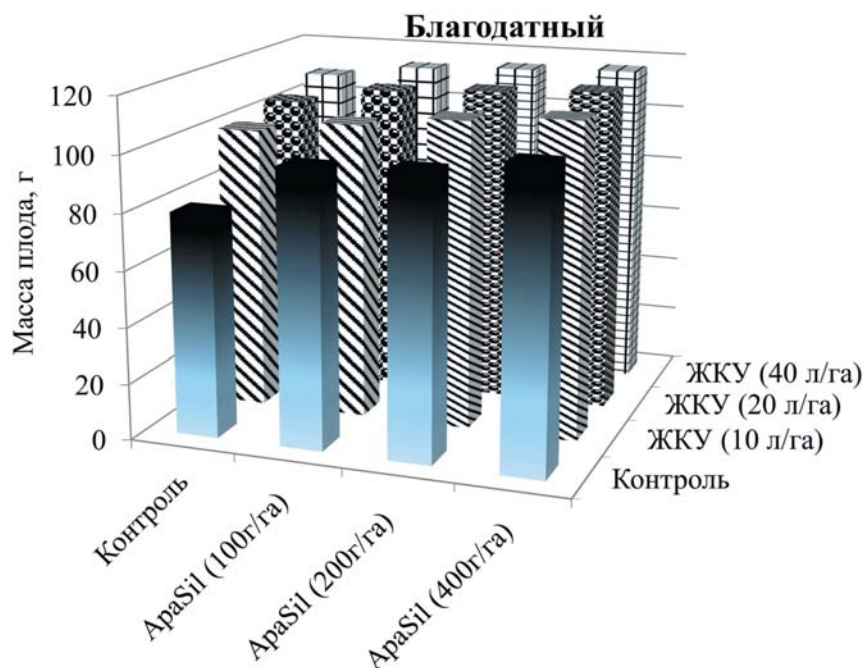
Исследуемые препараты оказали влияние на развитие растений томата, что впоследствии значительно сказалось на формировании массы плода и урожайности в анализируемых сортах томата.

Обработка экспериментальных данных отражает положительное влияние удобрений Araliqua ЖКУ и ApaSil на массу плода томата. Таким образом масса плода сорта Магнат под воздействием увеличения концентраций Araliqua ЖКУ возрастала от 179,7 до 187,8 г, при этом рост нормы использования удобрения с 10 до 20 л/га способствовало увеличению массы плода на 3,8г, а при росте с 20 до 40 л/га – еще на 4,3г. Применение жидкого комплексного удобрения является ключевым фактором увеличения средней массы плода. С ростом дозы Araliqua ЖКУ от 0 до 40 л/га наблюдается стабильный и значительный прирост массы без ApaSil (с 170 до 187,8г). Максимальная эффективность препарата Araliqua ЖКУ достигается в концентрации 40 л/га в комплексе с агрохимикатом ApaSil 400г/га, при данной обработке масса плода достигала уровня 195,4 г. Необходимо отметить, что препарат ApaSil аналогично оказывал положительное влияние на увеличение массы плода томата по мере роста дозирования. С увеличением дозы ApaSil с 0 до 400 г/га средняя масса плода по всем вариантам с удобрением возрастает от 170 до 183,5 г. Своевременное применение листовых подкормок препаратом ApaSil в комплексе с Araliqua ЖКУ усиливают действие и способствуют увеличению массы плода при всех нормах расхода относительно контроля. Следовательно в нашем эксперименте максимальная масса плодов наблюдается при применении 400 г/га ApaSil и 40 л/га

Таблица 2. Масса плода томата сорта Магнат, среднее за 2020-2023 годы
Table 2. Fruit weight of tomato cultivar Magnat, average for 2020-2023

Магнат	Средняя масса плода, г				Среднее, г	Отклонение, г	Отклонение, %
ApaSil, г/га	Araliqua ЖКУ, л/га						
	0	10	20	40			
0	170,0	179,7	183,5	187,8	180,3	–	–
100	177,6	184,2	189,8	192,4	186,0	5,7	3,2
200	178,3	188,2	191,7	194,1	188,1	7,8	4,3
400	183,5	190,8	193,7	195,4	190,9	10,6	5,9
Среднее, г	177,4	185,7	193,0	195,0	–	–	–
Отклонение,г	–	8,4	15,7	17,7	–	–	–
Отклонение, %	–	4,7	8,8	10,0	–	–	–

HCP_{05} : частных различий – 10,7, фактора А =В – 6,1, взаимодействия АВ – 4,5



НСР₀₅: частных различий – 8,3, фактора А = В – 5,3, взаимодействия АВ – 4,1

Рис. 2. Масса плода томата сорта Благодатный, среднее за 2020-2023 годы
Fig. 2. Fruit weight of tomato cultivar Blagodatny, average for 2020-2023

Аралика ЖКУ – 195г, что на 10% выше, чем при отсутствии внесения удобрений. Среднее отклонение массы плодов также увеличивается с ростом доз, что свидетельствует о вариабельности плодообразования при больших дозах (табл. 2).

Представленная диаграмма (рис. 2) наглядно демонстрирует эффективность применения препаратов Аралика ЖКУ и АраСил на увеличение средней массы плодов сорта Благодатный. Все варианты применения препаратов АраСил и Аралика ЖКУ показали результаты (116,4 г) выше контроля (79,0 г), что подтверждает их эффективность. Наблюдается четкая тенденция, чем выше доза препарата АраСил, тем больше средняя масса плодов. Обработка дозой 400 л/га показала наилучший результат (104,5 г) среди всех вариантов с этим препаратом. Для Аралика ЖКУ также прослеживается дозозависимый эффект – увеличение дозы удобрения с 10 л/га до 40 л/га приводит к последовательно-

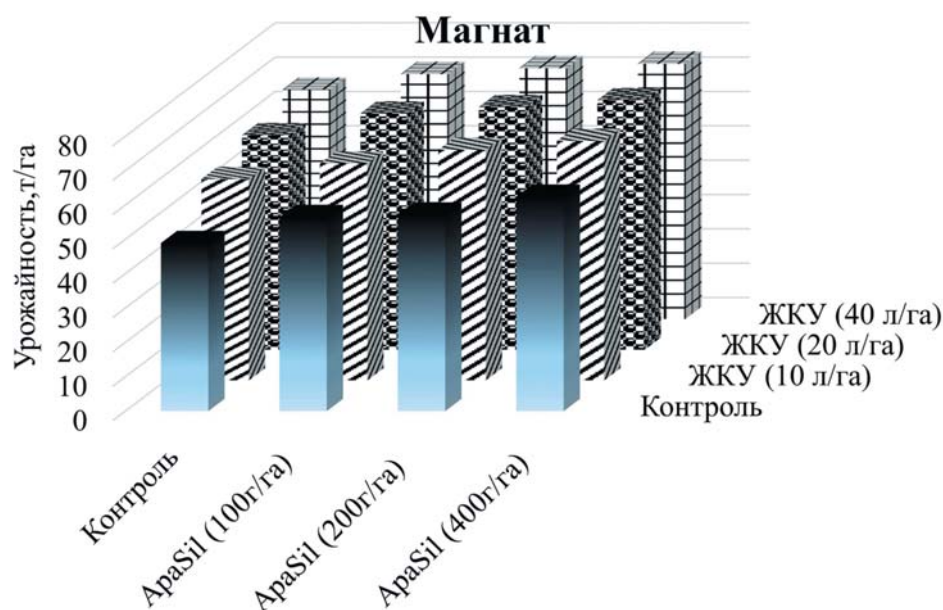
му росту массы плодов (100,7-108,8 г). Наивысший результат в целом по диаграмме показала обработка Аралика ЖКУ в дозе 40л/га и АраСил 400 г/га (116,4 г), что свидетельствует о выраженном положительном эффекте комбинированного применения данных удобрений на формирование крупных плодов у сорта Благодатный.

Прибавка массы плода у сорта Гном от применения только Аралика ЖКУ составил 5,3 г. При изучении доли влияния АраСил, также наблюдается положительная динамика прироста массы плода сорта Гном с увеличением нормы расхода агрохимиката с 0 до 400 г/га. Максимальный прирост от применения агрохимиката АраСил составил 1,1 г. Также заметно, что при росте доз АраСил при фиксированных дозах Аралика ЖКУ масса плодов увеличивается, что указывает на положительное влияние фосфорно-органической добавки АраСил на формирование плодов. Результаты исследования показывают, что применение препаратов по отдельности дает

Таблица 3. Масса плода томата сорта Гном, среднее за 2020-2023 годы
Table 3. Fruit weight of tomato cultivar Gnom, average for 2020-2023.

Гном	Средняя масса плода, г				Среднее, г	Отклонение, г	Отклонение, %
АраSil, г/га	Араliqua ЖКУ, л/га						
	0	10	20	40			
0	50,0	51,4	52,5	53,0	51,7	–	–
100	51,3	52,7	54,0	55,5	53,4	1,7	3,2
200	51,2	53,3	55,0	57,5	54,3	2,5	4,9
400	51,8	54,5	56,6	59,3	55,6	3,8	7,4
Среднее, г	51,1	53,0	54,5	56,3	–	–	–
Отклонение,г	–	1,9	3,5	5,3	–	–	–
Отклонение, %	–	3,7	6,8	10,3	–	–	–

НСР₀₅: частных различий – 5,1, фактора А=В – 3,8, взаимодействия АВ – 3,3



НСР₀₅: частных различий – 8,6, фактора A=B – 5,4, взаимодействия АВ – 4,6

Рис. 3. Урожайность томата сорта Магнат, среднее за 2020-2023 годы
Fig. 3. Yield of tomato cultivar Magnat, average for 2020-2023.

положительный результат, однако их совместное использование приводит к существенно большему эффекту. Значительный рост массы плода наблюдается при максимальных дозах — 400 г/га AraSil и 40 л/га ЖКУ, где средняя масса достигает 59,3 г, что на 10,3% выше контроля. Таким образом, комплексное применение AraSil и Araliqua ЖКУ в увеличенных дозах способствует значительному повышению средней массы плода сорта Гном. Это свидетельствует о целесообразности использования данных удобрений для повышения урожайности и качества томатов данного сорта (табл. 3).

Урожайность и качество являются основными показателями, на которых направленно производство сельскохозяйственных культур. Именно потенциал сорта определяет величину урожая и в конечном итоге прибыль от его

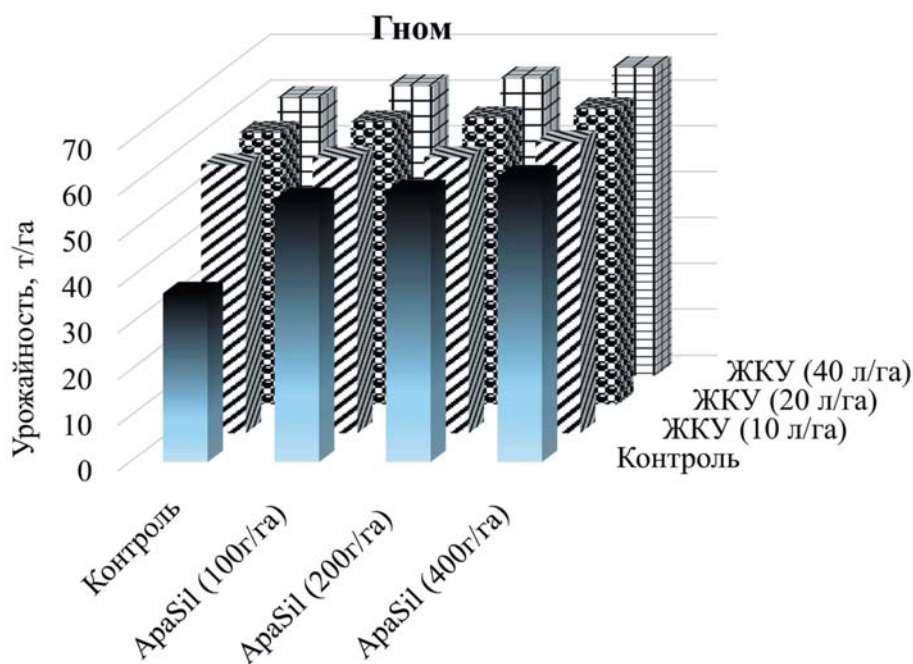
возделывания.

У сорта Магнат под влиянием возрастающих норм использования Araliqua ЖКУ урожайность возрастала от 58,6 до 66,7 т/га, при этом рост нормы использования удобрения с 10 до 20 л/га вызывал прирост урожайности на 3,8 т/га, а при росте с 20 до 40 л/га — еще на 4,3 т/га (рис. 3). Таким образом, среди применяемых доз только Araliqua ЖКУ наилучший результат по урожайности в целом по диаграмме показала обработка в дозе 40 л/га (66,7 т/га). Влияние адаптогена AraSil имело схожий характер. При уровне 100-200 г/га положительное влияние на урожайность томата сорта Магнат было ярко выражено и составило 56,5-57,2 т/га, а возрастающие дозировки агрохимиката с 200 до 400 г/га обеспечили прирост урожайности на 5,2 т/га. Согласно полученным данным при-

Таблица 4. Урожайность томата сорта Благодатный, среднее за 2020-2023гг.
Table 4. Yield of tomato cultivar Blagodatny, average for 2020-2023

Благодатный	Урожайность, т/га				Среднее, т/га	Отклонение, т/га	Отклонение, %
AraSil, г/га	Araliqua ЖКУ, л/га						
	0	10	20	40			
0	50,7	72,4	76,2	80,5	70,0	–	–
100	69,3	76,9	82,5	85,1	78,5	8,5	12,2
200	71,0	80,9	84,4	86,8	80,8	10,8	15,5
400	76,2	83,5	86,4	88,1	83,6	13,6	19,4
Среднее, т/га	66,8	78,4	82,4	85,1	–	–	–
Отклонение, т/га	–	11,6	15,6	18,3	–	–	–
Отклонение, %	–	17,4	23,3	27,4	–	–	–

НСР₀₅: частных различий – 5,1, фактора A =B – 3,8, взаимодействия АВ – 3,3



НСР₀₅: частных различий – 5,8, фактора A=B – 4,6, взаимодействия AB – 4,1

Рис. 4. Урожайность томата сорта Гном, среднее за 2020-2023 годы
Fig. 4. Yield of tomato cultivar Gnom, average for 2020-2023

менение агрохимиката AraSil и жидкого комплексного удобрения ЖКУ как по отдельности, так и комплексно является высокоэффективным агроприемом для увеличения средней массы плода у сорта Магнат. Оптимальной с агрономической точки зрения является схема с использованием AraSil в дозе 200-400 г/га и Aраliqua ЖКУ в дозе 20-40 л/га.

Анализ данных приведенных в таблице 4 показывает, что с увеличением дозы удобрений наблюдается устойчивый рост средней урожайности от 66,8 т/га при отсутствии подкормок до максимальных значений 85,1 т/га под влиянием удобрения Aраliqua ЖКУ 40л/га и агрохимиката AraSil 400 г/га. Отклонения в процентах демонстрируют значительный положительный вклад комплексного применения удобрений в повышение урожая – прирост доходит до 27,4% по сравнению с контролем. Эти результаты указывают на эффективность использования данных доз для значительного улучшения продуктивности сорта Благодатный в условиях эксперимента.

Полученные результаты (рис. 4) демонстрируют влияние различных дозировок удобрений AraSil и Aраliqua ЖКУ на хозяйственную урожайность томата сорта Гном в пересчёте на тонны с гектара. Оба препарата, показали увеличение урожайности по сравнению с контрольной группой, где обработка не проводилась. Урожайность возрастает при максимальных дозах Aраliqua ЖКУ (40 л/га) до 60,5 т/га, а также при применении AraSil в дозировке 400 г/га – 62,2 т/га. Комплексное применение препаратов Aраliqua ЖКУ (40 л/га) в комбинации агрохимиката AraSil 400 г/га, обеспечили максимальную урожайность (67,1 т/га) по сравнению с другими вариантами опыта. Это свидетельствует о положительном эффекте подкормок на продуктивность растений по сравнению с контролем. Таким образом, для сорта Гном наибольший прирост урожая наблюдается при увеличении доз удобрений Aраliqua ЖКУ 40 л/га и AraSil 400 г/га, что необходимо учитывать при оптимизации системы питания растений.

Выводы

Анализ взаимосвязи формирования массы плода и урожайности селекционных образцов томата с изучаемыми концентрациями Aраliqua ЖКУ и AraSil показал, что листовые подкормки в условиях капельного орошения являются высокоэффективным агротехническим приемом для повышения продуктивности томата в открытом грунте Центрального района Нечерноземной зоны. Согласно полученным данным, установлен четкий дозозависимый эффект от применения изучаемых препаратов с ростом их доз до 400 г/га для AraSil и 40 л/га для Aраliqua ЖКУ, под влиянием которых последовательно увеличиваются средняя масса плода и урожайность у всех исследуемых сортов томата. Таким образом, максимальная масса плода (195,4 г) у сорта Магнат достигнута при комбинации AraSil 400 г/га + Aраliqua ЖКУ 40 л/га, что на 10% выше контроля. У сорта Благодатный комбинация тех же доз удобрений дала максимальный результат – 116,4 г относительно контроля (79 г). Наивысший показатель массы плода (59,3 г) у сорта Гном, также зафиксирован при обработке AraSil 400 г/га + Aраliqua ЖКУ 40 л/га, что на 10,3% выше контроля. Аналогично, своевременное применение листовых подкормок AraSil и Aраliqua ЖКУ существенно повысило урожайность всех изучаемых сортов. У сорта Магнат урожайность росла с увеличением доз удобрений. Наиболее эффективной оказалась комбинация AraSil 400 г/га + Aраliqua ЖКУ 40 л/га, при данной комбинации урожайность зафиксирована на уровне 74,3 т/га, что на 17,9% выше контроля. Максимальная урожайность (88,1 т/га) сорта Благодатный получена при комбинации AraSil 400 г/га + Aраliqua ЖКУ 40 л/га, что на 27,4% выше контроля. Наибольшая урожайность (67,1 т/га) сорта Гном также достигнута при совместном применении максимальных доз AraSil (400 г/га) и ЖКУ (40 л/га). Полученные положительные результаты позволяют рационально определять нормы применения препаратов Aраliqua ЖКУ и AraSil для выращивания сортов томата с различным типом куста, массой и формой плода.

• Литература / References

1. Rana G., Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of agronomy*. 2000;13(2-3):125-153. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
2. Zhang K., Greenwood D.J., Spracklen W.P., Rahn C.R., Hammond J.P., White P. J., Burns I. G. A universal agro-hydrological model for water and nitrogen cycles in the soil–crop system SMCR_N: Critical update and further validation. *Agricultural water management*. 2010;97(10):1411-1422. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.007>
3. Jung J.K., McCouch S. Getting to the roots of it: genetic and hormonal control of root architecture. *Frontiers in plant science*. 2013;(4):186. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00186>
4. Bastiaanssen W.G., Menenti M., Feddes R.A., Holtslag A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*. 1998;(212):198-212.
5. Mermoud A., Tamini T.D., Yacouba H. Impacts of different irrigation schedules on the water balance components of an onion crop in a semi-arid zone. *Agricultural water management*. 2005;77(1-3):282-295. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.033>
6. Çolak Y.B., Yazar A., Gönen E., Eroğlu E.Ç. Yield and quality response of surface and subsurface drip-irrigated eggplant and comparison of net returns. *Agricultural Water Management*. 2018;(206):165-175. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.010>
7. Cetin O., Bilgel L. Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton. *Agricultural Water Management*. 2002;54(1):1-15. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00138-X)
8. Postel S., Polak P., Gonzales F., Keller J. Drip irrigation for small farmers: A new initiative to alleviate hunger and poverty. *Water International*. 2001;26(1):3-13.
9. Chartzoulakis K., Bertaki M. Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015;(4):88-98. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.011>
10. Fan J., Lu X., Gu S., Guo X. Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China. *Agricultural Water Management*. – 2020;(241):106352. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106352>
11. FAOSTAT. Statistics Database. 2022. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed on 11 October 2022).
12. Pérez-Labrada F., López-Vargas E.R., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., Benavides-Mendoza A., Juárez-Maldonado A. Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants*. 2019;8(6):151. <https://doi.org/10.3390/plants8060151>
13. Zotarelli L., Scholberg J.M., Dukes M.D., Muñoz-Carpena R., Icerman J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural water management*. 2009;96(1):23-34. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.007>
14. Locascio S.J. Management of irrigation for vegetables: Past, present, and future. *Hort Technology*. 2005;15(3):482-485. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.15.3.0482>
15. Hebbar S.S., Ramachandrapa B.K., Nanjappa H.V., Prabhakar M.J. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *European Journal of agronomy*. 2004;21(1):117-127. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00091-1)
16. Tyutyuma N.V., Solodovnikov A.P., Mukhortova T.V., Kudryashova N.I. Determination of the optimal irrigation regime and the level of mineral nutrition of tomato hybrids of Russian selection in the conditions of the north of the Astrakhan region. *Agrarian scientific journal*. 2017;(8):32-38. (In Russ.) <https://elibrary.ru/zemasf>
17. Petrov N.Yu., Zvolinsky V.P., Kalmykova E.V., Kalmykova O.V. Complex use of water-soluble fertilizer and growth regulator in tomato crops. Current ecological state of the natural environment and scientific and practical aspects of rational nature management. 2018. P.442-447. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ywmflt>
18. Kondratieva I.Yu. Private selection of tomato. Moscow, 2010. ISBN 978-5-901695-38-8. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qibhtz>
19. Fan J. Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China. J. Fan et al. *Agricultural Water Management*. 2020;(241):106352. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106352>
20. <https://specagro.ru>
21. Klimenko N.N. Vegetable growing in the south of Russia. *Potato and vegetables*. 2013;(8):2-5. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rdlfcf>
22. Tumanyan A.F. Increasing the yield of tomatoes, sweet peppers and eggplants with drip irrigation by regulating mineral nutrition. *Theoretical & Applied Problems of Agro-industry*. 2016;28(3):11-17. (In Russ.) <https://elibrary.ru/xhsejx>
23. Bairambekov Sh.B., Anishko M.Yu., Gulyaeva G.V., Garyanova E.D. Influence of foliar application on tomato productivity in the volga delta conditions. *Proceedings of lower volga agro-university complex: science and higher education*. 2019;2(54):63–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-02-6>
24. <https://elibrary.ru/zbtuml>
24. Filin V.I. Scientific foundations for optimizing mineral nutrition and methods for determining fertilizer rates for the planned yield of agricultural crops. Management of crop formation processes in the field: collection of scientific papers. Volgograd: Volgograd Agricultural Institute, 1984. pp. 42–57. (In Russ.)
25. Dudnikova S.A., Lapina V.V., Dorozhkina L.A. Ways to improve protection of cucumber when growing using low-volume technology. *Agrochemical herald*. 2022;(6):74–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-6-014>
26. <https://elibrary.ru/zjdstq>
26. Vernichenko I.V., Osipova L.V., Kurnosova T.L., Lapushkina A.A., Bykovskaya I.A. Influence of selenium and silicon on nitrogen nutrition of barley and its resistance to drought and aluminum (experiments with ¹⁵N isotope). *Agrochemical herald*. 2021;(6):38–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2021-6-008>
27. <https://elibrary.ru/avamax>
27. Osipova L.V., Vernichenko I.V., Romadina L.V., Kurnosova T.L., Bykovskaya I.A., Lapushkina A.A. Effect of silicon on the ontogenetic adaptation of spring barley under the oxidative stress. *Plodородie*. 2020;1(112):18–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.112.06>
28. <https://elibrary.ru/symwxi>
28. Khoroshilov A.A., Frolova S.A. Use of mineral fertilizer with microelements "NanoSilicon" in the technology of growing cucumbers in closed ground. *Scientific journal of young scientists*. 2017;2(9):10–13. (In Russ.) <https://elibrary.ru/xtdlvj>
29. Lapushkin V.M., Dobryn P.V. Effect of silicon-containing fertilizers on tomato and cucumber yields under conditions of low-volume hydroponics. *Izvestiya of Timiryazev agricultural academy*. 2023;(1):5-19. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-1-5-19>
30. <https://elibrary.ru/xwexef>
30. Li Z., Guo F., Cornelis J.T., Song Z., Wang X., Delvaux B. Combined silicon-phosphorus fertilization affects the biomass and phytolith stock of rice plants. *Frontiers in plant science*. 2020;(11):67. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00067>
31. Lañé P., Haddad C., Arkoun M., Yvin J.C., Etienne P. Silicon promotes agronomic performance in *Brassica napus* cultivated under field conditions with two nitrogen fertilizer inputs. *Plants*. 2019;8(5):137.

<https://doi.org/10.3390/plants8050137>

32. Matychenkov V.V., Bocharnikova E.A., Pirogovskaya G.V., Ermolovich I.E. Prospects for the use of silicon preparations in agriculture (scientific literature review). *Pochvovedenie i agrokhimiya*. 2022;1(68):219–234. (In Russ.) [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-219-234](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-219-234) <https://elibrary.ru/rmuzpg>

33. Bocharnikova E.A., Matychenkov V.V., Matychenkov I.V. Silicon fertilizers and ameliorants: the history of study and the theory and practice of application. *Agrokhimiya*. 2011;(7):84–96. (In Russ.)

<https://elibrary.ru/nxrygv>

34. Kshnikatkina A.N., Alenin P.G., Kshnikatkin S.A., Voronova I.A. Agro-ecological aspects of application of herbicide tank mixtures together with the preparations albit and siliplant on seed crops of hungarian clover. *Zemledelie*. 2016;(7):45–48. (In Russ.)

<https://elibrary.ru/wwqywd>

35. Park B.K., Um I.C., Han S.M., Han S.E. Electrospinning to surpass white natural silk in sunlight rejection for radiative cooling. *Advanced Photonics Research*. 2021;2(6):2100008.

<https://doi.org/10.1002/adpr.202100008>

36. Odnoshnova E.M., Erofeeva T.V., Odnoshnova Yu.V. Use of Energen Aqua in growing table beets. Modern scientific and practical solutions in the agro-industrial complex, forestry, and hospitality: Proceedings of the national conference. Ryazan: Ryazan State Agrarian University. 2021. P. 81–87. (In Russ.)

37. Kachalova, M.V. "A Comparative Analysis of the Efficiency of Various Mineral Fertilizers in Pre-Sowing Seed Treatment." Proceedings of the International Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists "Prospect Svobodny-2015," dedicated to the 70th Anniversary of the Great Victory. 2015. P. 30. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ulsrpn>

38. Sailor D. The Agricola. A companion to Tacitus. 2012.

<https://doi.org/10.1017/S0009840X1300070X>

39. Treskina N.N., Ginda E.F., Kolosov I.G. Influence micropers on

massa groud and paramania ygods stosoryvino. *Scientific achievements and discoveries*. 2020. Pp. 63–69. (In Russ.)

<https://elibrary.ru/jloqjy>

40. Ito R.M., Lee G.T.S., Ganelevin R., Fagnani M.A., Leite C.A. Light spectrum management using colored nets to control the growth and blooming of Phalaenopsis. *ISHS Acta Horticulturae 770: XXVII International Horticultural Congress - IHC2006: International Symposium on Cultivation and Utilization of Asian, Sub-tropical, and Underutilized Horticultural Crops*. 2008.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.20>

41. Zubkova T., Vinogradov D., Butov M. Effectiveness of foliar fertilizing spring oilseed rape in the forest-steppe conditions of central black earth economic region of Russia. *BIO Web of Conferences. EDP Sciences*. 2023;(71):01035.

<https://doi.org/10.1051/bioconf/20237101035>

42. Methodical instructions for selection of tomato varieties and hybrids for open and protected ground. M., 1986. P. 111. (In Russ.)

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-2-58-61>

43. Guidelines for testing vegetable and melon crops. M., 2018. 224 c.

(In Russ.)

44. Litvinov S.S. Methodology of field experiments in vegetable growing. 2011. (In Russ.)

45. <https://gossortrf.ru/deyatelnost-upov> (date of access: 15.10.2023). (In Russ.)

46. Weather archive in Nemchinovka [Electronic resource] URL: https://rp5.md/Архив_ходы_в_Немчиновке (date of access: 15.10.2023). (In Russ.)

47. ApaSil [Electronic resource] URL:

<https://apasil.phosagro.ru/#rec460562131> (date of access: 15.10.2023). (In Russ.)

48. Liquid complex fertilizers (LCF) [Electronic resource] URL: <https://www.phosagro.ru/production/fertilizer/zhidkie-kompleksnye-udobreniya/2837/> (date accessed: 15.10.2023). (In Russ.)

Об авторах:

Яна Петровна Туксер – младший научный сотрудник лаб. молекулярной генетики и цитологии,

<https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>,

SPIN-код: 8520-1999, автор для переписки, [yana-tukuser@mail.ru](mailto: yana-tukuser@mail.ru)

Сергей Михайлович Надежкин – доктор биол. наук, профессор РАН, зав. лабораторно-аналитическим отделом,

<https://orcid.org/0000-0001-5786-3454>,

Scopus ID: 57193556462, SPIN-код: 1564-1159, [nadegs@yandex.ru](mailto: nadegs@yandex.ru)

Алексей Алексеевич Байков – старший научный сотрудник, лаб. физиологии и биохимии растений,

интродукции и технологии создания функциональных продуктов,

<https://orcid.org/0000-0003-4393-7525>,

SPIN-код: 7794-9703, автор для переписки, [physiol@inbox.ru](mailto: physiol@inbox.ru)

Мязар Ренатович Енгальчев – кандидат с.-х. наук

лаборатории селекции и семеноводства пасленовых культур,

<https://orsid.org/0000-0002-8609-8883>,

SPIN-код: 4131-4856, [myazar@mail.ru](mailto: myazar@mail.ru)

Ирина Юрьевна Кондратьева – кандидат с.-х. наук,

научный консультант лаборатории селекции

и семеноводства пасленовых культур,

SPIN-код: 3870-5032

Александр Федорович Пэлий – главный специалист

центра инноваций,

<https://orsid.org/0000-0002-0717-7533>,

SPIN-код: 7064-6985, [kaluga-peliy@yandex.ru](mailto: kaluga-peliy@yandex.ru)

Дамир Рамисович Шафигуллин – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник, лаб. физиологии и биохимии растений,

интродукции и технологии создания функциональных продуктов,

SPIN-код: 1024-2613, [Shafigullin89@yandex.ru](mailto: Shafigullin89@yandex.ru)

Мурат Сабирович Гинс – доктор биологических наук,

член-корреспондент РАН, заведующий

лаборатории физиологии и биохимии растений,

интродукции и технологии создания функциональных продуктов,

<https://orcid.org/0000-0001-5995-2696>,

Scopus Author ID: 6603575024,

SPIN-код: 6459-7630, [anirr@bk.ru](mailto: anirr@bk.ru)

About the Authors:

Yana P. Tukuser – Junior Researcher, Laboratory of Molecular Genetics and Cytology,

<https://orcid.org/0000-0003-2305-1575>,

SPIN code: 8520-1999, Corresponding Author, [yana-tukuser@mail.ru](mailto: yana-tukuser@mail.ru)

Sergey M. Nadezhkin – Dr. Sci. (Biology),

Professor of the Russian Academy of Sciences, Head

of the Laboratory Analytical Department,

<https://orcid.org/0000-0001-5786-3454>,

SPIN code: 1564-1159,

Scopus ID: 57193556462, [nadegs@yandex.ru](mailto: nadegs@yandex.ru)

Alexey A. Baikov – Senior Researcher,

Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry,

Introduction and Technology of Functional Product Creation,

<https://orcid.org/0000-0003-4393-7525>,

SPIN code: 7794-9703, Corresponding Author, [physiol@inbox.ru](mailto: physiol@inbox.ru)

Myazar R. Engalychev – Cand. Sci. (Agriculture),

Laboratory of Breeding and Seed Production of Solanaceous Crops,

<https://orsid.org/0000-0002-8609-8883>,

SPIN code: 4131-4856, [myazar@mail.ru](mailto: myazar@mail.ru)

Irina Yu. Kondratyeva – Cand. Sci. (Agriculture),

Scientific Consultant, Laboratory of Breeding and Seed Production

of Solanaceous Crops, SPIN code: 3870-5032, [priemnaya@vniissok.ru](mailto: priemnaya@vniissok.ru)

Aleksandr F. Peliy – Lead Specialist, Innovation Center,

<https://orsid.org/0000-0002-0717-7533>,

SPIN code: 7064-6985, [kaluga-peliy@yandex.ru](mailto: kaluga-peliy@yandex.ru)

Damir R. Shafigullin – Cand. Sci. (Agriculture),

Researcher, Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry,

Introduction and Technology of Functional Product Creation,

SPIN code: 1024-2613, [Shafigullin89@yandex.ru](mailto: Shafigullin89@yandex.ru)

Murat S. Gins – Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member

of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory

of Plant Physiology and Biochemistry, Introduction

and Technology of Functional Product Creation,

<https://orcid.org/0000-0001-5995-2696>,

SPIN code: 6459-7630,

Scopus Author ID: 6603575024, [anirr@bk.ru](mailto: anirr@bk.ru)

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-105-112>
УДК: 635.1/8:005.591.6(048)

А.В. Янченко, А.Ю. Федосов, М.И. Иванова,
А.М. Меньших, Е.В. Янченко*

Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО) 140153, Россия, Московская область, Раменский район, д. Верея, стр. 500

*Автор для переписки: elena_0881@mail.ru

Вклад авторов: Янченко А.В., Федосов А.Ю.: концептуализация, методология, верификация данных, создание рукописи и её редактирование, формальный анализ. Меньших А.М., Янченко Е.В.: руководство исследованием, концептуализация, методология, редактирование рукописи. Иванова М.И.: концептуализация, верификация данных, редактирование рукописи, формальный анализ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Янченко А.В., Федосов А.Ю., Иванова М.И., Меньших А.М., Янченко Е.В. Углеродные нанотрубки в овощеводстве (обзор). *Овощи России*. 2025;(6):105-112.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-105-112>

Поступила в редакцию: 19.05.2025

Принята к печати: 26.08.2025

Опубликована: 18.12.2025

Alexey V. Yanchenko, Alexander Yu. Fedosov,
Maria I. Ivanova, Alexander M. Menshikh,
Elena V. Yanchenko*

All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center" р. 500, Vereya village, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia

*Corresponding Author: elena_0881@mail.ru

Authors' Contribution: Yanchenko A.V., Fedosov A.Yu.: conceptualization, methodology, data verification, writing – original draft, review & editing, formal analysis. Menshikh A.M., Yanchenko E.V.: supervision, conceptualization, methodology, writing – review & editing. Ivanova M.I.: conceptualization, validation, writing – review & editing, formal analysis.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citations: Yanchenko A.V., Fedosov A.Yu., Ivanova M.I., Menshikh A.M., Yanchenko E.V. Carbon nanotubes in vegetable growing (review). *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):105-112. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-105-112>

Received: 19.05.2025

Accepted for publication: 26.08.2025

Published: 18.12.2025

Углеродные нанотрубки в овощеводстве (обзор)

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В данном обзоре рассматривается комплексное применение углеродных нанотрубок (УНТ) в овощеводстве. Освещаются различные аспекты их использования: от улучшения прорастания семян и стимуляции вегетативного роста до защиты растений в неблагоприятных условиях.

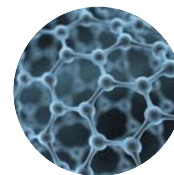
Результаты. Уникальной особенностью наноматериалов является их способность к интеллектуальной транспортировке активных веществ. Они точно доставляют удобрения, пестициды непосредственно к растению, высвобождая их в нужный момент. Такой подход позволяет создать идеальную систему питания растений, что приводит к существенному улучшению их развития, увеличению урожайности и повышению качества продукции. Особое внимание уделяется механизмам воздействия УНТ на растительные клетки, включая прямое взаимодействие с биомолекулами и косвенное влияние через регулирование окислительных процессов. Подчеркиваются перспективы применения УНТ для повышения эффективности водопользования в засушливых регионах.

Заключение. В присутствии избытка солей нанотрубки демонстрируют свои защитные свойства: они накапливаются в растительных тканях и усиливают функционирование аквапоринов. Это способствует более эффективному поглощению и транспортировке воды, снижая отрицательное воздействие солевого стресса на растения. Также обсуждаются существующие проблемы и потенциальные направления развития этой технологии в овощеводстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

овощеводство, наноматериалы, углеродные нанотрубки (УНТ), инновационный тип удобрений

Check for updates



Carbon nanotubes in vegetable growing (review)

ABSTRACT

Relevance. This review examines the comprehensive application of carbon nanotubes (CNTs) in vegetable growing. Various aspects of their use are highlighted, from improving seed germination and stimulating vegetative growth to protecting plants under adverse conditions.

Results. A unique feature of these nanomaterials is their ability to intelligently transport active substances. They precisely deliver fertilizers and pesticides directly to the plant, releasing them at the right time. This approach allows for the creation of an ideal plant nutrition system, which significantly improves plant development, increases yield, and enhances product quality. Particular attention is given to the mechanisms by which CNTs influence plant cells, including direct interactions with biomolecules and indirect influences through the regulation of oxidative processes.

Conclusion. The potential for using CNTs to improve water use efficiency in arid regions is highlighted. In the presence of excess salts, nanotubes demonstrate their protective properties: they accumulate in plant tissues and enhance the functioning of aquaporins. This promotes more efficient water absorption and transport, reducing the negative impact of salt stress on plants. The current challenges and potential development areas of this technology in vegetable growing are also discussed.

KEYWORDS:

vegetable growing, nanomaterials, carbon nanotubes (CNTs), innovative fertilizer

Введение

Многие развивающиеся страны остро нуждаются в решении проблемы продовольственной безопасности. Для этого в современном овощеводстве целесообразно применять нанотехнологии: они помогают увеличить урожайность и при этом снизить затраты на сельское хозяйство. Овощные хозяйства сегодня сталкиваются с комплексом вызовов: от климатических рисков и болезней растений до недостатка питательных веществ в грунте, снижения продуктивности и кадрового голода, а также пробелов в понимании генетической модификации культур. Инновационные инструменты на основе нанотехнологий, включая системы диагностики и борьбы с заболеваниями растений, применение наноцидов и экологически безопасных пестицидов, а также технологии равномерного распределения удобрений и микроэлементов способны значительно улучшить качество сельскохозяйственной продукции [1,2]. Изменение климата, проявляющееся в учащении таких экстремальных явлений, как засоление, засуха и температурные аномалии, ведет к значительному ежегодному снижению валовых показателей производства, урожайности и качества овощных культур в мировом масштабе [3]. Абиотические стрессы, особенно засуха и высокие температуры, становятся все более частыми и интенсивными в результате изменения климата, что приводит к значительным потерям урожая. Например, засуха и засоление почвы в высоких концентрациях, а также их вторичные эффекты, такие как осмотический, окислительный и ионный стресс, признаны основными препятствиями для сельскохозяйственного производства [4]. Кроме того, вредители и различные заболевания растений наносят серьезный удар по овощеводству, ежегодно приводя к потерям около трети урожая. Это становится главным препятствием на пути к обеспечению продовольственной безопасности населения планеты [2].

Революция в сельском хозяйстве может быть достигнута благодаря нанотехнологиям, которые способны трансформировать традиционные методы выращивания овощей в современную систему точного земледелия. Эта инновационная стратегия представляет собой умный подход к возделыванию овощей, основанный на постоянном мониторинге природных условий и автоматическом корректировании всех необходимых процессов в зависимости от изменений окружающей среды. По сути, это создание «умной» системы земледелия, которая подобно организму реагирует на внешние факторы, обеспечивая оптимальные условия для роста растений [5]. Разработка и внедрение элементов системы точного земледелия является актуальной задачей в сельском хозяйстве Российской Федерации [6].

Нанотехнологии открывают новые горизонты в сельском хозяйстве, позволяя одновременно увеличивать урожайность овощных культур и сохранять экологическое равновесие благодаря точечной доставке питательных веществ, умному контролю над распределением удобрений, минимизации потерь питательных элементов, созданию удобрений с программируемым высвобождением

и улучшению усвоения растениями труднодоступных веществ, что делает производство овощных культур более эффективным, устойчивым и экономически выгодным [7-9].

Технологический прогресс во многом зависит от разработки инновационных материалов, в особенности адаптивных и многофункциональных. Среди них перспективными являются новые наноматериалы, обладающие уникальными характеристиками – высокой прочностью, электропроводностью, значительной удельной поверхностью и биосовместимостью – углеродные нанотрубки (УНТ).

Благодаря своим уникальным размерам менее 100 нанометров, наноматериалы становятся передовым инструментом в революционном преобразовании сельского хозяйства. Малые размеры частиц позволяют им проникать в растительные ткани через корни и листья, создавая таким образом эффективную систему доставки удобрений и пестицидов [10]. В современном сельском хозяйстве наноматериалы демонстрируют впечатляющую эффективность благодаря своим уникальным свойствам. Их отличает огромная активная площадь поверхности, повышенная стабильность и наличие активных центров, что делает их гораздо более действенными по сравнению с обычными материалами.

Главная область их применения – «умные» наноудобрения, которые не только стимулируют рост и повышают урожайность растений, но и защищают их от болезней. Особую роль играют наносенсоры, позволяющие в реальном времени отслеживать состояние почвы и растений. Главное преимущество наноматериалов заключается в реализации контролируемой доставки активных веществ: они обеспечивают целенаправленный транспорт удобрений и пестицидов с последующим высвобождением в ответ на специфические физиолого-биохимические потребности растения. Это позволяет оптимизировать питание растений, значительно улучшить их рост, повысить урожайность и качество получаемой продукции [11-13].

Взаимодействие растений с углеродными нанотрубками (УНТ) приводит к изменениям как во внешнем виде, так и в физиологических процессах растений. На степень этих изменений влияют различные факторы: размер и тип УНТ, их концентрация и растворимость, а также стадия развития и вид самого растения. Принцип проникновения УНТ в растение основан на соотношении их размера с порами в клеточной стенке. Для улучшения растворимости и усвоения нанотрубок растениями применяются специальные методы обработки: ультразвуковая резка в сочетании с химическим окислением и добавление карбоновых групп [14].

Углеродные нанотрубки (УНТ) оказывают комплексное положительное воздействие на развитие растений: в низких концентрациях они стимулируют прорастание семян и развитие рассады, повышают содержание хлорофилла и усиливают фотосинтез, а при засолении почвы защищают растения, улучшая работу их корневых систем. Механизм их влияния включает как прямое взаи-

модействие с клеточными компонентами (белками, факторами транскрипции и ДНК), так и косвенное воздействие через увеличение выработки оксида азота и активных форм кислорода, что в совокупности стимулирует вегетативный рост и помогает растениям эффективнее поглощать и использовать воду, особенно в засушливых условиях [15].

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение нанотехнологий в сельское хозяйство сталкивается с рядом препятствий. Ключевыми проблемами являются необходимость тщательного изучения токсичности новых продуктов, ограниченность полевых исследований (в основном проводятся только лабораторные испытания), отсутствие четкой нормативной базы и высокие начальные затраты на производство.

Для преодоления этих барьеров требуется комплексный подход и совместные усилия всех заинтересованных сторон. В данном обзоре мы подробно рассмотрим актуальные примеры применения сельскохозяйственных нанотехнологий, основываясь на последних научных публикациях, и проанализируем перспективы развития этой области.

История применения и современные направления использования УНТ

Углеродные нанотрубки, появившиеся сравнительно недавно и получившие широкое признание только в последнее десятилетие, обладают выдающимися характеристиками, которые открывают новые перспективы для сельского хозяйства. Их уникальная структура, характеризующаяся огромной удельной поверхностью, минимальными размерами и высокой реакционной способностью, делает УНТ особенно перспективным материалом для агротехнологических инноваций. Эти свойства позволяют эффективно взаимодействовать с растительными клетками, влиять на их развитие и защитные механизмы, что создает основу для разработки новых методов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур.

В ходе проведенных исследований было изучено влияние различных типов одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) на развитие корневой системы шести видов овощных культур: томата, лука, огурца, салата, капусты и моркови. Эксперимент проводили в контролируемых условиях: семена помещали в чашки Петри с ОУНТ и выращивали при температуре 25°C. Результаты показали разнонаправленное воздействие нанотрубок на разные культуры: нефункционализированные ОУНТ подавляли рост корней томата, но стимулировали развитие корневой системы лука и огурцов. При этом функционализированные ОУНТ негативно влияли на удлинение корней салата, тогда как на рост капусты и моркови оба типа ОУНТ не оказывали существенного воздействия. Результаты исследования свидетельствуют о видовой специфичности воздействия ОУНТ на растения, что определяет актуальность изучения их влияния на широкий спектр сельскохозяйственных культур [16].

УНТ демонстрируют уникальную способность проникать через клеточные стенки и мембраны растительных клеток, что открывает перспективы для создания интеллектуальных систем доставки веществ в растения. Исследования с использованием конфокальной флуоресцентной микроскопии подтвердили способность одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) проникать через клеточные структуры растений, что было показано при использовании конъюгатов ОУНТ с флуоресцеином изотиоцианатом и ДНК. Более того, ОУНТ способны транспортировать различные вещества к разным органеллам растительных клеток [17]. Дополнительно было обнаружено, что УНТ могут проникать через толстую оболочку семян, усиливая процесс их гидратации, что способствует ускоренному прорастанию семян и стимулирует ранний рост рассады [18].

Многочисленные исследования продемонстрировали широкий спектр положительного влияния углеродных нанотрубок на сельскохозяйственные культуры. УНТ на первых этапах исследований были приняты как эффективный стимулятор прорастания семян и роста растений, проявляющий также антибактериальные свойства, подавляя формирование микробных биопленок. Особенно впечатляющие результаты были получены в исследованиях, показавших способность УНТ увеличивать урожайность в два раза за счет модификации почвенной микробиоты. В условиях засоления нанотрубки проявляют защитные свойства: они накапливаются в растительных клетках и усиливают работу аквапоринов, что улучшает поглощение и транспортировку воды, снижая негативное воздействие солевого стресса [19].

Перспективным направлением применения УНТ является создание на их основе сенсорных систем и систем транспорта соединений, открывающих новые пути для точного контроля за развитием растений. Эти multifunctional свойства делают углеродные нанотрубки привлекательным инструментом для решения различных задач современного растениеводства [20-21].

Все вышеперечисленные свойства позволяют применять их в следующих перспективных направлениях:

- Ускорение прорастания семян и стимуляция роста растений

Прорастание семян представляет собой критически важный и наиболее уязвимый этап в развитии растений, и применение нанотехнологий демонстрирует значительный потенциал в улучшении этого процесса. Обработка семян томата УНТ в концентрации 10-40 мкг/мл стимулировала ускоренное прорастание, что в дальнейшем положительно сказалось на развитии рассады и способствовало формированию более мощных растений.

Экспериментальные данные демонстрируют впечатляющие результаты: через 20 дней после обработки УНТ всхожесть семян томата составила 90%, что значительно превышает показатель контрольного варианта без обработки 71%. Кроме того, наблюдалось увеличение биомассы растений на 50%. Такой выраженный эффект

обусловлен способностью нанотрубок ускорять процесс поглощения воды семенами, что является ключевым фактором успешного прорастания.

Эти результаты указывают на перспективность использования УНТ как средства для оптимизации начального этапа развития растений, что может существенно повысить эффективность выращивания сельскохозяйственных культур [18].

Проведенные исследования показали, что углеродные нанотрубки (УНТ) оказывают различное влияние на прорастание семян разных культур при разных концентрациях. В экспериментах с томатом, луком, репой и редисом использовали концентрации УНТ: 10, 20 и 40 мг/л. Результаты продемонстрировали, что семена томата и лука более чувствительны к воздействию УНТ: их всхожесть значительно улучшалась при концентрациях 10-40 мг/л. В то же время семена редиса и репы показывали менее выраженную реакцию на присутствие нанотрубок. Эти данные указывают на видовую специфичность влияния УНТ на прорастание семян и необходимость подбора оптимальной концентрации нанотрубок для каждой конкретной культуры. Особенно перспективными выглядят результаты для томата и лука, что может быть использовано в практике выращивания этих культур [22].

Было выявлено, что концентрация 40 г/мл УНТ значительно усиливает усвоение питательных веществ растениями, что приводит к улучшению их роста и увеличению биомассы. Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) в концентрации 10-40 мг/л ускоряют прорастание семян перца за счет перфорации семенной оболочки. Кроме того, обработка ОУНТ демонстрируют более выраженное влияние на фотосинтетические процессы по сравнению с контрольными вариантами [23].

Другое исследование показало, что добавление ОУНТ усиливает рост рассады томата. Однако воздействие на рассаду томата ОУНТ в концентрации 50 мкг/мл значительно снизило содержание хлорофилла в листьях в 1,5 раза, а общая масса и высота системы корень/побег томата уменьшились в четыре раза по сравнению с контрольным вариантом [24]. Другое исследование показало, что внесение УНТ в почву увеличивает число цветков и плодов томата в два раза, при этом размер и качество листьев не изменяются по сравнению с листьями, выращенными в контрольной почве [25].

С помощью физиологических и морфологических анализов положительное влияние УНТ было оценено на различных культурах, включая шпинат, салат, огурец, перец чили в гидропонной культуре. Длина корней и побегов шпината и салата резко сократилась после 15 дней гидропонного выращивания с воздействием 1000 мг/л и 2000 мг/л УНТ. Наиболее чувствительными к растворам УНТ культурами были шпинат и салат, за которыми следовал огурец; было показано, что растворы УНТ для гидропонного выращивания обладают незначительной токсичностью или вообще не имеют токсичности к перцу чили [26]. Использование УНТ привело к значительному улучшению показателей прорастания и стимулировало усиленный рост его вегетативной массы [27].

Исследователи предположили, механизм положительного влияния углеродных нанотрубок на растения может быть связан с их поверхностным зарядом. УНТ способны стимулировать синтез белков, формирующих водные каналы в клетках растений томата. Это приводит к улучшению системы водного транспорта в растении и повышению эффективности поглощения воды.

Такой эффект может объяснять наблюдаемое улучшение всхожести и роста растений при использовании УНТ, а также их повышенную устойчивость к водному стрессу. По сути, нанотрубки действуют как биостимуляторы, активирующие естественные механизмы растения по управлению водным балансом [25, 28, 29].

Таким образом, УНТ могут ускорять прорастание семян и усиливать развитие корневой системы за счёт улучшения проницаемости клеточных мембран и транспорта питательных веществ.

- «Умные» системы доставки удобрений и пестицидов

Углеродные нанотрубки представляют собой инновационный тип удобрений, сочетающий функции стимулятора роста и средства с пролонгированным высвобождением питательных веществ. Их главное преимущество – способность работать как «умные» системы доставки, которые самостоятельно регулируют подачу удобрений и пестицидов в зависимости от потребностей растения. Механизм действия основан на уникальной способности наноглерода поглощать азот и выделять ионы водорода, что значительно улучшает способность растений усваивать воду и питательные вещества. Это приводит к более эффективному поглощению важнейших макроэлементов – азота, фосфора и калия [19]. Высокая проводимость воды в УНТ позволяет создавать на их основе эффективные наноплатформы для решения различных проблем питания растений. При этом системы доставки на основе углеродных нанотрубок обеспечивают точечную подачу агрохимикатов, минимизируя их попадание в окружающую среду и негативное воздействие на здоровые ткани растений.

УНТ могут служить носителями для микроэлементов, удобрений или пестицидов, обеспечивая их медленное и контролируемое высвобождение. Это снижает расход химикатов и минимизирует их негативное влияние на экосистему. Например, нанотрубки с «загруженными» питательными веществами доставляют их напрямую к корням растений, повышая эффективность усвоения.

- Биосенсоры для точного земледелия

Углеродные нанотрубки (УНТ) способны регулировать физиологические процессы растений, преодолевать клеточные барьеры и обеспечивать «умную» доставку необходимых веществ. Потенциал УНТ также включает их применение в качестве многофункциональных носителей и основы для разработки биосенсорных технологий, что способствует инновационному развитию агропромышленного комплекса [21, 30].

УНТ интегрируют в датчики для мониторинга параметров почвы (влажность, pH, содержание азота) и расте-

ний. Это позволяет оптимизировать полив, внесение удобрений и прогнозировать урожайность. Такие сенсоры могут работать в режиме реального времени, передавая данные через IoT-платформы.

- Защита растений от патогенов

Различные инфекционные заболевания растений в основном вызываются патогенными организмами, такими как вирусы, бактерии, грибки, нематоды, а также насекомыми и паразитическими растениями. Эти инфекционные болезни растений постоянно являются причиной серьезного ущерба росту растений и потерь урожая овощных культур [2].

Антибактериальная активность УНТ определяется комплексом факторов, включающих их состав, модификацию свойств внешнего слоя, размеры и диаметр, а также внешние условия, такие как диспергирующая способность, культуральная среда, тип бактерии, дозировка и время реакции. Эффективность УНТ как потенциальных антибактериальных агентов обусловлена их высокой стабильностью и специфическими механизмами взаимодействия с бактериями, что делает их перспективным материалом для разработки новых антибактериальных препаратов с заданными свойствами [31].

УНТ демонстрируют выраженную антибактериальную активность за счет комбинированного физического и химического воздействия на бактерии: при прямом контакте происходит механическое повреждение клеточной мембраны, что вызывает изменение формы клеток, последующую утечку цитоплазмы, высвобождение ферментов и электролитов, а также распад липидов, что в итоге приводит к гибели микроорганизмов. [32].

ОУНТ демонстрируют выраженные антибактериальные свойства благодаря механическому повреждению клеточных мембран бактерий при прямом контакте. Особенно эффективны ОУНТ с узким распределением диаметра, что делает их перспективным материалом для создания новых антибактериальных покрытий и изделий.

Кроме того, многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) способны усиливать защитные механизмы растений, активируя антиоксидантную систему. Это подтверждается исследованиями на томатах, где применение МУНТ привело к повышению содержания аскорбиновой кислоты, флавоноидов и активности глутатионпероксидазы, что способствовало более эффективной защите от патогена *A. solani*. Дополнительным преимуществом является улучшение фотосинтетической активности и водного обмена растений при использовании МУНТ [33].

В связи с тем, что УНТ обладают антимикробными свойствами, их часто используют для создания покрытий семян или обработки растений (например, в виде спреев), чтобы подавлять грибки, бактерии и вирусы.

- Сорбция токсинов и адаптация к стрессам окружающей среды

Высокая адсорбционная способность УНТ помогает очищать почву от тяжёлых металлов, пестицидов и дру-

гих загрязнителей. Различные биотические (патогены и травоядные) и абиотические (засоление, засуха, жара, высокая освещенность и тяжелые металлы) нагрузки на сельскохозяйственные культуры усугубляются сокращением пахотных земель, нехваткой водных ресурсов, последствиями изменения климата и использованием некачественных агрохимикатов, что оказывает негативное воздействие на рост сельскохозяйственных культур и урожайность. Добавление УНТ в почву повышает её влагоёмкость, что критично в засушливых регионах. Ежегодно засуха и засоление становятся причиной потерь сельского хозяйства на миллиарды долларов [3].

Исследования показали, что углеродные нанотрубки способны улучшать рост и продуктивность растений в условиях абиотического стресса. Особенно эффективна противогрибковая активность МУНТ с поверхностными функциональными группами OH-, COOH- и -NH₂ против патогена растений *Fusarium graminearum*: при концентрации 500 г/мл длина спор грибка уменьшилась практически вдвое - с 54,5 мкм до 28,3, 27,4 и 29,5 мкм соответственно. [34].

Накопление пестицидов в растениях существенно различается в зависимости от вида сельскохозяйственных культур, типа и концентрации используемых углеродных наноматериалов, при этом адсорбционные исследования демонстрируют, что углеродные нанотрубки значительно влияют на транспорт и судьбу адсорбированных органических загрязнителей в почве, что может потенциально изменять их биодоступность и токсичность для живых организмов. [35].

Углеродные нанотрубки оказывают значительное влияние на биохимические и физиологические процессы в растениях, воздействуя на фотосинтез и активируя защитные механизмы через положительно регулирующие стрессовые гены. Наибольшее стимулирующее действие на рост растений томата оказывают хорошо диспергированные функционализированные УНТ с сильными функциональными группами, поскольку они активируют аквапорины [36].

МУНТ способны проникать в клетки взрослой растения брокколи, причем их накопление усиливается при солевом стрессе, оказывая комплексное положительное влияние на рост растений через улучшение поглощения воды благодаря более благоприятным энергетическим силам, повышенную ассимиляцию CO₂, изменение содержания липидов, жесткости и проницаемости плазматических мембран корней, а также усиление трансдукции аквапорина, что способствует оптимизированной транспортировке воды и снижает негативное воздействие солевого стресса. [19].

Области применения УНТ могут быть самые разнообразные. Например, добавление УНТ в полимеры повышает прочность и износостойкость деталей техники (например, теплиц, систем капельного полива), снижая затраты на ремонт, а лёгкие композитные материалы с УНТ уменьшают вес машин, экономя топливо. Кроме того, УНТ можно использовать для очистки воды для полива, а именно, УНТ применяют в фильтрах для уда-

ления солей, органических загрязнений и микропластика из воды, что особенно важно в регионах с дефицитом чистой воды.

Взаимодействие УНТ

с растениями овощных культур

В современном научном мире пристальное внимание уделяется изучению процессов, связанных с проникновением и перемещением наночастиц в тканях растений, особенно это касается овощных культур. Уникальная особенность растительных клеток заключается в наличии защитного барьера – клеточной стенки, построенной из сложной сети целлюлозных волокон. Интересно отметить, что наночастицы и их объединения благодаря своим небольшим размерам могут беспрепятственно проходить через поры клеточной стенки. При этом они передвигаются по межклеточному пространству, следуя апопластному пути, что позволяет им проникать внутрь клетки без повреждения её структурных элементов [37]. Вид растения, возраст, условия роста, физико-химическое качество, функционализация, стабильность и распределение наночастиц влияют на их поглощение, транслокацию и накопление [38].

МУНТ оказывают значительное влияние на физиологию растений: они способны модулировать экспрессию ключевых генов, связанных с водным обменом и стрессовыми реакциями, активировать синтез аквапоринов – белков, обеспечивающих транспорт воды через клеточные мембраны, и стимулировать развитие корневой системы за счет формирования дополнительных транспортных пор в клеточных структурах. При солевом стрессе МУНТ демонстрируют защитный эффект: они проникают в клетки растений и улучшают водный режим благодаря изменению липидного состава и повышению проницаемости плазматических мембран корней, усиливают передачу водного сигнала через активацию аквапоринов, что в итоге снижает негативное воздействие засоления на растения [19].

Углеродные нанотрубки (УНТ) эффективно проникают в различные растительные культуры в гидропонных условиях, причём их проникновение зависит от размера, функционализации и условий окружающей среды, при этом функционализированные УНТ демонстрируют лучшую проникающую способность; они улучшают морфологическое развитие растений, увеличивают биомассу всех органов, активируют гены роста и повышают концентрацию ауксинов, что в итоге положительно влияет на общий рост и развитие растений [39].

Функционализированные углеродные нанотрубки проникают в клетки растений при помощи биомакромолекул (белков, антител, ДНК) на своей поверхности через энергозависимый эндоцитарный механизм, а при корневой контаминации как функционализированные, так и нефункционализированные УНТ способны проникать в клетки, после чего транспортируются по сосудистой системе растения вместе с водой и питательными веществами в верхние части растения, что подтверждается обнаружением низких концентраций УНТ в стеблях, побегах, листьях и плодах растений. [40].

Многостенные углеродные нанотрубки, несмотря на свои относительно большие размеры по сравнению с фуллередами и одностенными углеродными нанотрубками, способны проникать в растения и перемещаться внутри них, формируя новые поры и проникая через твёрдые оболочки семян. Установлено присутствие МУНТ в вегетативных органах и цветках томатов, а их транслокация в растениях может осуществляться через капиллярные механизмы, причём при достижении узких участков сосудистой системы УНТ могут блокировать транспорт питательных веществ и других материалов. [41].

Перспективы использования

Открытие УНТ вызвало большой научный интерес благодаря их исключительным свойствам: миниатюрным размерам, обширной площади поверхности и способности проникать через клеточные мембраны. В сельском хозяйстве УНТ могут стать революционной технологией, улучшая развитие растений и оптимизируя использование удобрений. Однако исследования выявили и обратную сторону: нанотрубки способны негативно влиять на растительный организм, вызывая окислительный стресс, изменение генетической экспрессии и даже гибель клеток. Наблюдаются такие симптомы, как уменьшение корневой системы, деформация листьев и снижение общей жизнеспособности растений.

Применение УНТ в сельском хозяйстве сопряжено с рядом серьезных ограничений. Во-первых, они способны накапливаться в почве и негативно влиять на почвенную микрофлору, снижая её разнообразие и численность. Дополнительную обеспокоенность вызывает способность УНТ выступать в роли переносчиков загрязняющих веществ, что может привести к их накоплению в сельскохозяйственных культурах. При этом нанотрубки могут проникать через корневую систему и распространяться по всему растению, достигая съедобных частей. Существенным препятствием для широкого внедрения УНТ является их высокая стоимость по сравнению с традиционными удобрениями и противомикробными препаратами. Для успешной конкуренции на рынке необходимо решить вопросы масштабирования производства и возможности повторного использования УНТ, что позволит снизить их себестоимость и сделать более привлекательными для практического применения в сельском хозяйстве. [42].

Несмотря на растущий интерес к применению УНТ в овощеводстве, эта область исследований находится на начальной стадии развития. Существует множество белых пятен в понимании механизмов взаимодействия УНТ с растительными системами. Требуются дополнительные исследования для прояснения ряда ключевых вопросов: как именно УНТ влияют на поглощение воды при прорастании семян, каким образом они участвуют в реакциях растений на абиотический стресс, как происходит их перемещение внутри растительных тканей и как они влияют на экспрессию генов. Особую озабоченность вызывает потенциальная токсичность УНТ для растений, почвенных микроорганизмов и человека при употребле-

нии загрязненных продуктов питания. Перед коммерческим внедрением УНТ в сельском хозяйстве необходимо разработать надёжные методы оценки и минимизации их токсикологического воздействия, а также провести всесторонние испытания их безопасности для живых организмов и человека

Выводы

В данном обзоре рассматривается роль УНТ в развитии растений и их потенциал для устойчивого овощеводства. Уникальные физико-химические свойства УНТ, определяемые их структурой (диаметром, спиральностью и количеством графеновых слоев), представляют значительный интерес для современного растениеводства. Концепция устойчивого овощеводства нацелена на сокращение применения агрохимикатов без ущерба для урожайности и при обеспечении экономической эффек-

тивности производства. УНТ могут сыграть важную роль в достижении этих целей. Однако расширение их применения в сельском хозяйстве неизбежно приведет к увеличению распространения нанотрубок в окружающей среде, что требует тщательной оценки их влияния на экосистему. В то же время, не вполне определено влияние УНТ на нативные объекты и живые организмы.

Для безопасного и эффективного использования УНТ в устойчивом овощеводстве необходимы дальнейшие исследования механизмов их поглощения и распределения в растительных тканях. Это позволит разработать оптимальные методы их применения и минимизировать потенциальные риски для окружающей среды и здоровья человека.

Таким образом, УНТ могут стать инструментом для перехода к высокотехнологичному сельскому хозяйству, но их использование требует баланса между инновациями и экологической безопасностью.

• Литература / References

- Acharya A. Pal P.K. Agriculture nanotechnology: translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability. *NanoImpact*. 2020;19:100232. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100232>
- Nazarov P.A., Baleev D.N., Ivanova M.I., Sokolova L.M., Karakozova M.V. Infectious plant diseases: etiology, current status, problems and prospects in plant protection. *Acta Naturae*. 2020;12(3):46-59. (In Russ.) <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026>
- Bukharov A.F., Fedosov A.Yu., Ivanova M.I. Impacts of climate change on vegetable production and ways to overcome them. *Vegetable crops of Russia*. 2023;(3):41-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-3-41-49> <https://www.elibrary.ru/ncmioc>
- Vogel E., Donat M.G., Alexander L.V., Meinshausen M., Ray D.K., Karoly D., Meinshausen N., Frieler K. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environ Res Lett*. 2019;14:054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>
- Fedosov A.Yu., Menshikh A.M. Precision farming technologies in vegetable growing. *Vegetable crops of Russia*. 2022;(6):40-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-6-40-45> <https://www.elibrary.ru/zrkrpi>
- Menshikh A.M., Fedosov A.Yu., Yanchenko V.A., Fartukov V.A., Ivanova M.I. Intelligent irrigation system: digital solutions in vegetable growing. *Rice growing*. 2024;23,2(63):76-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2024-63-2-76-84> <https://www.elibrary.ru/shioub>
- Lowry G.V., Avellan A., Gilbertson L.M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nat Nanotechnol*. 2019;14:517-22. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0461-7>
- Kah M., Kookana R.S., Gogos A., Bucheli T.D. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nat Nanotechnol*. 2018;13:677-84. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>
- Zelenkov V.N., Ivanova M.I., Latushkin V.V., Potapov V.V., Timakova L.N. Hydrothermal nanosilica in the production of microgreens as a functional food product. *Topical biotechnology*. 2022;(1):291. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2304-4691-2022-1-291>
- Poddar K., Vijayan J., Ray S., Adak T. Nanotechnology for sustainable agriculture. In: *Biotechnology for sustainable agriculture*.

Amsterdam: Elsevier; 2018. P. 281-303.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812160-3.00010-6>

- Zhao L., Lu L., Wang A., Zhang H., Huang M., Wu H., Xing B., Wang Z., Ji R. Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *J Agric Food Chem*. 2020;68:1935-47. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>
- Malik A., Mor V.S., Tokas J., Punia H., Malik S., Malik K., Sangwan S., Tomar S., Singh P., Singh N. Biostimulant-treated seedlings under sustainable agriculture: a global perspective facing climate change. *Agronomy*. 2021;11:14. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010014>
- Safdar M., Kim W., Park S. et al. Engineering plants with carbon nanotubes: a sustainable agriculture approach. *J Nanobiotechnol*. 2022;(20):275. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01483-w>
- Patel A., Tiwari S., Parihar P., Singh R., Prasad S.M. Carbon nanotubes as plant growth regulators: impacts on growth, reproductive system, and soil microbial community. In: *Nanomaterials in plants, algae and microorganisms*. Amsterdam: Elsevier; 2019. P. 23-42. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811488-9.00002-0>
- Mathew S., Tiwari D., Tripathi D. Interaction of carbon nanotubes with plant system: a review. *Carbon Lett*. 2021;31:167-176. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00195-1>
- Cañas J.E., Long M., Nations S., Vadan R., Dai L., Luo M., Ambikapathi R., Lee E.H., Olszyk D. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environ Toxicol Chem*. 2008;27:1922-31. <https://doi.org/10.1897/08-117.1>
- Lin C., Fugetsu B., Su Y., Watari F. Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on Arabidopsis T87 suspension cells. *J Hazard Mater*. 2009;170:578-83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.025>
- Khodakovskaya M., Dervishi E., Mahmood M., Xu Y., Li Z., Watanabe F., Biris A.S. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*. 2009;3:3221-7. <https://doi.org/10.1021/nn900887m>
- Martínez-Ballesta M.C., Zapata L., Chalbi N., Carvajal M. Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *J Nanobiotechnol*. 2016;14(1):42. <https://doi.org/10.1186/s12951-016-0199-4>
- Kumar V., Sachdev D., Pasricha R., Maheshwari P.H., Taneja N.K. Zinc-supported multiwalled carbon nanotube nanocomposite: a synergism to micronutrient release and a smart distributor to promote the growth of onion seeds in arid conditions. *ACS Appl Mater*

Interfaces. 2018;10:36733–45.

<https://doi.org/10.1021/acsami.8b13464>

21. Giraldo J.P., Wu H., Newkirk G.M., Kruss S. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. *Nat. Nanotechnol.* 2019;(14):541–553.

<https://doi.org/10.1038/s41565-019-0470-6>

22. Haghighi M., Teixeira da Silva J.A. The effect of carbon nanotubes on the seed germination and seedling growth of four vegetable species. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 2014;(17): 201–208.

<https://doi.org/10.1007/s12892-014-0057-6>

23. Pourkhaloe A., Haghighi M., Saharkhiz M.J., Jouzi H., Doroodmand M.M. Carbon nanotubes can promote seed germination via seed coat penetration. *Seed Technol.* 2011;(33):155–69.

24. Alimohammadi M., Xu Y., Wang D., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Physiological responses induced in tomato plants by a two-component nanostructural system composed of carbon nanotubes conjugated with quantum dots and its *in vivo* multimodal detection. *Nanotechnology*. 2011;22:295101.

<https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/29/295101>

25. Khodakovskaya M.V., Kim B.S., Kim J.N., Alimohammadi M., Dervishi E., Mustafa T., Cernigla C.E. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*. 2013;9:115–123.

<https://doi.org/10.1002/sml.201201225>

26. Begum P., Fugetsu B. Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L.) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. *J Hazard Mater.* 2012;243:212–22.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.025>

27. Srivastava A., Rao D.P. Enhancement of seed germination and plant growth of wheat, maize, peanut and garlic using multiwalled carbon nanotubes. *Eur. Chem. Bull.* 2014;(3): 502–504.

<https://doi.org/10.17628/ECB.2014.3.502-504>

28. Villagarcia H., Dervishi E., de Silva K., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small*. 2012;8:2328–34.

<https://doi.org/10.1002/sml.201102661>

29. Lahiani M.H., Dervishi E., Chen J., Nima Z., Gaume A., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2013;5:7965–73. <https://doi.org/10.1021/am402052x>

30. Kwak S.-Y., Lew T.T.S., Sweeney C.J., Koman V.B., Wong M.H., Bohmert-Tatarev K., Snell K.D., Seo J.S., Chua N.-H., Strano M.S. Chloroplast-selective gene delivery and expression in planta using chitosan-complexed single-walled carbon nanotube carriers. *Nat Nanotechnol.* 2019;14:447–55.

<https://doi.org/10.1038/s41565-019-0375-4>

31. Thines R., Mubarak N., Nizamuddin S., Sahu J., Abdullah E.,

Ganesan P. Application potential of carbon nanomaterials in water and wastewater treatment: a review. *J Taiwan Inst Chem Eng.* 2017;72:116–33. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.018>

32. Maksimova YG. Microorganisms and carbon nanotubes: interaction and applications. *Appl Biochem Microbiol.* 2019;55:1–12.

<https://doi.org/10.1134/S0003683819010101>

33. González-García Y., Cadenas-Pliego G., Alpuche-Solís Á.G., Cabrera R.I., Juárez-Maldonado A. Carbon nanotubes decrease the negative impact of *Alternaria solani* in tomato crop. *Nanomaterials*. 2021;11:1080.

<https://doi.org/10.3390/nano11051080>

34. Wang X., Zhou Z., Chen F. Surface modification of carbon nanotubes with an enhanced antifungal activity for the control of plant fungal pathogen. *Materials*. 2017;10:1375.

<https://doi.org/10.3390/ma10121375>

35. De La Torre-Roche R., Cantu J., Tamez C., Zuverza-Mena N., Hamdi H., Adisa I.O., Elmer W., Gardea-Torresdey J., White J.C. Seed Biofortification by engineered nanomaterials: a pathway to alleviate malnutrition? *J. Agric Food Chem.* 2020;68:12189–202.

<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04881>

36. Lahiani M.H., Dervishi E., Ivanov I., Chen J., Khodakovskaya M. Comparative study of plant responses to carbon-based nanomaterials with different morphologies. *Nanotechnology*. 2016;27:265102.

<https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/26/265102>

37. O'Neill M.A., York W.S. The Composition and Structure of Plant Primary Cell Walls In book: *Annual Plant Reviews online*. April 2018. Pp. 1-54.

<https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0067>

38. Rai M., Ribeiro C., Mattoso L., Duran N. Nanotechnologies in food and agriculture. Berlin: Springer; 2015.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7>

39. Guo X., Zhao J., Wang R., Zhang H., Xing B., Naeem M., Yao T., Li R., Xu R., Zhang Z. Effects of graphene oxide on tomato growth in different stages. *Plant Physiol Biochem.* 2021;162:447–55.

https://doi.org/10.1007/978-981-97-5104-4_8

40. Lahiani M.H., Nima Z.A., Villagarcia H., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Assessment of Effects of the Long-Term Exposure of Agricultural Crops to Carbon Nanotubes. *J Agric Food Chem.* 2018;66(26):6654–6662.

<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01863>

41. Servin A., Elmer W., Mukherjee A., De la Torre-Roche R., Hamdi H., White J.C., Dimkpa C. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015;17(2).

<https://doi.org/10.1007/s11051-015-2907-7>

42. Chen G., Qiu J., Liu Y., Jiang R., Cai S., Liu Y., Zhu F., Zeng F., Luan T., Ouyang G. Carbon nanotubes act as contaminant carriers and translocate within plants. *Sci Rep.* 2015;5:1–9.

<https://doi.org/10.1038/srep15682>

Об авторах:

Алексей Владимирович Янченко – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физиологических основ семеноведения, <https://orcid.org/0000-0002-1031-9459>, SPIN-код: 2128-9539

Александр Юрьевич Федосов – младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9492-8667>, SPIN-код: 4882-6547

Александр Михайлович Меньших – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7254-8487>, SPIN-код: 8471-3584

Елена Валерьевна Янченко – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3165-7238>, SPIN-код: 6301-7782, автор для переписки, elena_0881@mail.ru

Мария Ивановна Иванова – доктор с.-х. наук, проф. РАН, гл. научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>, SPIN-код: 1961-9188

About the Authors:

Alexey V. Yanchenko – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Physiological Foundations of Seed Science, <https://orcid.org/0000-0002-1031-9459>, SPIN-code: 2128-9539

Alexander Yu. Fedosov – Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9492-8667>, SPIN-code: 4882-6547

Alexander M. Menshikh – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7254-8487>, SPIN-code: 8471-3584

Elena V. Yanchenko – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3165-7238>, SPIN-code: 6301-7782, Corresponding Author, elena_0881@mail.ru

Maria I. Ivanova – Dr. Sci. (Agriculture), Prof., Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>, SPIN-code: 1961-9188

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-113-119>
УДК: 635.656-02(571.1)

С.П. Кузьмина*, Н.Г. Казыдуб, М.Ю. Куколева

ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»
644008, Россия, г. Омск-8,
ул. Институтская площадь, 1

*Автор для переписки: sp.kuzmina@omgau.org

Вклад авторов: Кузьмина С.П.: проведение исследований, верификация данных, формальный анализ, администрирование данных, создание рукописи и ее редактирование. Казыдуб Н.Г.: научное руководство исследованиями, методология, создание рукописи и ее редактирование. Куколева М.Ю.: проведение исследований.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кузьмина С.П., Казыдуб Н.Г., Куколева М.Ю. Оценка продуктивности и адаптивной способности сортов гороха овощного в условиях южной лесостепи Западной Сибири. *Овощи России*. 2025;(6):113-119.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-113-119>

Поступила в редакцию: 20.06.2025

Принята к печати: 23.07.2025

Опубликована: 18.12.2025

Svetlana P. Kuzmina*,
Nina G. Kazydub, Marina Yu. Kukoleva

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State Agrarian University"
1, Institutskaia square St., Omsk-8, Russia, 644008

*Corresponding Author: sp.kuzmina@omgau.org

Authors' Contributions: Kuzmina S.P.: investigation, validation, formal analysis, data curation, writing – review & editing. Kazydub N.G.: supervision, methodology, writing – review & editing. Kukoleva M.Yu.: investigation.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Kuzmina S.P., Kazydub N.G., Kukoleva M.Yu. Evaluation of productivity and adaptive capacity of vegetable peas varieties in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):113-119. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-113-119>

Received: 20.06.2025

Accepted for publication: 23.07.2025

Published: 18.12.2025

Оценка продуктивности и адаптивной способности сортов гороха овощного в условиях южной лесостепи Западной Сибири

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Горох овощной является важным элементом диетического питания в РФ благодаря содержанию витаминов, микроэлементов и незаменимых аминокислот. Для условий Омской области, которая является зоной рискованного земледелия из-за непредсказуемости погодных условий, необходимо создавать экологически пластичные сорта, которые бы обеспечивали высокую продуктивность в благоприятных условиях возделывания и существенно не снижали ее в стрессовых. Цель наших исследований – провести оценку экологической пластичности и стабильности образцов гороха овощного по признакам продуктивности в условиях южной лесостепи Омской области.

Материал и методика. В качестве материала исследований использовали 65 образцов международной коллекции генетических ресурсов. Исследования проводили в течение пяти лет с 2018 по 2022 годы в условиях южной лесостепи Омской области. Учеты вели в соответствии с «Методическими указаниями по изучению коллекции зерновых бобовых культур». Расчет экологической пластичности проводился по методике С.А. Эберхарта и В.А. Рассела в изложении В.А. Зыкина.

Результаты. В результате проведенных исследований установлено, что наибольшее влияние на формирование массы 1000 семян и количества семян в бобе оказывал генотип (от 57 до 60%), однако по массе семян с растения большее влияние имели условия произрастания (69%), что свидетельствует о большей пластичности данного признака в условиях Западной Сибири и дает возможность выделения ценных генотипов для селекционных программ. Расчет параметров экологической пластичности позволил выделить образцы гороха овощного, характеризующиеся высокой экологической пластичностью и отзывчивостью на условия выращивания: по массе семян с растения – Триумф; по массе 1000 семян – Триумф и Совинтер; по числу семян в бобе – Триумф, Дарунок и Премиум. Выделены образцы, демонстрирующие стабильную продуктивность, что является специфической реакцией генотипа на изменение условий среды: по массе семян с растения – Совинтер, Премиум, Неистощимый 195; по массе 1000 семян – Премиум с крупными семенами, Неистощимый 195 и Дарунок со средним размером семян; по числу семян в бобе – Совинтер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

горох овощной, селекция, экологическая пластичность, адаптивность, продуктивность

Evaluation of productivity and adaptive capacity of vegetable peas varieties in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia

ABSTRACT

Relevance. Peas are an important element of dietary nutrition in the Russian Federation due to the content of vitamins, microelements and essential amino acids. For the conditions of the Omsk region, which is a zone of risky farming due to unpredictable weather conditions, it is necessary to create ecologically flexible varieties that would ensure high productivity in favorable cultivation conditions and not significantly reduce it in stressful ones. The purpose of our research is to assess the ecological plasticity and stability of samples of peas based on productivity traits in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk region.

Material and Methodology. The research material was 65 samples of the international collection of genetic resources. The research was conducted over five years from 2018 to 2022 in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk region. The records were kept in accordance with the "Methodological guidelines for studying the collection of grain legume crops". The calculation of ecological plasticity was carried out according to the method of S.A. Eberhart and V.A. Russell as presented by V.A. Zykina.

Results. The studies have established that the greatest influence on the formation of the thousand-seed weight and the number of seeds in a pod was exerted by the genotype (from 57 to 60 %), however, in terms of seed weight per plant, growing conditions had a greater influence (69%), which indicates greater plasticity of this trait in the conditions of Western Siberia and makes it possible to isolate valuable genotypes for breeding programs. Calculation of the ecological plasticity parameters made it possible to select vegetable pea samples characterized by high ecological plasticity and responsiveness to growing conditions: by seed weight per plant – Triumph; by thousand-seed weight – Triumph and Sovinter; by the number of seeds in a pod – Triumph, Darunok and Premium. The samples demonstrating stable productivity were selected, which is a specific response of the genotype to changing environmental conditions: by seed weight per plant – Sovinter, Premium, Neistoshimiy 195; by weight of 1000 seeds – Premium with large seeds, Neistoshimiy 195 and Darunok with medium-sized seeds; by number of seeds in a pod – Sovinter.

KEYWORDS:

vegetable pea, selection, ecological plasticity, adaptability, productivity

Введение

Горох овощной получил широкое распространение в мире и имеет большую популярность у населения благодаря своему богатому пищевому профилю. По сравнению со злаками, горох содержит значительно большую долю растительного белка, сложных углеводов, клетчатки, витаминов, жирных омега-3 кислот и минералов, таких как железо, цинк, магний и кальций [1-3]. Волокна, присутствующие в оболочке семян гороха и клеточной стенке семядолей, снижают усвояемость крахмала и помогают в работе желудочно-кишечного тракта, что является хорошей предпосылкой для разнообразия микробиома кишечника человека. Кроме того, горох, как и другие бобовые культуры, содержит фитохимические вещества, такие как фенолы, флавоноиды, фитаты, лектины, танины, сапонины, оксалаты, ингибиторы ферментов, фитостерины и антимикробные пептиды, которые обладают полезными антиоксидантными, противомикробными, противовоспалительными, противодиабетическими и противораковыми действиями [2, 4, 5]. Благодаря симбиотическим отношениям с микоризными грибами, азотфиксирующими ризобиями и ризобактериями горох улучшает качество почвы, а снижение количества выбросов парниковых газов при его возделывании, может быть использовано для увеличения ресурсоэффективности сельского хозяйства [6, 7].

Однако урожайность гороха овощного часто ограничивается различными абиотическими- и биотическими стрессами, такими как засуха, переувлажнение, высокие или низкие температуры, болезни и вредители [8-11]. Условия окружающей среды изменчивы и вызывают у растений генетические адаптации к определенным условиям. Чем выше способность вида изменять метаболизм в соответствии с диапазонами изменяющихся условий, тем шире скорость его реакции и выше экологическая адаптивность [11-12]. В ответ на влияние стрессовых факторов растения выработали набор физиологических (фотосинтез, повреждение клеточной мембраны, транспирация, дыхание, разделение ассимилятов и поглощение минералов) и биохимических механизмов реагирования (инактивация ферментов, изменения в профилях

метаболитов), которые позволяют им адаптироваться и выживать в различных экологических условиях [13]. Общая тенденция приспособляемости возделываемых видов к определенным условиям выращивания обычно определяется коэффициентом регрессии. Устойчивость генотипа рассчитывается по разнице между максимальной и минимальной урожайностью и, чем она ниже, тем выше стрессоустойчивость [12, 14].

Цель наших исследований – провести оценку экологической пластичности и стабильности образцов гороха овощного по признакам продуктивности в условиях южной лесостепи Омской области.

Материал и методы проведения исследований

Опыты по изучению сортообразцов гороха овощного проводили в 2018-2022 годах в южной лесостепи Омской области. В качестве материала исследований служили 65 образцов международной коллекции генетических ресурсов. Стандартом являлся сорт Неистошный 195, рекомендованный для возделывания в регионе. Посев проводили вручную на делянках площадью 5,2 м² в четырехкратной повторности. Наблюдения, учеты и анализы проводили согласно «Методическим указаниям по изучению коллекции зерновых бобовых культур». Расчет экологической пластичности проводился по методике С.А. Эберхарта и В.А. Рассела в изложении В.А. Зыкина [12].

Погодные условия в годы проведения опытов были контрастными: 2018, 2019 и 2022 годы – слабо засушливыми (ГТК=1,1-1,2), 2020 и 2021 годы были очень засушливыми (ГТК=0,51-0,56) (рис. 1). Причем, тепло- и влагообеспеченность в разные фазы роста и развития растений существенно различалась. Начальный период вегетации растений (от «всходов до цветения») в 2020 году был сухой (ГТК=0,14), 2022 и 2021 годы – очень засушливые (ГТК=0,43-0,65), 2018 год – засушливый (ГТК=0,89), 2019 год – избыточно увлажненный (ГТК=2,19). Условия второй половины вегетации (период «цветение-созревание») в 2019 и 2021 годы были очень засушливыми (ГТК=0,49-0,61), 2020 год – засушливый (ГТК=0,72), 2018 год – слабозасушливый (ГТК=1,18), 2022 год – избыточно влажные (ГТК=1,91).

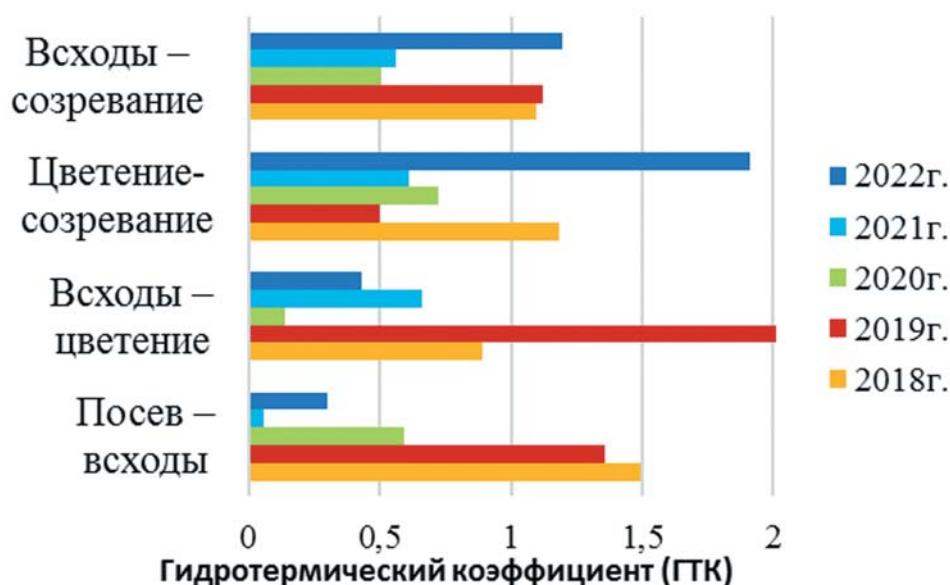


Рис. 1. Гидротермические условия в годы проведения опытов
Fig. 1. Hydrothermal conditions during the years of experiments

Результаты исследований

Продуктивность и ее элементы у изученных образцов гороха овощного характеризовались значительной изменчивостью в зависимости от погодных условий и генотипа. Так, число семян в бобе за время исследования варьировало от 4 до 9 шт. и в среднем составило 6,0 шт.; масса семян с растения – от 2,6 до 15,1 г шт. (в среднем 7,1 г); масса 1000 семян – от 134 до 312 г (в среднем 204,2 г) (рис. 2).

гической пластичности этих признаков позволит более целенаправленно вести отбор в сложных климатических условиях Западной Сибири.

Результаты дисперсионного анализа по всем изученным признакам показали, что варианты, отражающие изменчивость, обусловленную как генотипическими различиями образцов, так и погодными условиями были статистически достоверны. Однако если по массе 1000 семян и количеству семян в

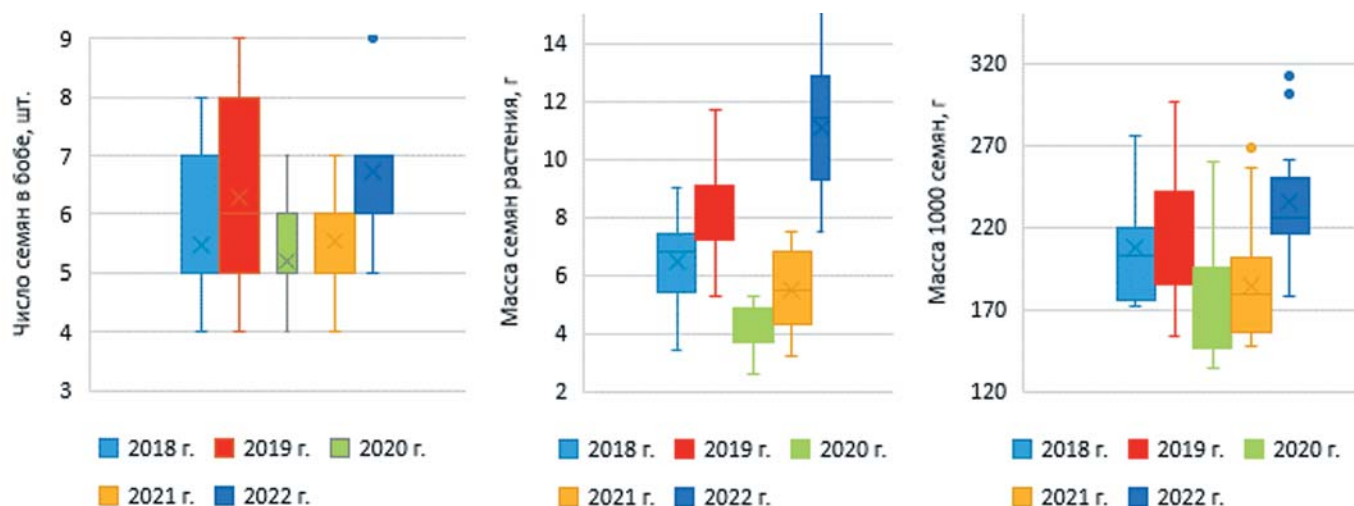


Рис. 2. Изменчивость элементов продуктивности гороха овощного в зависимости от условия выращивания
Fig. 2. Variability of productivity elements of vegetable peas depending on growing conditions

Максимальную продуктивность растения гороха овощного имели в условиях достаточного влагоувлажнения в 2022 и 2019 годах. Известно, что горох, принадлежащий к числу мезофитов, сравнительно легко переносит избыток влаги, в то время как в условиях засухи его урожайность резко снижается [1, 11]. Наименьшую продуктивность в нашем опыте растения сформировали в засушливом 2020 году.

Для селекции гороха овощного большое значение имеет крупность и выравненность семян по размеру, которая зависит от количества семян в бобе и массы 1000 семян, а также семенная продуктивность. Определение параметров эколо-

бобе наибольшее влияние на формирование признака оказывал генотип изучаемых форм (от 57 до 60%), то по массе семян с растения большее влияние имели факторы окружающей среды (69%), что указывает на пластичность данного признака в условиях Западной Сибири и возможность выделения ценных генотипов для селекции. Сильнее всего влияние генотипа проявлялось по массе 1000 семян (60%), слабее всего по массе семян с растения (11%) (рис. 3). Доля влияния погодных условий изменялась от 26 до 69%. Наименее подвержена влиянию условий окружающей среды масса 1000 семян (26%), что свидетельствует о высокой стабильности признака.



Рис. 3. Результаты дисперсионного анализа по элементам урожайности гороха овощного (2018-2022 годы)
Fig. 3. Results of the dispersion analysis for the yield elements of vegetable peas (2018-2022)

Выявлено, что наиболее благоприятные условия для формирования семенной продуктивности сложились в 2022 году, о чем свидетельствует максимальный индекс условий среды ($I_j=3,98$), самыми экстремальными для гороха овощного были засушливые условия 2020 года ($I_j=-2,87$) (табл. 1).

Большой интерес для отбора представляют образцы, сочетающие высокую продуктивность с экологической пластичностью. Они подходят для выращивания в широком диапазоне условий окружающей среды [13, 14]. Результаты расчета параметров экологической пластичности по массе семян с растения показали, что наибольшую ценность для селекции имеет сорт Триумф ($bi=1,15$). Он является самым пластичным из данного набора образцов, при этом в благоприятных условиях он формировал продуктивность семян 11,7 г, однако в экстремальных условиях масса семян резко снижалась и составила 2,6 г (что меньше на 9,1 г или 78%). Сорт Триумф, имеющий повышенную гомеостатичность, будет иметь преимущество при выращивании по интенсивной технологии или в благоприятных экологических условиях.

Сорта Неистощимый 195 ($bi=0,54$), Премиум ($bi=0,70$) и Совинтер ($bi=0,90$) с низкими значениями коэффициента экологической пластичности следует отнести к наиболее стабильным, семенная продуктивность у них в меньшей степени варьирует по годам – от 5,1-11,4 г, не снижаясь существенно даже в стрессовых условиях (на 4,1-6,3 г или 44-55%).

Наиболее благоприятные условия для формирования высокой массы 1000 семян наблюдались при достаточной влагообеспеченности растений в 2022 году ($I_j=33,46$), наименее благоприятные в условиях засухи 2020 года ($I_j=-28,61$).

Высокую пластичность по крупности семян имели образцы Крейсер ($b=1,30$), Совинтер ($bi=1,60$), Триумф ($bi=2,21$). Эти образцы могут быть рекомендованы для выращивания на интенсивном агрофоне или в благоприятных условиях. Данные образцы формировали преимущественно семена среднего размера (в среднем 180-227 г). При этом в благоприятных условиях 2022 года масса 1000 семян у них варьировала от 220 до 261 г, однако в неблагоприятных условиях их масса существенно снижалась (на 83-98 г или 38%) и составила в 2020 году 137-163 г.

Таблица 1. Параметры экологической пластичности выделенных образцов гороха овощного
Table 1. Parameters of ecological plasticity of the isolated samples of vegetable peas

Образец	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Lim (min÷max)	Среднее	bi	↗d2
Масса семян с растения, г									
Неистощимый 195	7,4	8,3	5,2	7,2	9,3	5,2-9,3	7,48	0,54	0,37
Премиум	8,2	9,1	5,3	7,1	10,4	5,3-10,4	8,02	0,70	0,41
Крейсер	5,1	7,1	4,4	7,5	7,5	4,4-7,5	6,32	0,35	1,69
Совинтер	5,3	8,1	5,1	6,8	11,4	5,1-11,4	7,34	0,90	1,12
Триумф	7,2	7,6	2,6	6,5	11,7	2,6-11,6	7,12	1,15	1,45
Дарунок	6,3	6,5	2,7	3,9	9,7	2,7-9,7	5,82	0,98	0,55
Индекс условий (I_j)	-0,64	1,13	-2,87	-1,61	3,98	-	-	-	-
Lim (min÷max)	3,4-9,0	5,3-11,7	2,6-5,3	3,2-7,5	7,5-15,1	-	2,6-15,1	-	-
Среднее	6,5	8,2	4,2	5,5	11,1	-	7,1	-	-
НСР ₀₅	0,78	0,99	0,51	0,66	1,33	-	0,85	-	-
Масса 1000 семян, г									
Неистощимый 195	205	204	195	180	216	195-216	199	0,46	67,64
Премиум	276	284	254	269	312	254-312	279	0,83	57,31
Крейсер	175	205	137	164	220	137-220	180	1,30	91,30
Совинтер	186	219	153	160	248	153-248	193	1,60	73,81
Триумф	272	286	163	153	261	163-286	227	2,21	143,27
Дарунок	174	213	172	182	202	172-213	188	0,55	195,32
Индекс условий (I_j)	3,36	13,99	-28,61	-20,20	31,46	-	-	-	-
Lim (min÷max)	172-276	154-296	134-260	148-269	178-312	-	134-312	-	-
Среднее	207,6	218,2	175,6	184,0	235,7	-	204,2	-	-
НСР ₀₅	24,91	26,18	21,07	22,08	28,28	-	24,51	-	-
Количество семян в бобе, шт.									
Неистощимый 195	6	6	5	5	7	5-7	5,8	0,91	0,16
Премиум	8	9	7	7	9	7-9	8,0	1,05	0,30
Крейсер	6	7	5	6	7	5-7	6,2	0,93	0,12
Совинтер	7	8	6	6	7	6-8	6,8	0,62	0,57
Триумф	5	6	4	5	8	4-8	5,6	1,80	0,07
Дарунок	6	6	5	6	8	5-8	6,2	1,22	0,22
Индекс условий (I_j)	-0,27	0,40	-1,00	-0,33	1,20	-	-	-	-
Lim (min÷max)	4-8	5-9	4-7	4-7	6-9	-	4-9	-	-
Среднее	5,73	6,40	5,00	5,67	7,20	-	6,0	-	-
НСР ₀₅	0,68	0,77	0,60	0,68	0,86	-	0,69	-	-

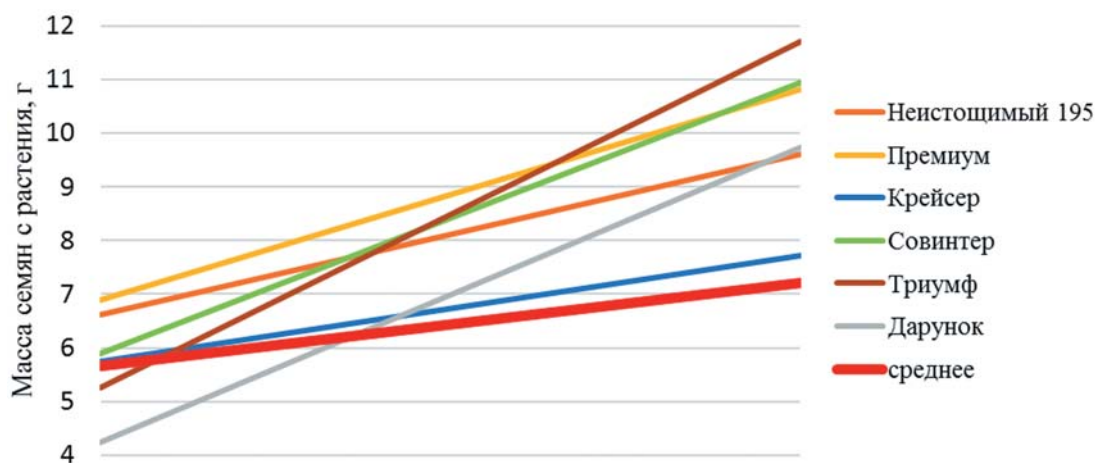


Рис. 4. Линии регрессии выделившихся образцов гороха овощного по массе семян с растения
Fig. 4. Regression lines of the selected samples of vegetable peas by the weight of seeds per plant

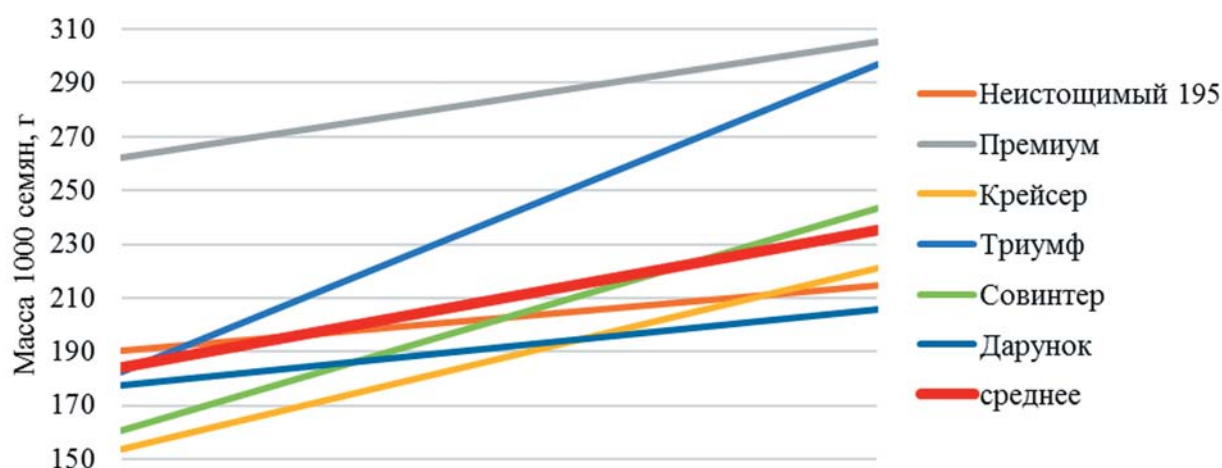


Рис. 5. Линии регрессии выделившихся образцов гороха овощного по массе 1000 семян
Fig. 5. Regression lines of the selected samples of vegetable peas by the weight of 1000 seeds

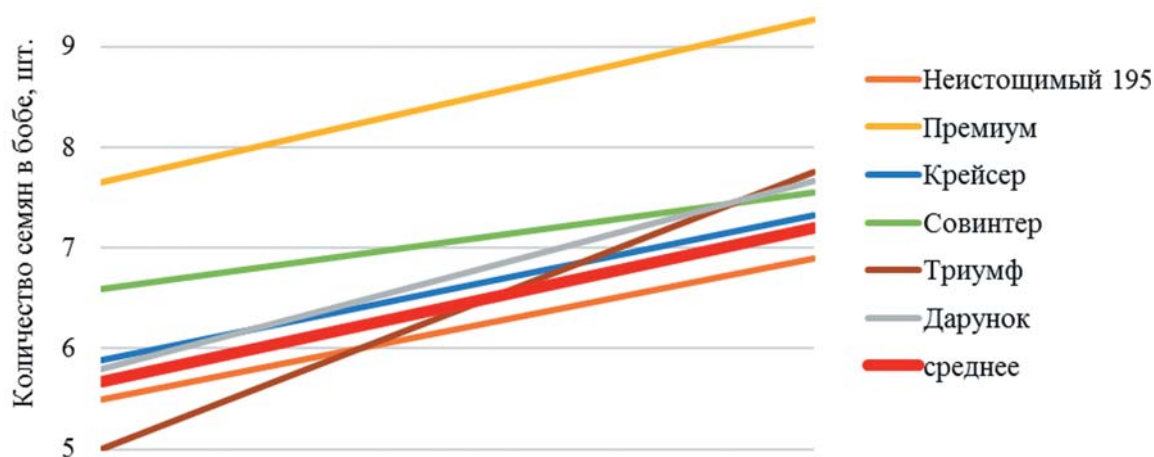


Рис. 6. Линии регрессии выделившихся образцов гороха овощного по числу семян в бобе
Fig. 6. Regression lines of the selected samples of vegetable peas by the number of seeds in the pod

Для производства консервов зеленого горошка рекомендуется использовать сорта со средней (170-200 г) и низкой массой 1000 семян (менее 150 г), сорта с высокой массой 1000 семян больше подходят для заморозки и сублимации [15-17]. Стабильно крупный размер семян имел сорт Премиум (279 г) с низким индексом пластичности ($bi=0,83$), причем, размер семян у него даже в экстремально засушливых условиях 2020 года снижался незначительно (на 58 г или 19%). Стабильно среднюю массу 1000 семян имели образцы: Неистошимый 195 (199 г) и Дарунок (188 г), в стрессовых условиях указанные образцы снижали массу 1000 семян незначительно (на 21-30 г или 10-15%).

Благоприятные условия для формирования количества семян в бобе сложились в 2022 году ($Ij=-1,20$), наиболее стрессовые – в 2020 году ($Ij=-1,00$). К пластичным по числу семян в бобе следует отнести образцы Триумф ($bi=1,80$), Дарунок ($bi=1,22$), Премиум ($bi=1,05$). Эти образцы отзывчивы на улучшение условий выращивания. В благоприятных условиях 2022 года они формировали от 8 до 9 шт. семян в бобе, однако в неблагоприятных условиях число семян существенно снижалось (на 2-4 шт. или 22-50%) и составило в 2020 году 4-7 шт. Стабильными по числу семян в бобе следует считать образцы Крейсер ($bi=0,93$) и Совинтер ($bi=0,62$) со слабой изменчивостью признака по годам (на 1-2 шт. или 14-29%). Остальные образцы показали соответствие изменения признака изменению условий среды.

Угол наклона линий регрессии дает представление о том, как разные генотипы реагируют на изменения условий выращивания по сравнению со средней величиной. Образцы, у которых линии регрессии высоко поднимаются в правой части графика (наиболее благоприятные условия для произрастания) обладают высокой селекционной ценностью, так как это свидетельствует об их высокой отзывчивости. В то же время, в условиях стресса они незначительно снижаются в левой части графика (рис. 4-6). Так, согласно графику, пластичными следует считать образцы: по массе семян с растения – Триумф ($bi=1,15$); по массе 1000 семян – Триумф ($bi=2,21$), Совинтер ($bi=1,60$); по числу семян в бобе – Триумф ($bi=1,80$), Дарунок ($bi=1,22$), Премиум ($bi=1,05$).

Линии регрессии стабильных генотипов характеризуются небольшим углом наклона, что позволяет рассматривать их как наиболее климатически устойчивые. Эти образцы обеспечивают стабильность реализации фенотипических значений признака в разных условиях среды, как благоприятных, так и стрессовых: по семенной продуктивности – Совинтер ($bi=0,90$), Премиум ($bi=0,70$), Неистощимый 195 ($bi=0,54$); по массе 1000 семян – Премиум ($bi=0,83$) с крупными семенами, Неистощимый 195 ($bi=0,46$) и Дарунок ($bi=0,55$), со средним размером семян; по числу семян в бобе – Совинтер ($bi=0,62$).

Выводы

1. Дисперсионным анализом установлено, что наибольшее влияние на формирование признаков масса 1000 семян и количество семян в бобе оказывал генотип (от 57 до 60%), однако по массе семян с растения большее влияние имели условия произрастания (69%), что свидетельствует о большей пластичности данного признака в условиях Западной Сибири и дает возможность выделения ценных генотипов для селекционных программ.

2. Выделены образцы гороха овощного, характеризующиеся высокой пластичностью и отзывчивостью на условия выращивания:

- по массе семян с растения – Триумф ($bi=1,15$);
- по массе 1000 семян – Триумф ($bi=2,21$), Совинтер ($bi=1,60$);
- по числу семян в бобе – Триумф ($bi=1,80$), Дарунок ($bi=1,22$), Премиум ($bi=1,05$).

3. Выделены образцы гороха овощного, имеющие высокую стабильность продуктивности, но характеризующиеся слабой реакцией на улучшение условий среды:

- по массе семян с растения – Совинтер ($bi=0,90$), Премиум ($bi=0,70$), Неистощимый 195 ($bi=0,54$);
- по массе 1000 семян – Премиум ($bi=0,83$) с крупными семенами, Неистощимый 195 ($bi=0,46$) и Дарунок ($bi=0,55$) со средним размером семян;
- по числу семян в бобе – Совинтер ($bi=0,62$).

Литература

1. Вишнякова М.А., Александрова Т.Г., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Егорова Г.П., Семенова Е.В., Сеферова И.В., Суворова Г.Н. Видовое разнообразие коллекции генетических ресурсов зернобобовых вир и его использование в отечественной селекции (Обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(2):109-123. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-2-109-123> <https://www.elibrary.ru/kneohg>
2. Kazydub N., Kuzmina S., Yfimceva S. Leguminous Crops as a Valuable Product in Functional Nutrition. *The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector*. TFFS. 2019:199–203. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.168>
3. Кайгородова И.М., Котляр И.П., Ушаков В.А., Енгальчева И.А., Козарь Е.Г. Приоритетные направления современной селекции гороха овощного (*Pisum sativum* L.). *Овощи России*. 2023;(4):5-12. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-4-5-12> <https://www.elibrary.ru/aegaad>
4. Shanthakumar P., Klepacka J., Bains A., Chawla P., Dhull S.B., Najda A. The Current Situation of Pea Protein and Its Application in the Food Industry. *Molecules*. 2022;27(16):5354. <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>
5. Mudryj A.N., Yu.N., Aukema H.M. Nutritional and health benefits of pulses. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2014;39(11):1197-204. <https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0557>
6. Bobrenko I., Kadermas I., Bobrenko E., Goman N., Drofa O. Carbon dioxide emission estimation in different zones of the south of Western Siberia. Bio web of conferences. *International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology*. 2024:04027. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413004027>
7. Семенова Е.В., Бойко А.П., Новикова Л.Ю., Вишнякова М.А. Фенотипические признаки, определяющие дифференциацию генофонда гороха (*Pisum sativum* L.) по направлениям использования. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022;26(7):599-608. <https://doi.org/10.18699/VJGB-22-74>

<https://www.elibrary.ru/jktgfl>

8. Давлетов Ф.А., Гайнуллина К.П., Магафурова Ф.Ф. Сравнительное изучение хозяйственно-биологических признаков у сортов гороха, созданных в Республике Башкортостан за последние 30 лет. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020;4(84):72-77. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-84-4-72-77>

<https://www.elibrary.ru/skdyfb>

9. Кузьмина С.П., Казыдуб Н.Г., Пендер П.Э. Изучение устойчивости к полеганию у образцов гороха овощного разного морфотипа в условиях Западной Сибири. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2024;(2):74-85. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-71-2-74-85>

<https://www.elibrary.ru/wkrlzr>

10. Омелянюк Л.В., Асанов А.М., Кармазина А.Ю. Доноры признаков структуры стебля в селекции гороха усатого морфотипа для Сибирского региона. *Вестник Омского ГАУ*. 2021;4(44):25-34. https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_25

<https://www.elibrary.ru/tzhypv>

11. Кузьмина С.П., Казыдуб Н.Г., Бендина Я.Б., Балачий В.В. Биопотенциал зернобобовых культур для экологизации растениеводства. *Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации. Collected scientific articles of the VI International scientific conference*. 2018. С. 50-53. <https://www.elibrary.ru/xrmurv>

12. Зыкин В.А., Белан И.А., Юсов В.С., Корнева С.П. Методика расчета параметров экологической пластичности сельскохозяйственных растений по дисциплине «Экологическая генетика». Омск, 2008. 36 с.

13. Gray S.B., Brady S.M. Plant developmental responses to climate change. *Developmental Biology*. 2016;419(1):64-77. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>

14. Путина О.В., Беседин А.Г. Адаптивная способность и стабильность генотипов овощного гороха разных групп спелости. *Овощи России*. 2020;(4):45-49. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-4-45-49> <https://www.elibrary.ru/qyftth>

15. Ушаков В.А., Котляр И.П., Кайгородова И.М. Селекция гороха

овощного для консервной промышленности с мелким размером зерна. *Овощи России*. 2021;(2):5-10.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-2-5-10>

<https://www.elibrary.ru/atmmfj>

16. Пронина Е.П., Котляр И.П., Кайгородова И.М., Ушаков В.А. Направления селекции гороха овощного консервного использования во ВНИИССОК. *Овощи России*. 2014;(4):28-29.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2014-4-28-29>

<https://www.elibrary.ru/tjalap>

17. Кайгородова И.М., Ушаков В.А., Голубкина Н.А., Котляр И.П., Пронина Е.П., Антошкина М.С. Пищевая ценность, качество сырья и продовольственное значение культуры гороха овощного (*Pisum sativum* L.). *Овощи России*. 2022;(3):16-32.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-3-16-32>

<https://www.elibrary.ru/wlxvhj>

• References

1. Vishnyakova M.A., Aleksandrova T.G., Buravtseva T.V., Burlayaeva M.O., Egorova G.P., Semenova E.V., Seferova I.V., Suvorova G.N. Species diversity of the vir collection of grain legume genetic resources and its use in domestic breeding. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2019;180(2):109-123. (In Russ.)

<https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-2-109-123>

<https://www.elibrary.ru/kneohg>

2. Kazydub N., Kuzmina S., Yfimceva S. Leguminous Crops as a Valuable Product in Functional Nutrition. *The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector. Tfts*. 2019:199–203.

<https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.168>

3. Kaigorodova I.M., Kotlyar I.P., Ushakov V.A., Engalycheva I.A., Kozar E.G. Priority directions of modern breeding of vegetable peas (*Pisum sativum* L.). *Vegetable crops of Russia*. 2023;(4):5-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-4-5-12>

<https://www.elibrary.ru/aegaad>

4. Shanthakumar P., Klepacka J., Bains A., Chawla P., Dhull S.B., Najda A. The Current Situation of Pea Protein and Its Application in the Food Industry. *Molecules*. 2022;27(16):5354.

<https://doi.org/10.3390/molecules27165354>

5. Mudryj A.N., Yu.N., Aukema H.M. Nutritional and health benefits of pulses. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2014;39(11):1197-204.

<https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0557>

6. Bobrenko I., Kadermas I., Bobrenko E., Goman N., Drofa O. Carbon dioxide emission estimation in different zones of the south of Western Siberia. Bio web of conferences. *International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology*. 2024:04027.

<https://doi.org/10.1051/bioconf/202413004027>

7. Semenova E.V., Boyko A.P., Novikova L.Y., Vishnyakova M.A. Phenotypic traits differentiating the genetic resources of pea (*Pisum*

sativum L.) by the type of use. *Vavilov journal of genetics and breeding*. 2022;26(7):599-608. (In Russ.) <https://doi.org/10.18699/VJGB-22-74> <https://www.elibrary.ru/jktgfl>

8. Davletov F.A., Gainullina K.P., Magafurova F.F. A Comparative study of economic and biological characters of pea varieties developed in the republic of Bashkortostan over the past 30 years. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;4(84):72-77. (In Russ.)

<https://doi.org/10.37670/2073-0853-2020-84-4-72-77>

<https://www.elibrary.ru/skdyfb>

9. Kuzmina S.P., Kazydub N.G., Pender P.E. Studying resistance to deposition in samples vegetable peas of different morphotype in Western Siberia. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2024;(2):74-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-71-2-74-85> <https://www.elibrary.ru/wkrlzr>

10. Omelyanyuk L.V., Asanov A.M., Karmazina A.Yu. Donors of stem structure features in the selection of the mustachioed morphotype of peas for the Siberian region. *Vestnik Omskogo GAU*. 2021;4(44):25-34. (In Russ.) https://doi.org/10.48136/2222-0364_2021_4_25

<https://www.elibrary.ru/tzhypv>

11. Kuzmina S.P., Kazydub N.G., Bendina Ya.B., Balachiy V.V. Biopotential of grain legumes for greening crop production. Latest research in modern science: experience, traditions, innovations. Collected scientific articles of the VI International scientific conference. 2018. pp. 50-53. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/xrmurv>

12. Zykin V.A., Belan I.A., Yusov V.S., Korneva S.P. Methodology for calculating the parameters of ecological plasticity of agricultural plants in the discipline "Ecological Genetics". Omsk, 2008. 36 p. (In Russ.)

13. Gray S.B., Brady S.M. Plant developmental responses to climate change. *Developmental Biology*. 2016;419(1):64-77.

<https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>

14. Putina O.V., Besedin A.G. Adaptive ability and stability genotypes of vegetable peas of different ripeness groups. *Vegetable crops of Russia*. 2020;(4):45-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-4-45-49> <https://www.elibrary.ru/qyftm>

15. Ushakov V.A., Kotlyar I.P., Kaigorodova I.M. Selection of green peas for the canning industry with a small grain size. *Vegetable crops of Russia*. 2021;(2):5-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-2-5-10> <https://www.elibrary.ru/atmmfj>

16. Pronina E.P., Kotlyar I.P., Kaygorodova I.M., Ushakov V.A. Aspects of breeding in VNISSOK of green pea for canning. *Vegetable crops of Russia*. 2014;(4):28-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2014-4-28-29> <https://www.elibrary.ru/tjalap>

17. Kaigorodova I.M., Ushakov V.A., Golubkina N.A., Kotlyar I.P., Pronina E.P., Antoshkina M.S. Nutritional value, quality of raw materials and food value of vegetable pea culture (*Pisum sativum* L.). *Vegetable crops of Russia*. 2022;(3):16-32. (In Russ.)

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-3-16-32>

<https://www.elibrary.ru/wlxvhj>

Об авторах:

Светлана Петровна Кузьмина – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры агрономии, селекции и семеноводства <https://orcid.org/0000-0002-2256-0434>,

Scopus ID 57196257148, SPIN-код: 8745-1928,

автор для переписки, sp.kuzmina@omgau.org

Нина Григорьевна Казыдуб – доктор с.-х. наук,

профессор кафедры садоводства,

лесного хозяйства и защиты растений,

<https://orcid.org/0000-0002-2234-9647>,

Scopus ID 571962559502,

SPIN-код: 8100-7068, ng.kazydub@omgau.org

Марина Юрьевна Куколева – бакалавр 4 курса кафедры агрономии, селекции и семеноводства, my.kukoleva2112@omgau.org

About the Authors:

Svetlana P. Kuzmina – Cand. Sci. (Agriculture),

Associate Professor of the Department of Agronomy,

Breeding and Seed Production

<https://orcid.org/0000-0002-2256-0434>,

Scopus ID 57196257148,

SPIN-code: 8745-1928, Corresponding Author, sp.kuzmina@omgau.org

Nina G. Kazydub – Dr. Sci. (Agriculture),

Professor of the Department of Horticulture,

Forestry, and Plant Protection,

<https://orcid.org/0000-0002-2234-9647>,

Scopus ID 571962559502, SPIN-code: 8100-7068, ng.kazydub@omgau.org

Marina Yu. Kukoleva – Bachelor of Science in the Department of Agronomy, Breeding, and Seed Production, my.kukoleva2112@omgau.org

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-120-125>
УДК: 635.25/26:631.42(470.311)

М.И. Иванова^{1*},
М.Ю. Маркарова²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал ФГБНУ ФНЦО (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО)
140153, Россия, Московская область,
Раменский район, д. Верея, стр. 500

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр овощеводства" (ФГБНУ ФНЦО)
143072, Россия, Московская область,
Одинцовский район,
п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д.14

*Автор для переписки: ivanova_170@mail.ru

Вклад авторов: Маркарова М.Ю.: концептуализация, методология, верификация данных, создание рукописи и её редактирование, формальный анализ. Иванова М.И.: руководство исследованием, концептуализация, методология, создание рукописи и её редактирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Иванова М.И., Маркарова М.Ю.. Оценка фитопатогенного фона ризосферной зоны некоторых представителей рода *Allium* L. на аллювиальных луговых почвах Москворецкой поймы. *Овощи России*. 2025;(6):120-125.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-120-125>

Поступила в редакцию: 17.09.2025

Принята к печати: 22.10.2025

Опубликована: 18.12.2025

Maria I. Ivanova^{1*},
Maria Yu. Markarova²

¹All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – branch of the FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center"
p. 500, Vereya village,
Ramensky district, Moscow region,
140153, Russia

²Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC)
14, Selektionnaya str., VNISSOK,
Odintsovo region, Moscow district,
143072, Russia

*Corresponding Author: ivanova_170@mail.ru

Authors' Contribution: Markarova M.Yu.: conceptualization, methodology, validation, writing – original draft, formal analysis. Ivanova M.I.: supervision, project administration, conceptualization, methodology, writing – review & editing.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Ivanova M.I., Markarova M.Yu. Assessment of phytopathogenic background of the rhizosphere zone of some representatives of the genus *Allium* L. on alluvial meadow soils of the Moskoretskaya floodplain. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):120-125. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-120-125>

Received: 17.09.2025

Accepted for publication: 22.10.2025

Published: 18.12.2025

Оценка фитопатогенного фона ризосферной зоны некоторых представителей рода *Allium* L. на аллювиальных луговых почвах Москворецкой поймы

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Почвенные патогены могут нанести серьезный ущерб растениям, привести к потерям урожая. Формирование микробных сообществ в ризосфере обусловлено выбором растений-хозяев, Микробиота, ее состав, активность во многом определяются сложной системой микробно-растительного взаимодействия, где индивидуальные особенности растений, их корневые выделения, играют главную роль в формировании патогенного пула. До настоящего времени ризосфера культур *Allium* в значительной степени не изучена, поэтому исследование в области изучения микробного разнообразия при выращивании различных видов и сортов данного вида важны для выявления устойчивых и получения материала для дальнейших генетических исследований по поиску генов устойчивости к различным болезням.

Объекты и методы. Исследование проводили во ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО. Изучено 13 видов рода *Allium*, из коллекции ВНИИО. Оценку фитопатогенного фона ризосферной зоны при выращивании луков осуществляли в середине вегетации с использованием методов почвенной микробиологии.

Результаты. Из исследованных 13 видов *Allium* только под *A. galanthum* отсутствовал фон патогенных микромицетов, поэтому вид может быть перспективным для поиска генов устойчивости к данной группе почвенных патогенов. *A. galanthum* является значимым дикорастущим съедобным видом растений, который играет важную роль в продовольственной безопасности и разведении лука репчатого (*A. cepa*). *A. schoenoprasum*, *A. altynolicum* и *A. sibphorianum* показали высокий уровень устойчивости к бактериальным инфекциям, что может быть важно для поиска соответствующих генов устойчивости. Наибольшее по численности и биоразнообразию патогенной микробиоты отличалась зона ризосферы под луками *A. fistulosum*, *A. pskemense*, *A. tuberosum*. В технологиях их возделывания должны быть предусмотрены усиленные меры по защите от болезней, включающим обработку (дезинфекцию) семян, почвы и вегетирующих растений.

Заключение. *A. galanthum* может быть перспективен для поиска генов устойчивости к грибным болезням лука. *A. schoenoprasum*, *A. altynolicum* и *A. sibphorianum* устойчивы к бактериальным инфекциям, что также может быть использовано для поиска соответствующих генов устойчивости. Виды *A. fistulosum*, *A. pskemense*, *A. tuberosum* отличались наибольшим разнообразием патогенной микробиоты в ризосфере и наименьшей устойчивостью к болезням.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Allium L., ризосфера, фитопатогены, гены устойчивости

Assessment of phytopathogenic background of the rhizosphere zone of some representatives of the genus *Allium* L. on alluvial meadow soils of the Moskoretskaya floodplain

ABSTRACT

Relevance. Soil pathogens can cause serious damage to plants and lead to crop losses. The formation of microbial communities in the rhizosphere is determined by the choice of host plants; the microbiota, its composition, and activity are largely determined by a complex system of microbial-plant interactions, where the individual characteristics of plants and their root secretions play a major role in the formation of the pathogenic pool. Until now, the rhizosphere of *Allium* crops has not been studied to a large extent, so research in the field of studying microbial diversity when growing various species and varieties of this species is important for identifying resistant ones and obtaining material for further genetic research to search for genes of resistance to various diseases.

Materials and Methods. The study was conducted at VNIIO – a branch of the branch of the FSBSI "Federal Scientific Vegetable Center". 13 species of the genus *Allium* from the VNIIO collection were studied. The phytopathogenic background of the rhizosphere zone during onion cultivation was assessed in the middle of the growing season using soil microbiology methods.

Results. Of the 13 *Allium* species studied, only *A. galanthum* had no background of pathogenic micromycetes, so the species may be promising for searching for genes of resistance to pathogenic micromycetes. *A. galanthum* is an important wild edible plant species that plays an important role in food security and cultivation of onions (*A. cepa*). *A. schoenoprasum*, *A. altynolicum* and *A. sibphorianum* showed a high level of resistance to bacterial infections, which may be important for searching for the corresponding resistance genes. The rhizosphere zone under the onions *A. fistulosum*, *A. pskemense*, *A. tuberosum* had the largest number and biodiversity of pathogenic microbiota. The technologies for their cultivation should include measures to protect against diseases, including the treatment (disinfection) of seeds, soil and vegetative plants.

Conclusions. *A. galanthum* may be promising for searching for genes of resistance to fungal diseases of onion. *A. schoenoprasum*, *A. altynolicum* and *A. sibphorianum* are resistant to bacterial infections, which can also be used to search for the corresponding resistance genes. The species *A. fistulosum*, *A. pskemense*, *A. tuberosum* were characterized by the least resistance to diseases.

KEYWORDS:

Allium L., rhizosphere, phytopathogens, resistance genes

Введение

Ризосферная зона растений представляет собой сложную экосистему, состоящую из богатой питательными веществами почвы, которая окружает корни растений и обеспечивает сложные процессы микробно-растительного взаимодействия. Термин «ризомикробиом» определяется как микробное сообщество, присутствующее в ризосфере [1]. В ризосфере обитают различные микроорганизмы, в том числе бактерии, грибы, а также представители микро- и мезофауны [2].

Ризосферные микробные сообщества тесно связаны с корнями растений [3, 4]. Микробиота может быть вредной или полезной для растения-хозяина. Почвенные патогены ухудшают рост растений, вызывают потерю урожая и угрожают сельскохозяйственному производству. В свою очередь, формирование микробных сообществ в ризосфере не является случайным, а скорее обусловлено выбором растений-хозяев [3, 5, 6].

Растения обладают способностью изменять почвенную микробиоту, выделяя биологически активные вещества в ризосферную зону. Различные виды растений могут влиять на состав и структуру микробиома, некоторые виды имеют гораздо более сильную связь с конкретными микроорганизмами, чем другие [7, 8]. Генотип/вид растений и стадии их развития отличаются по качественному и количественному составу экссудатов корней растений [9]. Растение может быть не единственным определяющим фактором в корневом экссудате. Различные абиотические и биотические факторы, такие как тип почвы и патогены, в окружающей среде также влияют на корневые экссудаты [10]. Корневые выделения высвобождаются в ризосферу, где они играют решающую роль в привлечении и отборе микроорганизмов, тем самым изменяя состав и структуру ризосферных микробных сообществ специфичным для растений образом [11]. Растения могут привлекать полезные микробы через сигналы, поступающие от корней растений [12].

Почвенные патогены могут нанести серьезный ущерб растениям, что ведет к значительным потерям урожая сельскохозяйственных культур. Непрерывный рост восприимчивого растения и вспышка болезни часто вызывают подавление отдельных грибных или бактериальных патогенов, передающихся через почву, взаимодействие растения-хозяина и патогена может изменять состав микробиома в целом. Подобные явления, происходят на разных почвах в географически разных регионах, что позволяет предположить, что подавление болезней развивается с помощью сложных экосистемных механизмов [13, 14].

Сукцессия ризосферы растений и взаимодействие патогенов-хозяев и почвенных патогенов могут манипулировать структурой микробиома их ризосферы, а также привлекать/обогащать полезные или антагонистические микроорганизмы для подавления патогенов в ризосфере, что в конечном итоге дает новую возможность подавления корневых болезней и увеличения производства сельскохозяйственных культур [15].

Микробная метагеномика *Allium* L. Большое количество микроорганизмов обитает вокруг, на или в растениях в естественной экосистеме. Взаимодействие микробного сообщества с растениями приводит к стимуляции роста растений различными способами, такими как мобилизация питательных веществ и секреция гормонов роста растений, ферментов, антибиотиков и других полезных соединений [16]. Исследование микробного разнообразия, взаимодействующего

с растениями, специфичными для сельскохозяйственных культур, ограничено, поскольку только небольшой процент микробов может быть культивирован и охарактеризован. Для исследования большого количества микробов можно применять подход метагеномики, поскольку он не зависит от культуры [17]. Подходы метагеномики применяются для изучения значимости некультивируемых микробов, взаимодействующих с различными видами *Allium* [18–22]. Исследование, проведенное Chen et al. (2018) [23], показало, что севооборот *Brassica rapa* subsp. *pekinensis* с *A. cepa* var. *aggregatum* Don. значительно снижает заболеваемость и индекс заболеваемости килой, вызванной *Plasmodiophora brassicae* у капусты пекинской. Снижение заболеваемости наблюдалось из-за сокращения вторичных плазмодиев *Plasmodiophora*. Аналогичное исследование, проведенное Nishioka et al. (2019) [24] показало, что севооборот огурца и смешанное выращивание с видами *Allium* (*A. cepa* и *A. fistulosum*) подавляют фузариозное увядание.

Abdelrahman et al. (2017) [25] выделили сапониновое соединение, называемое аллиоспирозидом А, из моносомных линий *A. fistulosum* и сообщили о его антагонистической активности против *Fusarium*. Стероидные сапонины участвуют в защите растений от различных биотических стрессов.

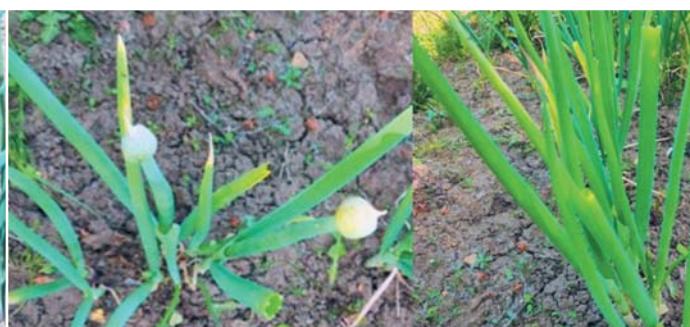
Секвенирование гена 16S рПНК с использованием Illumina MiSeq выявило доминирующее присутствие рода *Flavobacterium*. Преобладание *Flavobacterium* подавляет размножение патогенов в почве [24]. Метагеномное исследование *A. tuberosum* с использованием высокопроизводительного секвенирования гена 16S рПНК с помощью Illumina выявило преобладание микробных сообществ *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Bacteroidetes*, *Cyanobacteria* и *Planctomycetes*, ответственных за потенциальную противогрибную и нематоцидную активность [21].

Метагеномика лукавицы для анализа потенциальных патогенов *A. cepa*, которая была проведена как для больных, так и для здоровых луковиц в условиях хранения, выявила обилие следующих бактериальных и грибных таксонов: *Acinetobacter*, *Burkholderia*, *Citrobacter*, *Enterobacteriaceae*, *Gluconobacter*, *Pseudomonas*, *Botrytis*, *Nectriaceae*, *Penicillium*, *Wickerhamomyces* и *Candida*. Эти таксоны также обильны в здоровой луковице, но присутствие различных ферментеров в больных луковицах предполагает, что ферментеры играют решающую роль в гниении луковицы лука, наряду с абиотическими факторами [18]. Эти исследования подчеркнули значимость метагеномики луковиц.

В будущем метагеномика луков должна быть дополнительно изучена для выявления бактериальных и грибных штаммов, проявляющих бактерицидную, фунгицидную, нематоцидную и стимулирующую рост активность, а также генов и белков для защиты и производства урожая. До настоящего времени ризосфера культур *Allium* в значительной степени не изучена, и подход метагеномики может помочь в обнаружении разнообразия, а также обилия микробов, связанных с корневой системой *Allium* в различных типах почв и климатических условиях.

Условия, объекты и методы исследований

Исследование проводили во ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО. В связи с исследованием и поддержанием зародышевой плазмы в 2014 году создана коллекция *Allium* L. из 12 подвидов, 34 секций, 90 видов *ex situ*: а) семян; б) полевые

Puc. (Fig.) 1. *Allium schoenoprasum*Puc. (Fig.) 2. *Allium sibthorpiatum* Schult. & SchultPuc. (Fig.) 3. *Allium altynolicum*Puc. (Fig.) 4. *Allium galanthum*

«живые» коллекции в количестве более 142 образцов отечественной и иностранной селекции, а также из различных ботанических садов РФ. Изучение и поддержание в живом виде мировой коллекции представителей рода *Allium* L. согласно Методическим указаниям ГНЦ РФ ВИАР (2005) [41]. Некоторые из представителей рода *Allium* L., почву под которыми изучали, представлены на рисунках 1-4.

Почва – аллювиальная луговая, среднесуглинистая, окультуренная, влагоемкая. Глубина пахотного слоя 20-27 см, глубина залегания грунтовых вод более 2,0 м. Наименьшая влагоемкость пахотного слоя почвы 29,5-30,3%, слоя почвы 40-60 см – 30,0-31,3%. Объемная масса верхнего слоя – 1,18-1,22 т/м³, нижележащих слоев – 1,22-1,24 т/м³. Плотность твердой фазы почвы (удельная масса) – 2,58-2,60 т/м³. Скважность почвы оптимальная для сельскохозяйственных культур, колеблется по слоям от 52,1 до 55,0 %, pH солевой вытяжки 5,8-6,01, содержание гумуса в пахотном слое колеблется от 2,71 до 3,34 %, общего азота от 0,19 до 0,24%, нитратного азота 4,21-6,98 мг/100 г, содержание фосфора в почве – 15,27-22,15 мг/100 г, обеспеченность калием – 6,95-12,5 мг/100 г. Гидролитическая кислотность низкая 0,7-0,8 мг-экв./100г, сумма поглощенных оснований средняя 35,65-36,42 мг-экв./100 г, степень насыщенность почвы основаниями высокая 97,82-98,9%.

Оценку фитопатогенного фона ризосферной зоны при выращивании луков осуществляли в середине вегетации с использованием методов почвенной микробиологии. Определение численности и состава доминирующих патогенов провели путем посева почвенных суспензий на селективные агаризованные питательные среды. Учет бактериальной микрофлоры проводили на среде МПА, микромицетов на сусло-агаре и крахмало-аммиачном агаре, актиномицетов на среде Чапека [26-29]. Первичная идентификация бактериальной микробиоты выполнена с использованием

Определителя бактерий Берджи (1997) [30]. Почвенные микромицеты определяли по М.А. Литвинову (1967) [31].

Результаты исследований

Активное выделение корнями растений в окружающую среду различных органических соединений обеспечивает питательными веществами почвенные микроорганизмы, что создает благоприятные условия для их существования в зонах ризосферы – узкой зоны почвы, непосредственно окружающей корни растений. В процессе роста и развития растения выступают как центры формирования микробных сообществ [3, 32]. Для микрофлоры ризосферы характерно наличие грамотрицательных бактерий родов *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Agrobacterium*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Xantomonas* и др., грамположительных бактерий рода *Bacillus*, актинобактерий родов *Nocardia*, *Micromonospora*, *Streptomyces* и др., микроскопических грибов родов *Penicillium*, *Gliocladium*, *Talaromyces*, *Humicola* и др. [3].

В наших исследованиях объектом исследования служили микробные сообщества ризосферной зоны почвы отдельных видов *Allium*. Образцы почвы подсушивали при комнатной температуре и, поместив в стерильный полиэтиленовый пакет, хранили до анализа в холодильнике.

Оценка фитопатогенного фона почвы ризосферной зоны проведена по общей численности потенциальных патогенных микроорганизмов и доминирующим родам (табл.). Такая оценка на стадии селекции перспективных видов рода *Allium* важна для понимания потенциальных рисков для новых сортов и гибридов и подбора средств их защиты во время вегетации и хранения.

Зона ризосферы в наилучшей мере отражает процессы микробно-растительного взаимодействия, здесь сконцентрирован в основном микробный пул, сосуществующий с конкретной овощной культурой. В составе пула присутствуют как полезные, так и вредные для культуры микроорганизмы. Если в составе ризо-

сферного пула есть патогенная микробиота, она потенциально может быть опасной для выращиваемой культуры. То есть образец может быть уязвим к конкретным патогенам, которые выявляются в середине и в конце вегетации в зоне ризосферы. Численные характеристики для патогенов бактериальной и грибной природы отличаются. Бактериальный фон обычно более высок и потенциальный риск заражения растений возникает при численности бактериальных патогенов более 500 тыс. КОЕ/1 г воздушно-сухой почвы (в.с.п). Фон патогенных микромицетов опасен при численности более 10-50 тыс. КОЕ/1 г в.с.п.

В результате проведенной оценки установлено, что для испытанных образцов луков характерна отличающаяся фитопатогенная обстановка, как по численности, так и по составу патогенной микробиоты. Наименьшая и менее опасная для заражения луков численность патогенов (0,2-0,5 млн. КОЕ/1 г в.с.п) в зоне ризосферы была характерна при выращивании следую-

щих видов *Allium*: *A. galanthum*, *A. schoenoprasum* var. *major*, *A. schoenoprasum*, *A. aflatunense*, *A. oliganthum*.

Для ризосферы *A. galanthum* не выявлено рисков развития грибных болезней, то есть потенциал его устойчивости может быть высоким. Численность бактериальных патогенов, способных вызвать бактериальную пятнистость, мокрую бактериальную и сердцевидную гнили, бактериоз, пограничная, что определяет риски только при наступлении благоприятных по конкретному патогену погодных условий. Так, представители рода *Erwinia* (возбудителя мокрой бактериальной и сердцевидной гнили) чаще всего активизируются в условиях переувлажнения в середине периода роста луковиц, что определяет и стратегию подбора мер защиты в соответствии с погодой. В 2024 году погодные условия были неблагоприятными для этого патогена. Патогены этого рода чаще всего переносятся с семенами, а это, в свою очередь, должно учитываться при подготовке семян к посеву данного вида лука.

Таблица. Состав патогенов и потенциальные риски развития болезней при выращивании представителей рода *Allium*
Table. Composition of pathogens and potential risks of disease development when growing representatives of the genus *Allium*

Вид	Общая численность патогенов, млн. КОЕ /1 г воздушно-сухой почвы	Состав патогенов		Риски развития инфекций с учетом состава и численности патогенов в ризосферной зоне
		грибные	бактериальные	
<i>A. fistulosum</i>	1,4	<i>Cladosporium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp., <i>Xanthomonas</i> spp., <i>Pectobacterium</i> spp.	гниль донца, клadosпориоз, бактериальная пятнистость, мокрая бактериальная и сердцевидная гниль, бактериоз
<i>A. pskemense</i>	1,0	<i>Alternaria</i> spp., <i>Botrytis</i> spp., <i>Stemphyllum</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp., <i>Erwinia</i>	альтернариоз, бурая пятнистость, черная гниль, черная плесень, шейковая гниль, мокрая бактериальная и сердцевидная гниль, бактериоз
<i>A. galanthum</i>	0,5	-	<i>Erwinia</i> spp., <i>Xanthomonas</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp.	бактериальная пятнистость, мокрая бактериальная и сердцевидная гниль, бактериоз
<i>A. nutans</i>	1,2	<i>Penicillium</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp., <i>Pectobacterium</i> spp.	зеленая плесень, сердцевидная гниль, бактериоз
<i>A. schoenoprasum</i> var. <i>major</i>	0,4	<i>Cladosporium</i> spp., <i>Botrytis</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp.	кладоспориоз, бурая пятнистость, черная плесень, шейковая гниль, бактериоз
<i>A. schoenoprasum</i>	0,2	<i>Fusarium</i> spp., <i>Aspergillus</i> spp., <i>Alternaria</i> spp.	-	гниль донца, черная ножка, черная плесень, альтернариоз
<i>A. victorialis</i>	0,7	<i>Alternaria</i> spp., <i>Phoma</i> spp., <i>Stemphyllum</i> spp., <i>Penicillium</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp.	альтернариоз, розовая гниль, черная гниль стрелки, пятнистость, зеленая плесень, бактериоз, бактериальная пятнистость
<i>A. aflatunense</i>	0,5	<i>Alternaria</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Penicillium</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> spp., <i>Erwinia</i> spp.	альтернариоз, гниль донца, зеленая плесень, бактериальная пятнистость, мокрая бактериальная и сердцевидная гнили
<i>A. oliganthum</i>	0,4	<i>Alternaria</i> spp., <i>Cladosporium</i> spp.	<i>Erwinia</i> spp.	альтернариоз, клadosпориоз, мокрая бактериальная и сердцевидная гнили
<i>A. altynolicum</i>	2,0	<i>Stemphyllum</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Phoma</i> spp., <i>Penicillium</i> spp.	-	черная гниль стрелки, пятнистость, гниль донца, черная ножка, зеленая плесень
<i>A. sibphorpianum</i>	1,6	<i>Alternaria</i> spp., <i>Penicillium</i> spp.	-	альтернариоз, зеленая плесень
<i>A. prostratum</i>	0,9	<i>Alternaria</i> spp.	<i>Erwinia</i> spp.	альтернариоз, мокрая бактериальная и сердцевидная гнили
<i>A. tuberosum</i>	1,2	<i>Alternaria</i> spp., <i>Pythium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Phoma</i> spp.	<i>Xanthomonas</i> spp., <i>Pectobacterium</i> spp.	альтернариоз, черная ножка

Потенциально устойчивыми к различным бактериозам были *A. schoenoprasum*, *A. altynolicum* и *A. sibphorpanum*. Но для них в разной мере могут быть опасными грибные патогены, среди которых наибольший урон наносит (вызывает гниль донца). Этот патоген активизируется при высокой температуре воздуха, сухости, может сохраняться в почве и часто переносится с секом.

Из рассмотренных видов лука только под *A. galanthum* отсутствовал фон патогенных микромицетов. Этот образец может быть перспективным для поиска генов устойчивости к патогенным микромицетам.

Будучи диким родственником лука репчатого (*A. sera*), *A. galanthum* играет жизненно важную роль в развитии программ селекции лука, в частности, предоставляя ценные генетические ресурсы для улучшения ключевых признаков [33, 34]. Одним из его наиболее значительных вкладов является его способность вызывать цитоплазматическую мужскую стерильность (ЦМС), критический фактор в гибридной селекции лука, что значительно увеличивает производство гибридных семян и повышает продуктивность и качество луковых культур [35]. Этот признак также имеет более широкое применение в гибридной селекции других видов *Allium*, таких как *A. fistulosum* (лук батун) [36], что делает *A. galanthum* ценным ресурсом для улучшения нескольких культур *Allium* [37]. Помимо селекционного применения, *A. galanthum* является важным диким овощем, способствуя продовольственной безопасности [38, 39, 40].

Наибольший по численности и биоразнообразию патогенной микробиоты отличалась зона ризосферы под луками *A. fistulosum*, *A. pskemense*, *A. tuberosum*. Поскольку представите-

ли разных групп и видов патогенов отличаются и предпочтениями к погодным условиям по влажности, температуре, их флуктуациям (перепадам), активизироваться может любой из них в любой из годов выращивания. А это значит, что к вышеуказанным видам при их возделывании должно быть и более пристальное внимание по их защите от болезней, ассортимент фунгицидов должен быть разнообразным, а обработки регулярными и постадийными, то есть включать в себя обработку (дезинфекцию) семян, подготовку почвы, обработку вегетирующих растений, подбор иммуномодуляторов.

Выводы

Из исследованных 13 видов *Allium* только в ризосфере *A. galanthum* не выявлено рисков развития грибных болезней, потенциал его устойчивости может быть высоким, а сам вид перспективным для поиска генов устойчивости. *A. galanthum*, кроме этого, играет важную роль в развитии программ селекции лука, в частности, предоставляя ценные генетические ресурсы для улучшения ключевых признаков данной культуры.

Потенциально устойчивыми к различным бактериозам были *A. schoenoprasum*, *A. altynolicum* и *A. sibphorpanum*, что делает данные виды перспективными для поиска генов устойчивости к бактериозам.

Наибольший по численности и биоразнообразию патогенной микробиоты отличалась зона ризосферы под луками *A. fistulosum*, *A. pskemense*, *A. tuberosum*. В технологиях их возделывания должно быть обращено более пристальное внимание защите от болезней, включающее обработку (дезинфекцию) семян, почвы и вегетирующих растений.

• Литература

- Olanrewaju O.S., Ayangbenro A.S., Glick B.R., Babalola O.O., Ayangbenro A. Plant health: Feedback effect of root exudates-rhizobium interactions. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2019;(103): 1155–1166. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9556-6>
- Venturi V., Keel C. Signaling in the rhizosphere. *Trends Plant Sci.* 2016;(21):187–198. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.005>
- Bulgarelli D., Schlaeppli K., Spaepen S., Ver Loren van Themaat E., Schulze-Lefert P. Structure and function of bacterial microbiota of plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2013;(64):807–838. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120106>
- Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., Kopriva S. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Front Plant Sci.* 2017;(8):1617. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
- Reinhold-Hurek B., Bunker W., Burbano C.S., Sabale M., Hurek T. Roots shaping their microbiome: global hotspots for microbial activity. *Annu Rev Phytopathol.* 2015;53(1):403–24. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102342>
- Agler M.T., Ruhe J., Kroll S., Morhenn C., Kim S.T., Weigel D. Microbial hub taxa link host and abiotic factors to plant microbiome variation. *PLoS Biol.* 2016;14(1):e1002352. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002352>
- Schlaeppli K., Dombrowski N., Oter R.G., Van Themaat E.V.L., Schulze-Lefert P. Quantitative divergence of the bacterial root microbiota in *Arabidopsis thaliana* relatives. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2014;111(2):585–592. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321597111>
- Zgadzaj R., Garrido-Oter R., Jensen D.B., Koprivova A., Schulze-Lefert P., Radutoiu S. Root nodule symbiosis in *Lotus japonicus* drives the establishment of distinctive rhizosphere, root, and nodule bacterial communities. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2016;113(49):E7996–8005. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616564113>
- Tkacz A., Cheema J., Chandra G., Grant A., Poole P.S. Stability and succession of the rhizosphere microbiota depends upon plant type and soil composition. *ISME J.* 2015;9(11):2349–59. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.41>
- Chaparro J.M., Badri D.V., Vivanco J.M. Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development. *ISME J.* 2014;8(4):790–803. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.196>
- Broeckling C.D., Broz A.K., Bergelson J., Manter D.K., Vivanco J.M. Root exudates regulate soil fungal community composition and diversity. *Appl Environ Microbiol.* 2008;74(3):738–744.
- Lareen A., Burton F., Schäfer P. Plant root-microbe communication in shaping root microbiomes. *Plant Mol Biol.* 2016;90(6):575–587. <https://doi.org/10.1007/s11103-015-0417-8>
- Xue C., Penton C.R., Shen Z., Zhang R., Huang Q., Li R. Manipulating the banana rhizosphere microbiome for biological control of Panama disease. *Sci Rep.* 2015;5(1):11124. <https://doi.org/10.1038/srep11124>
- Raaijmakers J.M., Mazzola M. Soil immune responses. *Science.* 2016;352(6292):1392–3. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3252>
- Yin C., Casa Vargas J.M., Schlatter D.C. Rhizosphere community selection reveals bacteria associated with reduced root disease. *Microbiome.* 2021;(9):86. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00997-5>
- Verma J.P., Jaiswal D.K., Krishna R., Prakash S., Yadav J., Singh V. Characterization and screening of thermophilic *Bacillus* strains for developing plant growth promoting consortium from hot spring of Leh and Ladakh Region of India. *Frontiers in Microbiology.* 2018;(9):1293. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01293>
- Krishna R., Ansari W.A., Verma J.P., Singh M. Modern molecular and omics tools for understanding the plant growth-promoting rhizobacteria. In: Role of plant growth promoting microorganisms in sustainable agriculture and nanotechnology. Cambridge: Woodhead Publishing. 2019. P. 39–53.
- Yurgel S.N., Abbey L., Loomer N., Gillis-Madden R., Mammoliti M. Microbial communities associated with storage onion. *Phytobiomes.* 2018;2(1):35–41. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-12-17-0052-R>
- Knerr A.J.N., Wheeler D., Schlatter D., Sharma-Poudyal D., du Toit L.J., Paulitz T.C. Arbuscular mycorrhizal fungal communities in organic and conventional onion crops in the Columbia Basin of the Pacific Northwest United States. *Phytobiomes Journal.*

2018;2(4):194-207.

20. Qiu Z., Li N., Lu X., Zheng Z., Zhang M., Qiao X. Characterization of microbial community structure and metabolic potential using Illumina MiSeq platform during the black garlic processing. *Food Research International*. 2018;(106):428-438.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.081>

21. Huang Y.H. Comparison of rhizosphere and endophytic microbial communities of Chinese leek through high-throughput 16S rRNA gene Illumina sequencing. *Journal of Integrative Agriculture*. 2018;17(2):359-367. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61731-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61731-3)

22. Matthews A., Pierce S., Raymond B. Rhizobacterial community assembly patterns vary between crop species. *Frontiers in Microbiology*. 2019;(10):581.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00581>

23. Chen S., Zhou X., Yu H., Wu F. Root exudates of potato onion are involved in the suppression of clubroot in a Chinese cabbage-potato onion-Chinese cabbage crop rotation. *European Journal of Plant Pathology*. 2018;150(3):765-777.

<https://doi.org/10.1007/s10658-017-1307-5>

24. Nishioka T., Marian M., Kobayashi I., Kobayashi Y., Yamamoto K., Tamaki H., Suga H., Shimizu M. Microbial basis of *Fusarium* wilt suppression by *Allium* cultivation. *Scientific Reports*. 2019;9(1):1715. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37559-7>

25. Abdelrahman M., Elayed M., Sato S., Hirakawa H., Ito S.I., Tanaka K., Shigyo M. RNA-sequencing-based transcriptome and biochemical analyses of steroidal saponin pathway in a complete set of *Allium fistulosum* – *A. cepa* monosomic addition lines. *PLOS ONE*. 2017;12(8):e0181784.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181784>

26. Методы почвенной микробиологии и биохимии. (Под редакцией Д.Г. Звягинцева). М.: Изд-во МГУ. 1991. 302 с.

27. Зенова Г.М., Кураков А.В. Методы определения структуры комплексов почвенных актиномицетов и грибов. М. Изд-во МГУ. 1988. 53 с.

28. Зенова Г.М., Степанов А.Л., Лихачева А.А., Манучарова Н.А. Практикум по биологии почв. М.: Изд-во МГУ, 2002. 120 с.

29. Теппер Е.З., Шильников В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2004. 256 с.

30. Определитель бактерий Берджи. В 2-х томах. Под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. М.: Мир, 1997. Т. 1. 432 с.; Т. 2. 368 с.

31. Литвинов М.А. Определитель микроскопических почвенных грибов. М.: Наука, 1967. 310 с.

32. Добровольская Т.Г. Структура бактериальных сообществ почв. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 282 с.

33. Al-Khayri J.M., Jain S.M., Johnson D.V. (Eds.), *Advances in Plant Breeding strategies: Vegetable crops: Volume 8: bulbs, Roots and Tubers*, Springer International Publishing, Cham. 2021.

34. Manjunathagowda D.C., Muthukumar P., Gopal J., Prakash M., Bommesh J.C., Nagesh G.C., Megharaj K.C., Manjesh G.N., Anjanappa M. Male sterility in onion (*Allium cepa* L.): origin, evolutionary status, and their prospectus. *Genet. Resour. Crop Evol.* 2021;(68):421-439. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-01077-1>

35. Ochar K., Kim S.-H. Conservation and global distribution of onion (*Allium cepa* L.) germplasm for agricultural sustainability. *Plants*. 2023;(12):3294. <https://doi.org/10.3390/plants12183294>

36. Yamashita K., Takatori Y., Tashiro Y. Chromosomal location of a pollen fertility-restoring gene, rf, for CMS in Japanese bunching onion

(*Allium fistulosum* L.) possessing the cytoplasm of *A. galanthum* Kar. et Kir. revealed by genomic in situ hybridization. *Theoretical and Applied Genetics*. 2005;(111):15-22.

<https://doi.org/10.1007/s00122-005-1941-8>

37. Scholten O.E., Van Kaauwen M.P.W., Shahin A., Hendrickx P.M., Keizer L.C.P., Burger K., Van Heusden A.W., Van Der Linden C.G., Vosman B. SNP-markers in *Allium* species to facilitate introgression breeding in onion. *BMC Plant Biol.* 2016;(16):187. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0879-0>

38. Иванова М.И., Бухаров А.Ф., Балеев Д.Н., Бухарова А.Р., Кашлева А.И., Середин Т.М., Разин О.А. Биохимический состав листьев видов *Allium* L. в условиях Московской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2019;33(5):47-50.

<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10511>

<https://elibrary.ru/zndocx>

39. Kadyrbayeva G., Zagórska J., Grzegorzczak A., Gaweł-Bęben K., Strzępek-Gomółka M., Ludwiczuk A., Czech K., Kumar M., Koch W., Malm A., Głowniak K., Sakipova Z., Kukula-Koch W. The Phenolic Compounds Profile and Cosmeceutical Significance of Two Kazakh Species of Onions: *Allium galanthum* and *A. turkestanicum*. *Molecules*. 2021;(26):5491.

<https://doi.org/10.3390/molecules26185491>

40. Wu J., Liu D., Wariss H.M., Zhang H., Su M., Li W., Han Z. Genetic diversity and construction of core collection provides new insight for the conservation of edible *Allium galanthum* in Xinjiang. *Scientia Horticulturae*. 2025;(341):113961.

41. Пережогина В.В. и др. Изучение и поддержание в живом виде мировой коллекции лука и чеснока: методические указания. Санкт-Петербург: ВИР, 2005. 109 с. <https://elibrary.ru/oufnwh>

• References

26. Methods of soil microbiology and biochemistry. (Edited by D.G. Zvyagintsev). Moscow: Moscow State University Press. 1991. 302 p.

27. Zenova G.M., Kurakov A.V. Methods for determining the structure of complexes of soil actinomycetes and fungi. M. Publishing house of Moscow State University. 1988. 53 p.

28. Zenova G.M., Stepanov A.L., Likhacheva A.A., Manucharova N.A. Practical training in soil biology. M.: Moscow State University Publishing House, 2002. 120 p.

29. Tepper E.Z., Shilnikova V.K., Pereverzeva G.I. Microbiology Workshop. M.: Drofa, 2004. 256 p.

30. Identifier of Bergey's bacteria. In 2 volumes. Edited by J. Houtl, N. Krieg, P. Sneath, J. Staley, S. Williams. Moscow: Mir, 1997. Vol. 1. 432 p. Vol. 2. 368 p.

31. Litvinov M.A. Identifier of microscopic soil fungi. Moscow: Nauka, 1967. 310 p.

32. Dobrovolskaya T.G. Structure of bacterial communities of soils. M.: ITC "Akademkniga", 2002. 282 p.

38. Ivanova M.I., Bukharov A.F., Baleev D.N., Bukharova A.R., Kashleva A.I., Seredin T.M., Razin O.A. Biochemical composition of leaves of *Allium* L. species in the conditions of the Moscow region. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2019;33(5):47-50. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10511>

<https://elibrary.ru/zndocx>

41. Perezhogina V.V. Study and maintenance of the world collection of onions and garlic in a living form: guidelines. St. Petersburg: VIR, 2005. 109 p. <https://elibrary.ru/oufnwh>

Об авторах:

Мария Ивановна Иванова – доктор с.-х. наук, проф. РАН,

гл. научный сотрудник,

<https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>,

SPIN-код: 1961-9188, автор для переписки: ivanova_170@mail.ru

Мария Юрьевна Маркарова – кандидат биол. наук,

ведущий научный сотрудник,

<https://orcid.org/00000-0002-7951-2222>,

SPIN-код: 9808-8712, myriam@mail.ru

About the Authors:

Maria I. Ivanova – Dr. Sci. (Agriculture), Prof.,

Senior Researcher,

<https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>,

SPIN-code: 1961-9188, Corresponding Author, ivanova_170@mail.ru

Maria Yu. Markarova – Cand. Sci. (Biology),

Senior Researcher,

<https://orcid.org/00000-0002-7951-2222>,

SPIN-code: 9808-8712, myriam@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-126-137>
УДК: 635.652.2:631.524.821:581.1.043

Е.Г. Козарь*, И.А. Енгальчева

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО) 143072, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИССОК, ул. Селекционная, д.14

*Автор для переписки: kozar_eg@mail.ru

Финансирование. Работа выполнена по Государственному заданию FGGF-2025-0003 «Разработка эффективных технологий предбредингового скрининга и выделения ген-источников для создания сортов и гибридов овощных и бахчевых культур с групповой устойчивостью к доминирующим фитопатогенам на основе иммунологических и молекулярно-генетических методов».

Вклад авторов: Козарь Е.Г., Енгальчева И.А.: концептуализация, методология, проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, ресурсы, визуализация, создание рукописи и ее редактирование.

Благодарности. Выражаем глубокую признательность д.б.н., профессору А.Н. Игнатову за предоставленные для работы бактериальные штаммы и ценные советы, а также к.с.-х. наук А.А. Антошкину за предоставленный семенной материал сортов фасоли овощной и сотрудничество.

Соблюдение этических стандартов. В работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов при написании данной работы.

Для цитирования: Козарь Е.Г., Енгальчева И.А. Влияние разных видов фитопатогенных бактерий на ското- и фотоморфогенез проростков фасоли овощной. *Овощи России*. 2025;(6):126-137. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-126-137>

Поступила в редакцию: 07.10.2025

Принята к печати: 14.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Elena G. Kozar*, Irina A. Engalycheva

FSBSI Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVS)
14, Selektionnaya str., VNISSOK,
Odintsovo region, Moscow district, 143072, Russia

*Corresponding Author: kozar_eg@mail.ru

Funding. The work was carried out under the State Assignment FGF-2025-0003 «Development of a technology for pre-breeding screening and isolation of gene sources for the creation of varieties and hybrids of vegetable and melon crops with group resistance to the effects of phytopathogens based on immunological and molecular genetic methods».

Authors' Contribution: Kozar E.G., Engalycheva I.A.: conceptualization, methodology, investigation, validation, formal analysis, resources, visualization, writing – review & editing.

Acknowledgments. We express our deep gratitude to Professor A.N. Ignatov, Doctor of Biological Sciences, for providing the bacterial strains and valuable advice, as well as to A.A. Antoshkin, Candidate of Agricultural Sciences, for providing the seed material of the bean varieties and for his collaboration

Ethics approval and consent to participate. The work contains no human or animal studies. Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Kozar E.G., Engalycheva I.A. Effects of different phytopathogenic bacteria on the scoto- and photomorphogenesis of vegetable bean seedlings. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):126-137. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-126-137>

Received: 07.10.2025

Accepted for publication: 14.11.2025

Published: 18.12.2025

Влияние разных видов фитопатогенных бактерий на ското- и фотоморфогенез проростков фасоли овощной

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Развитие бактериозов и степень их тяжести определяются комплексным взаимодействием между патогеном, генотипом растения-хозяина и условиями окружающей среды. Освещенность является ключевым абиотическим фактором, модулирующим как физиологические процессы при скотоморфогенезе (в темноте) и фотоморфогенезе (на свету), так и процесс патогенеза. При этом использование этиолированных проростков позволяет выявить специфику проявления вирулентности патогенов, которые могут маскироваться или компенсироваться в условиях световой культуры. Целью данного исследования являлась комплексная оценка влияния различных видов патогенных бактерий на морфобиологические параметры проростков фасоли в зависимости от генотипа сорта и условий освещенности.

Методика. В исследовании были взяты сорта фасоли с различной полевой устойчивостью к бактериозам: Лика, Си Бемоль (СБМ) и Рант. На стадии появления корешка проростки инокулировали суспензиями четырех видов фитопатогенных бактерий: *Dickeya chrysanthemi* (Dc), *Curtobacterium flaccumfaciens* (Cf), *Pseudomonas syringae* (Ps) и *Xanthomonas phaseoli* (Xp). Контроль – стерильная вода. После инокуляции проростки выращивали в пластиковых сосудах со стерильным перлитом в двух режимах: 16-часовой световой день и полная темнота. Через 7 и 14 суток измеряли длину стебля и корневой системы, площадь примордиальных листьев, сырую массу растений, учитывали типы симптомов поражения и степень их выраженности.

Результаты и выводы. Анализ влияния фитопатогенных бактерий на морфогенез проростков фасоли подтвердил, что отмеченные эффекты носят нелинейный характер и определяются специфической комбинацией факторов в триаде «растение-патоген-свет». Сортоспецифичность действия на ростовые процессы проростков свидетельствует о ведущей роли генотипа в устойчивости к бактериальной инвазии. При этом ростовые параметры могут служить ранними индикаторами развития инфекционного процесса. Наибольшую прогностическую ценность имеют показатели массы растения и площади примордиальных листьев. Каждый вид бактерий формировал характерный симптомокомплекс: Ps проявил некротически-токсический тип патогенеза с образованием локальных некрозов и способностью индуцировать хлорозы; Xp – выраженную вариабельность симптоматики в зависимости от генотипа хозяина в виде депрессии развития корневой системы и сосудистых нарушений с образованием некроза жилок; Cf – умеренную агрессивность и способность вызывать компенсаторные реакции у толерантных генотипов с элементами стимуляции ростовых процессов, а Dc – свойства агрессивного сосудистого полифага с выраженной тропностью к апикальным меристемам и молодым листьям, вызывая увядание и гниль верхушки этиолированных проростков фасоли. Модулирующая роль светового режима заключалась в дифференциации стратегий взаимодействия «патоген x растение»: индукция компенсаторных реакций на свету у толерантного сорта Лика, угнетение роста и потенцирование симптомов в темноте у восприимчивого сорта Рант; светозависимые разнонаправленные эффекты у средневосприимчивого сорта СБМ. Выявленная групповая устойчивость к бактериозам делает сорт Лика перспективным для использования в селекционных программах на иммунитет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Phaseolus vulgaris, скотоморфогенез, фотоморфогенез, проростки, световой режим, фитопатогенные бактерии

Effects of different phytopathogenic bacteria on the scoto- and photomorphogenesis of vegetable bean seedlings

ABSTRACT

Relevance. The development of bacterial diseases and their severity are determined by the complex interaction between the pathogen, the host plant genotype, and environmental conditions. Light is a key abiotic factor that modulates both physiological processes during etiolation (in darkness) and photomorphogenesis (in light), as well as the pathogenesis process. Furthermore, the use of etiolated seedlings allows for the identification of the specific virulence expression of pathogens, which may be masked or compensated for under light conditions. The aim of this study was to comprehensively assess the influence of different types of pathogenic bacteria on the morphophysiological parameters of bean seedlings, depending on the cultivar genotype and lighting conditions.

Methodology. Bean varieties with varying field resistance to bacterial diseases were used in the study: Lika, Si Bemol (SBM), and Rant. At the radicle emergence stage, seedlings were inoculated with suspensions of four species of phytopathogenic bacteria: *Dickeya chrysanthemi* (Dc), *Curtobacterium flaccumfaciens* (Cf), *Pseudomonas syringae* (Ps), and *Xanthomonas phaseoli* (Xp). The control was sterile water. After inoculation, seedlings were grown in plastic containers with sterile perlite under two conditions: a 16-hour photoperiod and complete darkness. Stem and root system length, primordial leaf area, and plant fresh weight were measured after 7 and 14 days, and the types of disease symptoms and their severity were recorded.

Results and Conclusions. The analysis of the influence of phytopathogenic bacteria on the morphogenesis of bean seedlings confirmed that the observed effects are non-linear and determined by the specific combination of factors in the "plant-pathogen-light" triad. The cultivar-specific action on seedling growth processes indicates the leading role of genotype in resistance to bacterial invasion. In this context, growth parameters can serve as early indicators of the development of the infectious process. The most prognostically valuable indicators are plant mass and the area of primordial leaves. Each bacterial species formed a characteristic symptom complex: Ps exhibited a necrotic-toxic type of pathogenesis with the formation of localized necrosis and the ability to induce chlorosis; Xp showed pronounced variability in symptomatology depending on the host genotype, manifesting as depression of root system development and vascular disorders with the formation of vein necrosis; Cf displayed moderate aggressiveness and the ability to induce compensatory reactions in tolerant genotypes with elements of growth stimulation; and Dc exhibited properties of an aggressive vascular polyphage with pronounced tropism towards apical meristems and young leaves, causing wilting and rot of the apex of etiolated bean seedlings. The modulating role of the light regime involved the differentiation of "pathogen x plant" interaction strategies: induction of compensatory reactions under light in the tolerant cultivar 'Lika', growth inhibition and potentiation of symptoms in the dark in the susceptible cultivar 'Rant'; and light-dependent, divergent effects in the moderately susceptible cultivar 'Si Bemol'. The identified group resistance to bacterial diseases makes the 'Lika' cultivar promising for use in breeding programs for immunity.

KEYWORDS:

Phaseolus vulgaris, scotomorphogenesis, photomorphogenesis, seedlings, light regime, phytopathogenic bacteria

Введение

Фасоль обыкновенная (*Phaseolus vulgaris* L.) представляет собой важную зернобобовую культуру, продуктивность которой существенно лимитируется бактериальными заболеваниями [1]. Эффективность защиты растений от патогенов определяется комплексным взаимодействием факторов среды, генетических особенностей сорта и патогенных свойств возбудителя. Особый интерес представляет изучение влияния светового режима на развитие патологического процесса, поскольку свет служит ключевым экзогенным фактором, регулирующим физиологические процессы растений, особенно на критических ранних этапах онтогенеза [2, 3]. Прорастание семян и развитие проростков в почве происходят в условиях ограниченной освещенности, что делает ранние стадии онтогенеза чрезвычайно уязвимыми к почвенным патогенам. Выявление патоген-специфических нарушений скотоморфогенеза и фотоморфогенеза позволяет не только расширить фундаментальные представления фитопатологии о механизмах plant-pathogen interactions, но и открывает новые возможности для скрининга устойчивости генотипов на ранних этапах онтогенеза для создания сортов со стабильной резистентностью [4, 5].

Ранние этапы онтогенеза растений, такие как скотоморфогенез и фотоморфогенез, формирование защитных реакций при взаимодействии с патогенами, регулируются сложной сетью взаимосвязанных сигнальных каскадов, интегрирующих эндогенные фитогормональные сигналы и внешние стимулы. Скотоморфогенез, характеризующийся этиоляцией (удлинением hypocotyle, формированием апикальной петли), стратегически направлен на скорейший выход проростка к свету. Эта программа реализуется при ведущей роли гиббереллинов (ГК) и брассиностероидов (БС) [4, 6, 7]. Гиббереллины, активируя рост, поддерживают низкий уровень транскрипционного фактора фотоморфогенеза HY5 (Elongated Hypocotyl 5), а также вызывают деградацию репрессорных белков DELLA [7, 8]. БС индуцируют рост растяжением, регулируя экспрессию генов, участвующих в модификации клеточной стенки, транспорте воды и реорганизации цитоскелета [9, 10]. Эти гормоны, действуя через свои транскрипционные факторы (например, семейств PIF и BZR1/BES1), активируют программы клеточного растяжения и одновременно репрессируют фотоморфогенез, в значительной степени благодаря ключевому репрессору COP1 (Constitutive Photomorphogenesis 1), и транс-факторов семейства PIF (Phytochrome Interacting Factors), инактивирующих регуляторы светового развития (например, HY5) посредством убиквитин-протеасомного пути [11-15].

Воздействие света инициирует один из наиболее сложных этапов онтогенеза перехода от скотоморфогенеза к фотоморфогенезу (процесс деэтиоляции), включающий глубокое перепрограммирование метаболизма клетки, кардинальную перестройку функционирования гормональной системы и значительные изменения морфологии растения [11,12]. Фоторецепторы (фитохромы, криптохромы, фототропины и др.) инициируют сигнальный каскад, приводящий к инактивации COP1 и деградации PIF-белков, что стабилизирует позитивные белки-промоторы фотоморфогенеза, такие как HY5 и DELLA [12, 14, 16]. Накопление DELLA-белков, ингибирующих сигнальный путь ГК, и репрессия активности BZR1/BES1 приводят к торможению роста осевых органов и перераспределению ресурсов в пользу развития фотосинтетического аппарата [13, 9]. Это тормозит чрезмерный рост осевых органов (гипокотиль, стебель), активирует

рост метамерных органов (листья) проростка, запускает биогенез хлоропластов и переход к автотрофному питанию, что сопряжено со сдвигом фитогормонального баланса – снижением роли ГК и БС и увеличением значимости цитокининов (ЦК) и жасмонатов (ЖК) [6, 17-21]. В процессе выпрямления апикальной петли, инициируемого перераспределением градиента гормонов, наряду со светом, активное участие принимают ауксин, этилен и ГК [16, 22, 23]. Свет изменял реализацию программы развития проростков фасоли, определяя скорости и продолжительности роста их отдельных частей (корень, гипокотиль, эпикотиль, лист). При изучении динамики роста и содержания эндогенных гормонов в растениях *Phaseolus vulgaris* L., выращенных в темноте и на свету, отмечена высокая корреляция между изменением биомассы и длины hypocotyle и содержанием ГК при скотоморфогенезе, тогда как в процессе фотоморфогенеза – с содержанием ЦК (зеатина). Длина эпикотыля положительно коррелировала с содержанием ГК в темноте и отрицательно на свету. Ростовые параметры примордиальных листьев в темноте связаны с ауксинами, а на свету – с содержанием ЦК и ГК. При этом деление клеток интенсивнее шло при низком содержании ЦК, тогда как растяжение клеток – при более высоком уровне этих гормонов. Высокие уровни АБК отмечены в периоды интенсивного роста hypocotyle в темноте, а на свету – корней и листьев. У фотосинтезирующих проростков соотношение ауксин/цитокинин в корнях фасоли увеличивалось и снижалось в эпикотылях [5]. То есть, свет выступает не просто источником энергии, но и центральным регуляторным фактором, интегрирующимся с гормональными сетями через сложную систему фоторецепторов и внутриклеточной сигнализации [3, 24].

Аналогичные гормональные модули задействованы и в системе защиты растений от патогенов. Взаимодействие с микроорганизмами сопровождается распознаванием консервативных молекулярных паттернов (MAMP), таких как элиситины фитопатогенных оомицетов [25, 26], фрагменты пектина клеточной стенки [27] или бактериальные пептидогликаны [28]. Эти элиситоры часто активируют сигнальные пути жасмоновой кислоты (ЖК) и этилена, которые, наряду с салициловой кислотой (СК), формируют гормональный каркас защитного ответа [26, 29]. Считается, что жасмонаты обеспечивают защиту от некротрофных патогенов, а салицилаты – от биотрофов, причем в регуляции остановки роста растений в ответ на стресс-зависимую активацию жасмонатного сигналинга участвуют фитохромы, а инактивация PhyB в тени снижает уровень биосинтеза салициловой кислоты. В результате при недостатке света степень пораженности растений био- и некротрофами, как правило, выше [30, 31]. В последнее время большое внимание уделяется роли мощного антиоксиданта растительной клетки – гормона фитомелатонина (ФМТ). Взаимодействуя с другими фитогормонами, он участвует в регуляции разных этапов онтогенеза от прорастания семян и до старения, а также повышает стрессоустойчивость растений [32].

Фитопатогенные бактерии, обладая разнообразным арсеналом факторов вирулентности, способны нарушать нормальное течение морфогенетических программ, в частности, активно используя гидролитические ферменты для проникновения в растительные ткани и получения питательных веществ, а также для целенаправленного воздействия на защитные барьеры растения-хозяина [33, 34]. В ряде исследований выявлено наличие прямой корреляции между уровнем внеклеточной протеолитической активности микроорга-

низмов и интенсивностью развития заболевания у растений [35, 36]. При инфицировании растений некротрофные патогены секретируют различные ферменты, разрушающие целлюлозные и гемицеллюлозные компоненты клеточной стенки [37]. Так, расщепляющая лектин экстрацеллюлярная металлопротеиназа и другие пектаттазы, продуцируемые бактериями рода *Erwinia*, играют важную роль в развитии симптомов заболеваний [38, 39]. С другой стороны, гидролитические ферменты патогенов (пектиназы, целлюлазы, протеиназы), секретируемые для преодоления структурных барьеров растения, также могут функционировать как элиситоры, индуцируя синтез фитоалексинов, фитоантисипинов и других защитных соединений [27, 33]. В ответ растение продуцирует специфические ингибиторы протеиназ и полигалактуроназ, что ограничивает вирулентность патогена и модулирует активность собственных гидролаз, участвующих в перестройках клеточной стенки [34]. При этом, растительные ингибиторы протеиназ, не только подавляют активность ферментов, секретируемых микроорганизмами, но и оказывают угнетающее действие на их рост и развитие [40-42].

Особую группу элиситоров представляют пептидогликаны бактерий, которые распознаются растениями как неспецифические элиситоры и активируют ранние защитные ответы [28]. У грамотрицательных бактерий, к которым относятся многие патогены растений родов *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Ralstonia*, *Erwinia* и *Pantoea*, обнаружена система секреции типа III (T3SS), которая обеспечивает перенос эффекторных белков непосредственно в апопласт или цитоплазму растительной клетки [43-45]. Переносимые таким путем белки-эффекторы, являющиеся продуктами генов авирулентности (Avr), способствуют развитию симптомов у восприимчивых растений, у которых отсутствуют соответствующие гены резистентности (R-гены), и вызывают защитную реакцию устойчивых растений [46].

Растения, которые отвечают на воздействие элиситинов развитием локальной реакции СВЧ или SAR, принадлежат к различным семействам, но ответная реакция у разных таксонов и у разных растений в пределах одного таксона может существенно отличаться [47]. Ключевая роль в индуцировании некрозов в данном случае отводится наличию остатков лизина или валина, а степень и характер проявления SAR-индуцирующей активности элиситинов является результатом комбинации общего поверхностного заряда, специфических остатков лизина и других особенностей их первичной структуры [48]. Патогены рода *Xanthomonas* и *Pseudomonas* демонстрируют избирательную вирулентность, определяемую генетическим фоном хозяина, причем их эффекторные белки могут выступать как элиситорами, так и супрессорами иммунного ответа [46, 44]. В ряде работ также выявлены количественные взаимосвязи между симптомами поражения и ростовыми параметрами растений [21, 24] и влияние бактериальных экзометаболитов с фитогормональной активностью [49, 50].

Таким образом, под влиянием внешних факторов происходит глубокая интеграция регуляторных программ, управляющих развитием и иммунитетом растений. Белки DELLA, выступающие как интеграторы ГК-сигналинга при деэтиоляции, также могут модулировать ответы, зависящие от ЖК [13]. Сигнальные каскады, инициируемые светом и элиситорами, нередко конвергируют на уровне активации перекрывающихся наборов генов, обеспечивая координированную перестройку метаболизма и транскриптома [24, 51]. Это позволяет растению гибко адаптировать свой онтоге-

нез, одновременно оптимизируя рост и формируя эффективную защиту в условиях постоянно меняющейся и часто неблагоприятной среды. Свет может оказывать модулирующее влияние и на патогенные свойства некоторых видов бактерий, которые обладают собственными фоторецепторными системами регуляции экспрессии генов вирулентности. Фотоокислительные процессы в клетках возбудителя могут модифицировать бактериальные метаболиты, изменяя их токсичность для растения-хозяина [3, 51].

Изучение взаимодействия патогенов с этиолированными проростками представляет особый интерес в связи с несколькими аспектами. Во-первых, этиолированные проростки характеризуются особым физиологическим статусом, связанным с энергетическим метаболизмом, основанным исключительно на гетеротрофном питании запасными веществами семени, что позволяет оценить влияние патогенов на базовые метаболические процессы без вмешательства фотосинтеза. Во-вторых, в условиях темноты ингибируется работа фотозащитной и фоторецепторной систем, что делает растения более уязвимыми к патогенной агрессии и позволяет выявить первичные механизмы патогенеза без модулирующего влияния светозависимых защитных реакций. В-третьих, скотоморфогенез представляет собой консервативную программу развития, изучение нарушений которой под действием патогенов позволяет идентифицировать ключевые точки уязвимости в системе морфогенетической регуляции. При этом, определенный интерес представляет сравнительный анализ влияния на ското- и фотоморфогенез проростков разных видов фитопатогенных бактерий, отличающихся типом патологического процесса и специализацией в отношении хозяина, что и явилось целью данных исследований. Поэтому в исследование, кроме наиболее вредоносных возбудителей болезней фасоли из родов *Xanthomonas* и *Pseudomonas*, вызывающих бурый и угловатый бактериозы на листьях и бобах, *Curtobacterium* – бактериальное увядание, был включен и фитопатогенный вид рода *Dickeya*, распространение и агрессивность которого возрастает и расширяется круг поражаемых культур [52-54].

Материал и методы

Исследования были проведены на базе лаборатории молекулярно-иммунологических методов ФГБНУ ФНЦО в лабораторных условиях в серии независимых экспериментов. Материал исследований: сорта фасоли Лика, Си Бемоль (СБМ) и Рант с разной полевой устойчивостью к бактериозам; бактериальные коллекционные типированные штаммы *Dickeya chrysanthemi* (Dc), *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *flaccumfaciens* 3418 (Cf), *Pseudomonas syringae* #3.4 (Ps) и *Xanthomonas phaseoli* #42 (Xp) с разным типом патогенеза, любезно предоставленные доктором биологических наук, профессором А.Н. Игнатовым.

Для работы отбирали внешне здоровые семена без повреждений примерно одинаковой величины, стерилизовали 10% раствором гипохлорита натрия в течение пяти минут, промывали пятикратно стерильной водой и раскладывали в стерильные чашки Петри с тремя слоями увлажненных фильтровальных дисков, проращивали в темноте при температуре 24°C в термостате. На стадии появления первичного корешка отбирали проростки без признаков поражения с длиной корешка 5-10 мм (в зависимости от сорта) и раскладывали по 10 штук в пластиковые прозрачные сосуды объемом 0,6 л на стерильные фильтровальные диски (рис.1).

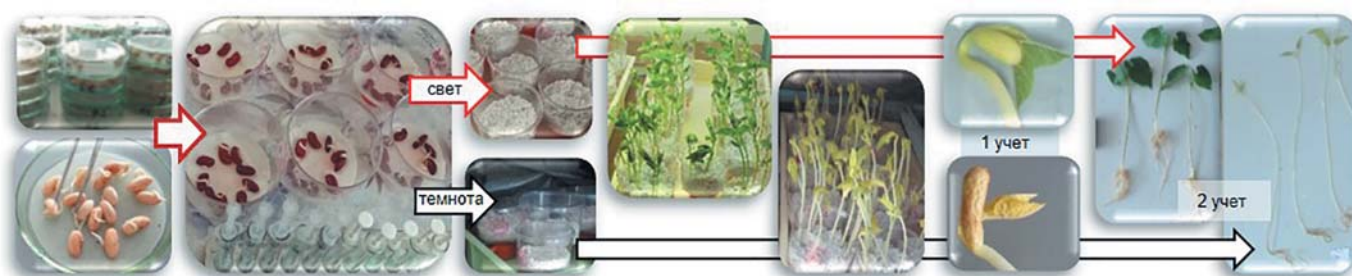


Рис. 1. Общая схема проведения опыта
Fig. 1. General scheme of the experiment

Проростки инокулировали водными суспензиями двухсуточных чистых культур КОЕ 10^9 каждого вида патогенных бактерий полного смачивания семян и фильтровальной подложки (по 10 мл на сосуд). Контроль – обработка стерильной водой. Повторность в каждом варианте трехкратная. После инокуляции проростки закрывали слоем стерильного перлита высотой 10 см, в который дополнительно вносили бактериальную суспензию соответствующего патогена из расчета 15 мл/сосуд и размещали на стеллажах вегетационной камеры с контролируемыми условиями. Далее проростки выращивали при температуре 25–20°C в двух режимах: 16-часовой световой день с досветкой фитолампами и полная темнота (рис. 1). Через 7 суток (1 учет) и 14 суток (2 учет) индивидуально измеряли длину корневой системы и стебля, длину, ширину и площадь примордиальных листьев, сырую массу растений, рассчитывали скорость роста органов (V , мм/сут.), учитывали типы симптомов и степень поражения проростков. Обработку данных проводили методами дисперсионного анализа [54] с использованием программ STATISTICA 12 и MS EXEL 2010.

Результаты исследований

Присутствие фитопатогенного фактора по-разному влияло на скорость роста отдельных органов проростков в зависимости от условий освещенности, генотипа растения-хозяина (сорт) и вида бактерий, определяя особенности прохождения

фото- и скотоморфогенеза на ювенильной стадии развития растений фасоли и скорость роста отдельных органов.

Стебель. Скорость роста этого наиболее чувствительного к воздействию света органа на разных стадиях онтогенеза проростка изменялась и была наиболее высокой у гипокотилей в первую неделю развития проростков до момента начала раскрытия семядолей (рис. 2). В контроле она была сравнима у всех сортов и в среднем составила около 17 мм в сутки на свету и 30 мм/сутки в темноте (в 1,8 раза выше). Под влиянием фитопатогенов скорость удлинения гипокотилей в разных условиях освещения относительно контроля меняется в зависимости от вида возбудителя и устойчивости сорта. При этом реакция проростков на заражение, размах и направленность отмеченных эффектов может существенно отличаться на свету и в темноте. Так, при инокуляции семян средневосприимчивого сорта СБМ *D.chrysantemi* на свету отмечено резкое снижение скорости роста гипокотилей (в 1,3 раза), а в темноте – слабая стимуляция, при заражении *X.phaseoli*, наоборот, ингибирование (в 1,2 раза) у этиолированных при слабой реакции фотосинтезирующих проростков. Достоверное замедление скорости роста (в 1,2 раза) гипокотилей проростков устойчивого сорта Лика отмечено только в темноте при заражении в вариантах с инокуляцией *C.flaccumfaciens* в и *X.phaseoli*. У восприимчивого сорта Рант – слабое ингибирование на свету и существенное в темноте, где скорость удлинения гипокотилей снижалась в 1,4–1,7 раз относительно контроля (рис. 2).

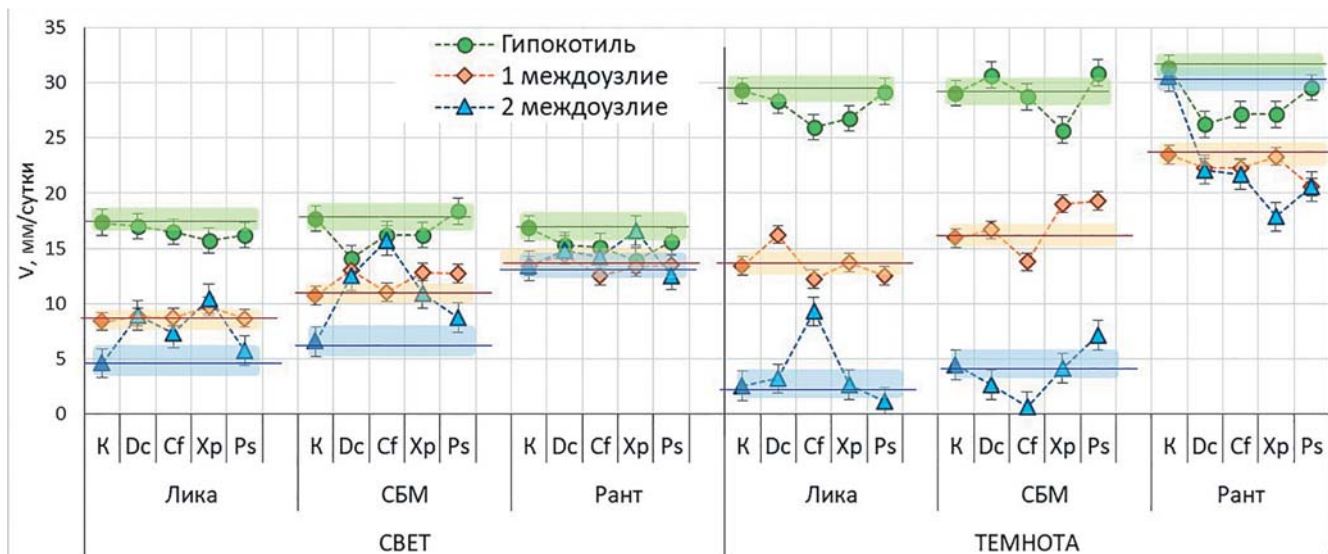


Рис. 2. Скорость роста отдельных частей стебля проростков на свету и в темноте сортов фасоли овощной при инфицировании разными видами фитопатогенных бактерий: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. siringae* (Ps). Контроль – стерильная вода (K). Дополнительные обозначения: сплошная линия – среднее значение скорости роста в контроле, в виде полосы с заливкой цветом указана область пределов отклонения признака в контроле

Fig. 2. Growth rate of individual stem parts of seedlings in the light and in the dark of green bean varieties infected with different types of phytopathogenic bacteria: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. siringae* (Ps). Control – sterile water (K). Additional notations: solid line – average growth rate in the control, filled bar – range of deviation limits for the characteristic in the control

На следующем этапе органогенеза к фазе начала формирования первой пары настоящих листьев скорость роста отдельных частей стебля: от семядолей до примордиальных листьев (первое междоузлие) и от примордиальных листьев до точки роста (второе междоузлие) – у сортов отличалась. В контрольном варианте по величине этого показателя сорта независимо от условий освещения расположились в следующем порядке Лика < СБМ < Рант (рис. 2). Несмотря на это, отмечены общие тенденции в реакции сортов на действие фитопатогенов – менее значимое влияние инфицирования на скорость роста первого междоузлия, особенно на свету, и существенное влияние – на развитие второго междоузлия, развитие которого идет параллельно с развитием листовой пластинки примордиальных листьев. Направленность и величина эффектов воздействия на процессы ското- и фотоморфогенеза проростков в данном случае определяется взаимоотношением участников патосистемы «растение-возбудитель», то есть устойчивостью сорта и агрессивностью вида патогена (вклад их взаимодействия в общую величину изменчивости признака составляла около 30%).

Скорость роста второго междоузлия на фоне освещения под влиянием большинства фитопатогенов (кроме *P. syringae*) у более устойчивых проростков увеличивалась – у сорта Лика в 1,2-2,3 раза и сорта СБМ – в 1,3-2,4 раза при нейтральной реакции восприимчивого сорта Рант. В то же время, у этиолированных проростков восприимчивого сорта Рант отмечено сильное ингибирование роста этого участка стебля со снижением скорости в 1,4-1,7 раза. У двух других сортов в темноте выявлена качественно противоположная реакция проростков, особенно на заражение *C. flaccumfaciens* и *P. syringae*. Это снижение скорости роста в шесть раз у сорта СБМ и стимуляция в четыре раза у сорта Лика при инокуляции *C. flaccumfaciens* и, наоборот, при инокуляции *P. syringae* у сорта СБМ наблюдали стимуляцию (в 1,6 раза) и уменьшение скорости роста у проростков сорта Лика (в 2,3 раза). Влияние *D. chrysantemi* и *X. phaseoli* в данном варианте опыта у этих сортов было менее значимым.

Примордиальные листья. При изучении развития примордиальных листьев измеряли длину и ширину листовой пластинки. Как видно на рисунке 3, в контроле по скорости роста листовой пластинки на свету в обоих направлениях сорта расположились в следующем порядке Лика < Рант < СБМ. У этиолированных проростков скорость удлинения листьев относительно фотосинтезирующих проростков в контроле снижается в 1,6-1,9 раза, а скорость роста в ширину – в 1,8-2,1 раза в зависимости от теневыносливости сорта.

В этом отношении можно выделить сорт СБМ, у которого фитопатогенные бактерии по-разному изменяли скорость развития примордиальных листьев проростков в зависимости от варианта опыта. У данного сорта все виды бактерий вызывали депрессию, снижая скорость роста листовой пластинки в длину в 1,1-1,2 раза на свету и в 1,2-1,7 раза в темноте. Скорость роста листьев в ширину на свету мало отличалась от контроля, а в темноте снижалась в 1,2-1,4 раза, кроме варианта с *X. phaseoli* (рис. 2). У сорта Рант также в основном отмечали депрессию роста листьев в длину во всех вариантах заражения (в 1,1-1,3 раза), но в отношении роста в ширину значимое снижение скорости регистрировали только при инфицировании с *X. phaseoli*. У проростков устойчивого сорта Лика, наоборот, *X. phaseoli* на свету вызывал небольшое ускорение роста листьев в длину, а при заражении другими видами бактерий отклонения от контроля по изучаемым параметрам были не существенны.

Корневая система. По скорости роста основного корешка в контроле сорта расположились аналогично (Лика < Рант < СБМ), как при оценке развития примордиальных листьев. При этом у этиолированных проростков она снижалась в 1,2 раза у сорта Лика, в 1,3 раза у сорта СБМ и в 1,4 раза у сорта Рант (рис. 4А). Отсутствие света отрицательно сказалось и на формирование вторичных корешков и корневых волосков, то есть на степень (балл) развития корневой системы в целом. У этиолированных проростков

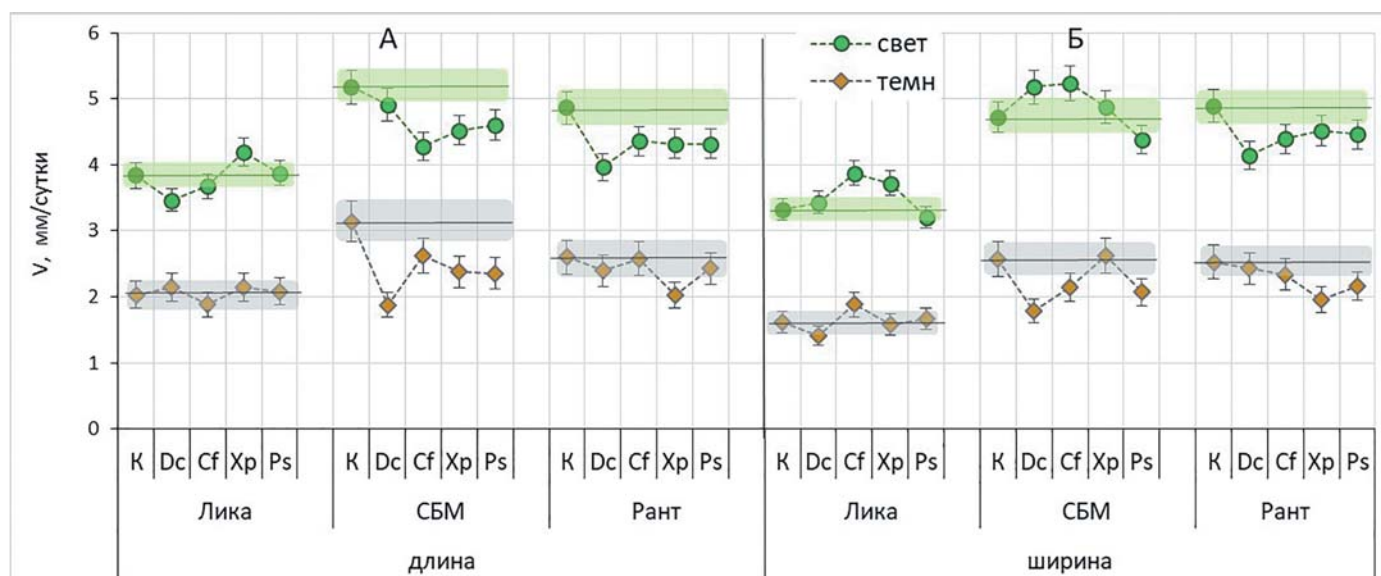


Рис. 3. Скорость роста в длину (А) и ширину (Б) примордиальных листьев проростков сортов фасоли овощной на свету и в темноте при инфицировании разными видами фитопатогенных бактерий: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps). Контроль – стерильная вода (K). Дополнительные обозначения: сплошная линия – среднее значение скорости роста в контроле, цветом указана область пределов отклонения признака в контроле

Fig. 3. Growth rate in length (A) and width (B) of primordial leaves of seedlings of green bean varieties in the light and in the dark when infected with different types of phytopathogenic bacteria: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps). Control – sterile water (K). Additional notations: solid line – average growth rate in the control, color indicates the range of deviation limits for the trait in the control

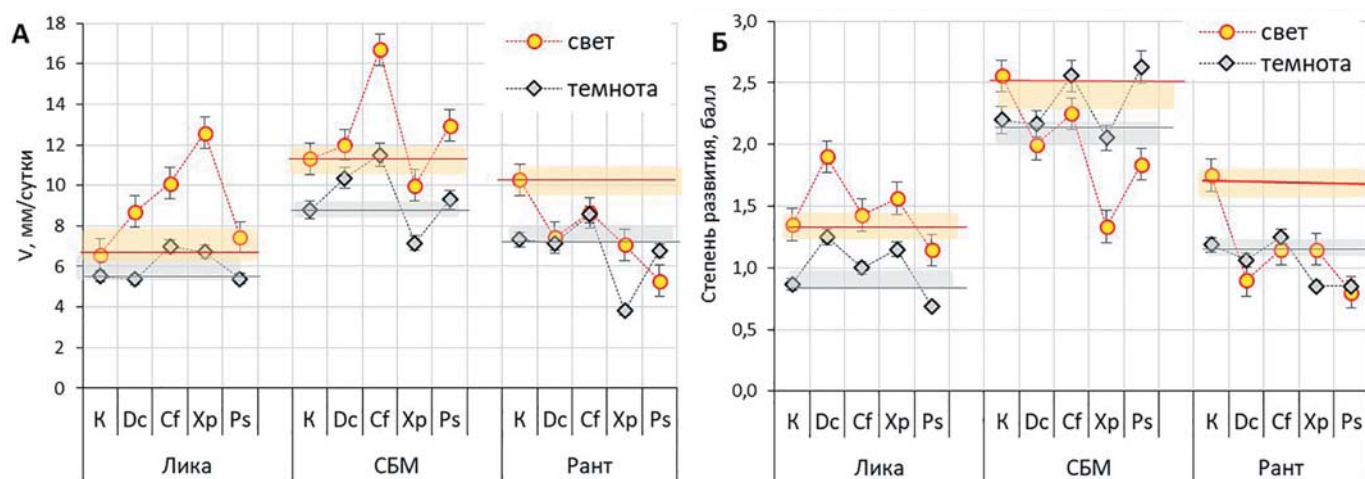


Рис. 4. Скорость роста (А) и степень развития (Б) корневой системы проростков сортов фасоли овощной на свету и в темноте при инфицировании разными видами фитопатогенных бактерий: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps). Контроль – стерильная вода (К). Дополнительные обозначения: сплошная линия – среднее значение скорости роста в контроле, цветом указана область пределов отклонения признака в контроле

Fig. 4. Growth rate (A) and degree of development (B) of the root system of seedlings of green bean varieties in the light and in the dark when infected with different types of phytopathogenic bacteria: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps). Control – sterile water (K). Additional notations: solid line – average growth rate in the control, color indicates the range of deviation limits for the characteristic in the control

в контроле балл развития в среднем на 0,5 балла был ниже, чем у фотосинтезирующих проростков (рис. 4Б). Заражение проростков *C. flaccumfaciens* и *X. phaseoli* у сорта Лика способствовало ускорению роста корешка относительно контроля и на свету (в 1,5-1,9 раза), и в темноте (1,2-1,3 раза), а у сорта СБМ – только при заражении *C. flaccumfaciens* (в 1,5 и 1,3 раза соответственно). В то же время *X. phaseoli* ингибировал рост корешка проростков СБМ во всех вариантах. На сорте Рант все виды бактерий оказывали негативное действие на развитие корневой системы фотосинтезирующих проростков, снижая скорость роста корешка в 1,1-2,0 раза относительно контроля. У этилированных проростков этого сорта депрессию роста корешка (в 1,9 раза) отмечали только при заражении *X. phaseoli*, а при инокуляции бактериями вида *C.*

flaccumfaciens – стимулирующий эффект с увеличением в 1,3 раза скорости роста относительно контроля (рис. 4А).

Отличалось влияние разных видов бактерий и на степень развития корневой системы в процессе фото- и скотоморфогенеза проростков сортов фасоли овощной. У фотосинтезирующих проростков восприимчивого сорта Лика и средне-восприимчивого сорта СБМ отмечено негативное влияние всех видов возбудителей, тогда как этилированные проростки реагировали иначе. Это отсутствие депрессии развития корневой системы относительно контроля в вариантах с заражением *D. chrysantemi* и *X. phaseoli* у сорта СБМ, а также *D. chrysantemi* и *C. flaccumfaciens* у сорта Лика; стимуляцию формирования вторичной корневой системы у сорта СБМ при заражении *C. flaccumfaciens* и *P. syringae*; тогда как у этилированных проростков сорта Лика – ингиби-

Таблица 1. Влияние разных видов фитопатогенных бактерий на параметры фотосинтезирующих (свет) и этилированных (темнота) проростков сортов фасоли овощной на 14 сутки развития после заражения в условиях *in vitro*
Table 1. The influence of different types of phytopathogenic bacteria on the parameters of photosynthetic (light) and etiolated (darkness) seedlings of green bean varieties on the 14th day of development after infection *in vitro*

Вариант опыта, сорт, вид бактерий	Длина корня, см		Длина стебля, см		Площадь примордиального листа, см ²		Сырая масса проростка, г	
	свет	темнота	свет	темнота	свет	темнота	свет	темнота
сорт Лика								
Контроль	9,2	7,7	21,2	31,7	19,7	5,1	2,3	1,7
<i>D. chrysantemi</i>	12,2	7,5	24,3	33,5	18,3	3,8	2,7	2,2
<i>C. flaccumfaciens</i>	14,1	9,8	22,9	33,3	21,9	5,5	3,0	2,4
<i>X. phaseoli</i>	17,6	9,4	25,1	30,2	24,1	5,4	2,5	2,1
<i>P. syringae</i>	10,4	7,6	21,4	30,0	19,3	5,4	2,5	2,3
HCP ₀₅	4,1	1,4	2,1	2,0	2,9	0,3	0,3	0,3
сорт СБМ								
КОНТРОЛЬ	11,3	12,3	24,5	34,6	37,7	12,6	5,2	5,6
<i>D. chrysantemi</i>	12,0	14,5	27,8	35,0	39,2	5,2	7,0	5,0
<i>C. flaccumfaciens</i>	16,7	16,1	28,0	30,2	34,9	8,7	8,3	5,0
<i>X. phaseoli</i>	10,0	10,0	28,0	34,2	34,0	9,6	5,9	5,4
<i>P. syringae</i>	13,0	13,0	27,9	40,1	31,1	7,5	5,2	5,8
HCP ₀₅	3,1	2,3	1,9	4,4	3,9	3,2	1,6	0,4
сорт Рант								
КОНТРОЛЬ	10,3	10,3	30,6	59,8	36,6	10,1	4,1	4,7
<i>D. chrysantemi</i>	10,4	10,0	31,2	49,5	25,3	9,0	3,9	5,3
<i>C. flaccumfaciens</i>	12,1	12,0	29,3	49,8	29,4	9,3	4,0	4,6
<i>X. phaseoli</i>	9,9	5,3	30,7	47,8	30,1	6,1	4,2	4,1
<i>P. syringae</i>	7,4	9,5	29,2	49,5	29,7	8,1	3,9	4,0
HCP ₀₅	2,1	3,1	1,1	6,0	5,0	1,9	0,2	0,5

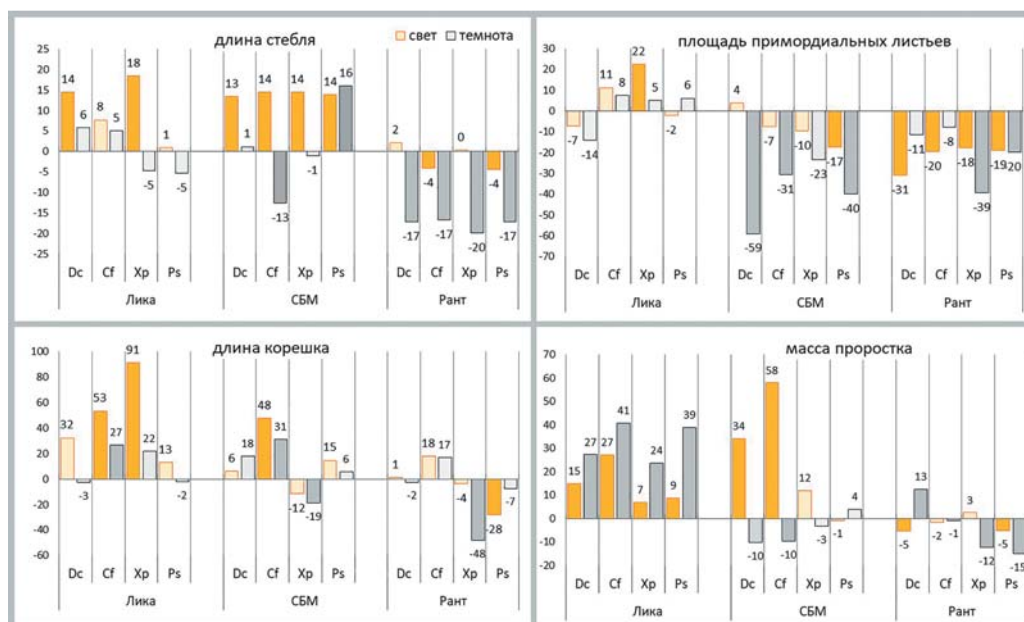


Рис. 5. Эффекты действия (ЭД,%) фитопатогенных бактерий на ростовые процессы инфицированных проростков сортов фасоли овощной при выращивании на свету и в темноте. Виды бактерий: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps). Дополнительные обозначения: цифрами указана величина ЭД в каждом варианте опыта; интенсивным цветом выделены столбцы ЭД с достоверным отклонением от контроля ($p > 0.05$)

Fig. 5. Effects of action (ED,%) of phytopathogenic bacteria on the growth processes of infected seedlings of green bean varieties grown in the light and in the dark. Bacterial species: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps). Additional notations: the numbers indicate the ED value in each experimental variant; ED columns with a significant deviation from the control ($p > 0.05$) are highlighted in intense color

рование при заражении *X. phaseoli* и *P. syringae*. В отличие от этих сортов, реакция проростков устойчивого сорта Лика была схожей на свету и в темноте. Отмечена стимуляция развития корневой системы под влиянием *D. chrysantemi* и *X. phaseoli*, нейтральная реакция на заражение *C. flaccumfaciens* и незначительное ингибирование в присутствии *P. syringae* (рис. 4Б).

Сравнение эффектов действия (ЭД). Итоговую оценку и анализ эффектов действия различных видов фитопатогенных бактерий на фото- и скотоморфогенез фасоли овощной при заражении на ювенильной стадии развития проводили по результирующим показателям следующих признаков: общая длина стебля, площадь примордиальных листьев, длина корня и сырая масса проростков в конце эксперимента (табл. 1). Эффекты действия выражали как процент отклонения значений изучаемых параметров в опытных вариантах от контроля, что позволяет проводить сопоставление реакций проростков разных по устойчивости сортов фасоли овощной на заражение фитопатогенами в зависимости от условий выращивания (рис. 5). Вариабельность изучаемых признаков в повторностях была достаточно высокой ($V > 20\%$), несмотря на тщательный подбор анализируемого исходного растительного материала. Поэтому при сравнительном анализе в основном учитывали ЭД, величины которых указывают на достоверность отмеченных отклонений ($p > 0.05$, на диаграммах выделены более интенсивным цветом).

Полученные результаты выявили следующие общие тенденции сортоспецифичности ЭД фитопатогенных бактерий на ростовые процессы, обусловленные устойчивостью сортов. У проростков устойчивого сорта Лика – это отсутствие депрессии или стимуляция роста осевых органов и примордиальных листьев; у восприимчивого сорта Рант – значительное ингибирование роста стебля в темноте (ЭД = -17...-20%) и развития примордиальных листьев на свету (ЭД =

18...-31%) при заражении всеми видами возбудителей, а у средневосприимчивого сорта СБМ – стимулирование роста стебля на свету (ЭД = +14%) и сильная депрессия развития примордиальных листьев в темноте (ЭД = -23...-59%) (рис. 5).

Отмечены также существенные отличия в сортовой реакции на заражение по такому интегральному показателю, как сырая биомасса проростка. У сорта Лика наблюдали увеличение биомассы зараженных проростков относительно контроля на 7-41%, причем это было более выражено у этиолированных проростков во всех вариантах. У менее устойчивых сортов величина ЭД зависела от вида фитопатогена, при этом часто меняла свою направленность в зависимости от условий освещения проростков. Так, у фотосинтезирующих проростков сорта СБМ при заражении *D. chrysantemi* и *C. flaccumfaciens* масса увеличивалась на 14% и 58%, а у этиолированных проростков снижалась на 10% относительно контролей. В то же время, у сорта Рант отмечена более слабая, но противоположная реакция проростков на свету и в темноте на заражение *D. chrysantemi* (ЭД = -5% и ЭД = +13% соответственно), а *C. flaccumfaciens* вообще не влияла на массу проростков. В вариантах с заражением *X. phaseoli* и *P. syringae* существенное снижение массы отмечено только у этиолированных проростков сорта Рант (ЭД = -12...-15%). У проростков сорта СБМ реакция была нейтральной (рис. 5).

Симптомы поражения. При искусственной инокуляции растений возбудителями бактериозов не всегда приводит к появлению типичных симптомов поражения, характерных для каждого вида возбудителя, особенно на ювенильной стадии развития. В нашем эксперименте были отмечены следующие основные типы симптомов: некротический стрик гипокотили и некрозы на жилках примордиальных листьев, которые на свету часто сопровождалось появлением хлоротичных зон вокруг пораженного участка (рис. 6). При этом, появления стрика на стебле, по-видимому, является резуль-



Рис. 6. Примеры проявления симптомов некротического стрика гипокотыля на свету (А1) и в темноте (А2) и некроза жилок примордиальных листьев (Б) фотосинтезирующих проростков фасоли овощной при искусственном заражении фитопатогенами
Fig. 6. Examples of the manifestation of symptoms of necrotic streak of hypocotyl in the light (A1) and in the dark (A2) and necrosis of veins of primordial leaves (B) of photosynthetic seedlings of green beans under artificial infection with phytopathogens

татом неспецифической сортовой реакции на условия выращивания в перлите. Он был отмечен только у проростков сортов Лика и СБМ, в том числе и в контрольных вариантах. Отсутствие света способствовало усилению его проявления, особенно у сорта Лика, у которого в контроле доля проростков с этим симптомом в темноте достигала 42% и 5% на свету. Присутствие возбудителей в темноте способствовало снижению этого показателя до 10-25%, а на свету, наоборот, его повышению до 14-20% в зависимости от вида бактерии. У сорта СБМ стрик стебля был выражен значительно слабее и отмечен только в темноте, где в контроле симптом проявился у 7% этиолированных проростков и достигал 33% в варианте при заражении *C. flaccumfaciens*.

Некрозы вдоль жилок примордиальных листьев были наиболее четко выражены у фотосинтезирующих проростков, у которых вокруг некротических участков затем появлялась зона хлороза, в отличие от этиолированных проростков. Между степенью развития пожилкового некроза прослеживалась обратная взаимосвязь с устойчивостью сортов к бактериальной инфекции (табл. 2). На основании этого этот симптом можно рассматривать как реакцию

сверхчувствительности (СВЧ) на системное распространение патогенов по сосудистой системе проростков. Признаки некротизации жилок были отмечены у 24-52% проростков устойчивого сорта Лика, у 5-47% проростков средневосприимчивого сорта СБМ, а у восприимчивого сорта Рант – у 0-10% проростков в зависимости от вида возбудителя. При этом сорт Лика проявил более высокую чувствительность в отношении *P. syringae* (R=7%), а сорт СБМ – в отношении *D. chrysantemi* (R=12%).

У проростков сорта Рант при слабом развитии некроза жилок отмечено значительное увеличение зоны хлороза, особенно в ответ на заражение *X. phaseoli* (R=2%), что может свидетельствовать о начале инфицирования патогеном тканей паренхимы листовой пластинки отдельных проростков. В отличие от этого сорта, у проростков более устойчивых сортов при заражении *X. phaseoli* признаков хлороза не регистрировали (табл.2). После проведения учета биометрических параметров и переноса этиолированных проростков на свет регистрировали появление признаков увядания примордиальных листьев, а затем некротизацию и на пятые сутки загнивание верхней части проростков (рис. 7).

Таблица 2. Развитие симптомов поражения на примордиальных листьях фотосинтезирующих проростков фасоли при искусственном заражении *in vitro* разными видами фитопатогенных бактерий
Table 2. Development of damage symptoms on primordial leaves of photosynthetic bean seedlings during artificial *in vitro* infection with different types of phytopathogenic bacteria

Показатель	Проявление симптомов поражения проростков сортов возбудителями											
	сорт Лика				сорт СБМ				сорт Рант			
	Dc	Cf	Xp	Ps	Dc	Cf	Xp	Ps	Dc	Cf	Xp	Ps
некроз жилок												
P, %	35	24	33	52	47	22	5	10	10	0	10	0
I, балл	0,4	0,3	0,4	0,6	1,0	0,8	0,3	0,4	0,2	0,0	0,1	0,0
R, %	3,5	1,7	3,0	7,4	11,8	4,1	0,4	0,9	0,5	0,0	0,3	0,0
хлороз												
P, %	10	4	0	19	16	14	0	10	10	0	15	0
I, балл	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,3	0,2	0,0	0,5	0,0
R, %	0,3	0,2	0,0	0,5	0,4	0,7	0,0	0,6	0,5	0,0	1,9	0,0

Виды бактерий: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps)



Рис. 7. Примеры проявления симптомов увядания примордиальных листьев, некротизации и гнили верхней части этилированных проростков фасоли овощной при искусственном заражении фитопатогенами после переноса на свет
Fig. 7. Examples of symptoms of wilting of primordial leaves, necrosis and rot of the upper part of etiolated green bean sprouts during artificial infection with phytopathogens after transfer to light

Как видно из данных таблицы 3, высокая распространенность признака увядания у всех сортов была отмечена при заражении *D. chrysantemi* (P=49-75%) с высокими индексами поражения у сортов СБМ и Рант (>3 баллов). Причем у сорта СБМ в данном варианте доля проростков с некрозом и загниванием верхушки к концу эксперимента достигла 79%, в отличие от сортов Лика (P=0%) и Рант (P=11%). При заражении другими видами бактерий характер проявления этих симптомов имел более выраженную сортовую специфику. В варианте с *C. flaccumfaciens* у сорта СБМ также отмечали высокий процент проростков с признаками некроза верхушки (P=68%) при низкой степени развития увядания (R=5%); у сорта Лика эти показатели составили P=29% и R=19%, а у сорта Рант – соответственно P=11% и R=16%.

При заражении *X. phaseoli* у сорта Рант отмечен наименьший индекс поражения (0,8 балла) при высокой распространенности увядания (P=75%), у сорта СБМ степень увядания листьев была более интенсивной (2,1 балла), но доля таких проростков была в два раза ниже. По возрастанию показателя распространенности симптома некроза верхней

части проростка в вариантах с *X. phaseoli* сорта расположились в следующем порядке: Лика < Рант < СБМ, но иначе при заражении *P. syringae*: Рант < СБМ < Лика, хотя средний балл увядания листьев был более высоким у сорта Рант (табл. 3).

Заключение

Проведенное исследование подтвердило сложный характер взаимодействия между сортовыми особенностями фасоли, вирулентностью бактериальных патогенов и условиями освещенности, определяющими специфику развития симптомов и ростовых ответов растения. Анализ экспериментальных данных демонстрирует, что патогены способны существенно нарушать программу нормального развития растений, причем характер этих нарушений имеет специфические особенности в зависимости от условий освещенности. В условиях темноты наблюдали выраженную дисрегуляцию типичных этиоляционных процессов: у восприимчивых сортов (СБМ, Рант) отмечается значительное подавление характерного для скотоморфогенеза удлинения гипокот-

Таблица 3. Развитие симптомов увядания примордиальных листьев и поражения верхней части проростка этилированных проростков фасоли при искусственном заражении *in vitro* разными видами фитопатогенных бактерий
Table 3. Development of symptoms of primordial leaf wilting and damage to the upper part of the sprout of etiolated bean sprouts during artificial infection *in vitro* with different types of phytopathogenic bacteria

Показатель	Проявление симптомов поражения проростков видами бактерий											
	сорт Лика				сорт СБМ				сорт Рант			
	Dc	Cf	Xp	Ps	Dc	Cf	Xp	Ps	Dc	Cf	Xp	Ps
увядание												
P, %	64	56	49	57	49	15	38	35	75	35	75	35
I, балл	0,6	1,4	1,0	1,2	3,1	1,4	2,1	1,0	3,2	1,8	0,8	1,8
R, %	9,6	19,5	12,3	14,3	36,8	5,3	19,8	8,8	60,0	15,8	15,0	15,8
некроз и загнивание верхней части												
P, %	0	29	19	33	79	68	57	28	11	10	30	0

Виды бактерий: *D. chrysantemi* (Dc), *C. flaccumfaciens* (Cf), *X. phaseoli* (Xp), *P. syringae* (Ps).

тия, нарушение апикального доминирования и аномальное развитие корневой системы. На свету патогены индуцировали нарушения фотоморфогенетических программ, включая изменение пропорций роста отдельных органов, ингибирование роста листовых пластинок примордиальных листьев. Активность патогенов в условиях темноты имеет качественные отличия от их воздействия на свету. В условиях света наблюдается менее выраженное развитие симптомов у большинства комбинаций сорт × патоген. Вероятно, это связано с регуляторными функциями фоторецепторов и активацией светозависимых защитных механизмов, например, сигнальных путей салициловой кислоты, жасмонатов и этилена. Активный фотосинтез также обеспечивает энергетическую и метаболическую основу активной защиты, активизацию синтеза фенольных веществ, лигнина, фитоалексинов.

В темноте происходит значительное усиление патогенеза. Например, штамм *X. phaseoli*, отличился избирательной вирулентностью, определяемую генетическим фоном хозяина, вызывал сосудистые нарушения и некрозом жилок листа. Он проявил высокую агрессивность именно в отношении этиолированных проростков, особенно восприимчивого сорта Рант, вызывая угнетение корневой системы на 49%, тогда как на свету этот эффект выражен значительно слабее. Штамм *P. syringae* в большей степени проявил некротически-токсический тип взаимодействия, индуцируя точечные некрозы и системный хлороз листьев, при этом умеренная взаимосвязь с ростовыми параметрами проростков может свидетельствовать о доминировании токсических эффектов над структурными повреждениями. В отличие от этих видов, штамм *C. flaccumfaciens* проявил умеренную агрессивность с элементами стимуляции ростовых процессов, меньшей выраженностью некротических симптомов и был способен вызывать компенсаторные реакции на свету не только у толерантных генотипов. Впервые было показано, что вид *D. chrysantemi* проявляет высокоагрессивные свойства в отношении проростков фасоли овощной, вызывает их системное поражение с выраженной тканной тропностью к апикальным меристемам и молодым листьям,

нарушение водного обмена и увядание. В условиях темноты этот патоген может индуцировать тяжелые формы поражения и гибель этиолированных проростков в результате некротизации и загнивания точки роста (гниль верхушки могла достигать 89%).

То есть, ростовые реакции этиолированных и фотосинтезирующих проростков, различия в симптоматике и степени их поражения, обусловлены взаимодействием светосигнальных путей и системой гормональной регуляции иммунного ответа растений, что определяется генотипом растения-хозяина (сортоспецифично). Так, у проростков восприимчивого сорта Рант отмечено угнетение роста всех органов и усиление симптомов в темноте; у средневосприимчивого сорта СБМ – выраженные светозависимые разнонаправленные эффекты при заражении большинством видов бактерий. Сорт Лика показал высокую толерантность к бактериальной инвазии, что проявлялось в минимальном угнетении или компенсаторной стимуляции некоторых параметров (рост корня на свету). Это указывает на наличие у данного генотипа эффективных механизмов резистентности. Стимуляция ростовых процессов при умеренном развитии инфекции у проростков устойчивого сорта Лика можно связать с патоген-индуцированной гормональной перестройкой его метаболизма на свету в сторону синтеза защитных соединений. Групповая устойчивость к бактериозам делает сорт Лика перспективным для использования в селекционных программах на иммунитет.

В заключении важно отметить необходимость дальнейших исследований молекулярных механизмов взаимодействия световых и гормональных сигнальных путей в формировании иммунного ответа. Перспективным направлением является также изучение спектра вторичных метаболитов патогенов в различных световых условиях и их влияния на гормональный статус растения-хозяина. Эти исследования будут способствовать разработке новых стратегий защиты растений, основанных на модуляции светового режима и гормонального статуса для усиления естественной устойчивости сельскохозяйственных культур.

• Литература

1. Кефели В.И. Действие света на рост и морфогенез высших растений. М.: Наука; 1975. С. 209-227.
2. Josse E.M., Halliday K.J. Skotomorphogenesis: The dark side of light signalling. *Curr. Biol.* 2008;18(24):R1144-R1154. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.10.034>
3. Вологовский И.Д., Суховеева С.В., Кабачевская Е.М. Биофизические механизмы внутриклеточной сигнализации (трансдукции) в высших растениях. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук.* 2023;68(1):75-88. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-75-88> <https://www.elibrary.ru/qugpez>
4. Seluzicki A., Burko Y., Chory J. Dancing in the dark: darkness as a signal in plants. *Plant Cell Environ.* 2017;40(11):2487-2501. <https://doi.org/10.1111/pce.13033>
5. Golovatskaya I.F., Karnachuk R.A. Dynamics of growth and the content of endogenous phytohormones during kidney bean scoto- and photomorphogenesis. *Russian Journal of Plant Physiology.* 2007;54(3):407-413.
6. Bai M.Y., Shang J.X., Oh E., et al. Brassinosteroid, gibberellin and phytochrome impinge on a common transcription module in Arabidopsis. *Nat. Cell Biol.* 2012;14(8):810-817. <https://doi.org/10.1038/ncb2546>
7. Gupta R., Chakrabarty S.K. Gibberellic acid in plant. Still a mystery unresolved. *Plant Signal. Behav.* 2013;8(9):e25504. <https://doi.org/10.4161/psb.25504>
8. Daviere J.M., Achard P. Gibberellin signaling in plants. *Development.* 2013;140(6):1147-1151. <https://doi.org/10.1242/dev.087650>
9. Liang T., Mei S., Shi C., et al. UVR8 interacts with BES1 and BIM1 to regulate transcription and photomorphogenesis in Arabidopsis. *Dev. Cell.* 2018;44(4):512-523. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2017.12.028>
10. Yu X., Li L., Zola J., et al. A brassinosteroid transcriptional network revealed by genome-wide identification of BES1 target genes in Arabidopsis thaliana. *Plant.* 2011;65(4):634-646. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04449.x>
11. Alabadi D., Blázquez M.A. Integration of light and hormone signals. *Plant Signal. Behav.* 2008;3(7):448-450. <https://doi.org/10.4161/psb.3.7.5678>
12. Кузнецова В.В., Дорошенко А.С., Кудрякова Н.В., Данилова М.Н. Роль фитогормонов и света в процессе деэтиоляции. *Физиология растений.* 2020;67(6):563-577. <https://doi.org/10.31857/S0015330320060093> <https://www.elibrary.ru/xnllq>
13. Jaillais Y., Vert G. Brassinosteroids, gibberellins and light-mediated signalling are the three-way controls of plant sprouting. *Nat. Cell Biol.* 2012;14(8):788. <https://doi.org/10.1038/ncb2554>
14. Sineshchekov V., Koppel L. Cryptochrome 1 in the dark affects

- phytochrome A in etiolated *Arabidopsis* seedlings shifting the balance between its native types, phyA' and phyA". *Protoplasma*. 2025;4:1-9. <https://doi.org/10.1007/s00709-024-01983-4>
15. Sharma A., Sharma B., Hayes S., et al. UVR8 disrupts stabilisation of PIF5 by COP1 to inhibit plant stem elongation in sunlight. *Nat. Commun.* 2019;10:4417. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12369-1>.
 16. Achard P., Liao L., Jiang C., et al. DELLA Contribute to plant photomorphogenesis. *Plant Physiol.* 2007;143(3):1163-1172. <https://doi.org/10.1104/pp.106.092155>
 17. Lochmanová G., Zdráhal Z., Konečná H., et al. Cytokinin-induced photomorphogenesis in dark-grown *Arabidopsis*: a proteomic analysis. *J. Exp. Bot.* 2008;59(13):3705-3719. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern219>
 18. Cortleven A., Ehret S., Schmölling T., Johansson H. Ethylene-independent promotion of photomorphogenesis in the dark by cytokinin requires COP1 and the CDD complex. *J. Exp. Bot.* 2019;70(1):165-178. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery351>
 19. Chin-Atkins A.N., Craig S., Hocart C.H., Dennis E.S., Chaudhury A.M. Increased endogenous cytokinin in the *Arabidopsis* ampl mutant corresponds with de-etiolation responses. *Planta*. 1996;198(4):549-556. <https://doi.org/10.1007/BF00262643>
 20. Cortleven A., Ehret S., Schmölling T., Johansson H. Ethylene-independent promotion of photomorphogenesis in the dark by cytokinin requires COP1 and the CDD complex. *J. Exp. Bot.* 2019;70(1):165-178. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery351>
 21. Ивлева Л.В., Головацкая И.Ф., Леонов В.П. Особенности развития органов растений фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.) в условиях освещения и темноты. *Биометрика-2000*. https://biometrika-tomsk.ru/biom-2000/iv_leo4.htm
 22. Zádňíková P., Wabnik K., Abuzeineh A., et al. A model of differential growth-guided apical hook formation in plants. *Plant Cell*. 2016;28(10):2464-2477. <https://doi.org/10.1105/tpc.15.00569>
 23. An F., Zhang X., Zhu Z., et al. Coordinated regulation of apical hook development by gibberellins and ethylene in etiolated *Arabidopsis* seedlings. *Cell Res*. 2012;22(5):915-927. <https://doi.org/10.1038/cr.2012.29>
 24. Князева Т.В. Регуляторы роста растений в Краснодарском крае: монография. Краснодар: ЭДВИ; 2013. 128 с. ISBN 978-5-901957-94-3.
 25. Щербаклова Л.А., Джавахия В.Г., Duan Y., Zhang J. Микробные белки – элиситоры устойчивости растений к фитопатогенам и их потенциал для экологически ориентированной защиты сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственная биология*. 2023;58(5):789-820. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.5.789rus> <https://www.elibrary.ru/civlxb>
 26. Keller H., Bonnet P., Galiana E., et al. Salicylic acid mediates elicitor-induced systemic acquired resistance, but not necrosis in tobacco. *MPMI*. 1996;9(8):696-703. <https://doi.org/10.1094/MPMI-9-0696>
 27. Ferrari S., Savatin D.V., Sicilia F., et al. Oligogalacturonides: plant damage-associated molecular patterns and regulators of growth and development. *Front. Plant Sci.* 2013;4:49. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00049>
 28. Gust A.A., Biswas R., Lenz H.D., et al. Bacteria-derived peptidoglycans constitute pathogen-associated molecular patterns triggering innate immunity in *Arabidopsis*. *J. Biol. Chem.* 2007;282(44):32338-32348. <https://doi.org/10.1074/jbc.M704886200>
 29. Васюкова Н.И., Озерецковская О.Л. Жасмонат-зависимая защитная сигнализация в тканях растений. *Физиология растений*. 2009;56(5):643-653. <https://www.elibrary.ru/kwicwf>
 30. Войцеховская О.В. Фитохромы и другие (фото)рецепторы информации у растений. *Физиология растений*. 2019;66(3):163-177. <https://doi.org/10.1134/S0015330319030151> <https://www.elibrary.ru/zbqqqx>
 31. Шевлягина О.Ф., Коробков В.В. Особенности роста этиолированных проростков в аспекте реализации донорно-акцепторных отношений. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2019;19(2):170-176. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-2-170-176> <https://www.elibrary.ru/vjgemx>
 32. Кузнецов В.В., Бычков И.А., Кудрякова Н.В. Фитомелатонин как элемент гормональной системы растений. *Физиология растений*. 2024;71(4):377-397. <https://doi.org/10.31857/S0015330324040012> <https://www.elibrary.ru/mojikn>
 33. Мосолов В.В., Валуева Т.А. Участие протеолитических ферментов во взаимодействии растений с фитопатогенными микроорганизмами. *Биохимия*. 2006;71(8):1034-1042. <https://www.elibrary.ru/opotcp>
 34. Яруллина Л.Г., Ахатова А.Р., Касимова Р.И. Гидролитические ферменты и их белковые ингибиторы в регуляции взаимоотношений растений с патогенами (обзор). *Физиология растений*. 2016;63(2):205-217. <https://doi.org/10.7868/S0015330316020159> <https://www.elibrary.ru/vinzcf>
 35. Кудрявцева Н.Н., Софьин А.В., Ревина Т.А., Гвоздева Е.Л., Иевлева Е.В., Валуева Т.А. Секретия протеолитических ферментов тремя фитопатогенными микроорганизмами. *Прикл. биохимия и микробиология*. 2013;49(5):513-521. <https://doi.org/10.7868/S0555109913050073> <https://www.elibrary.ru/qmgewj>
 36. Valencia-Jimenez A., Arboleda V., Grossi de Sa M.F. Activity of α -amylase inhibitors from *Phaseolus coccineus* on digestive α -amylases of the coffee berry borer. *J. Agric. Food Chem.* 2008;56(7):2315-2320. <https://doi.org/10.1021/jf0732882>
 37. Van den Brink J., de Vries R.P. Fungal enzyme sets for plant polysaccharide degradation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2011;91(6):1477-1492. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3473-2>
 38. Feng T., Nyffenegger C., Hojrup P., et al. Characterization of an extension-modifying metalloprotease: N-terminal processing and substrate cleavage pattern of *Pectobacterium carotovorum* Prt1. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2014;98(24):10077-10089. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5771-y>
 39. Manjurul Haque Md., Tsuyumu S. Virulence, resistance to magainin II, and expression of pectate lyase are controlled by the PhoP-PhoQ two-component regulatory system responding to pH and magnesium in *Erwinia chrysanthemi* 3937. *J. Gen. Plant Pathol.* 2005;71(1):47-50. <https://doi.org/10.1007/s10327-004-0158-z>
 40. Ибрагимов Р.И., Яруллина Л.Г., Шпирная И.А., Умаров И.А., Цветков В.О., Максимов И.В. Биохимические факторы развития устойчивости растений к патогенам. *Соврем. наукоемкие технологии*. 2010;4:46-48. <https://www.elibrary.ru/lspuuz>
 41. Gomes M.T.R., Oliva M.L., Lopes M.T.P., Salas C.E. Plant proteinases and inhibitors: an overview of biological function and pharmacological activity. *Curr. Protein Pept. Sci.* 2011;12(5):417-436. <https://doi.org/10.2174/138920311796391125>
 42. Volpicella M., Leoni C., Costanza A., et al. Cystatins, serpins and other families of protease inhibitors in plants. *Curr. Protein Pept. Sci.* 2011;12(5):386-398. <https://doi.org/10.2174/138920311796391113>
 43. Alfano J.R., Collmer A. Type III secretion system effector proteins: double agents in bacterial disease and plant defense. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2004;42:385-414. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040103.110731>
 44. Facincani A.P., Moreira L.M., Soares M.R., et al. Comparative proteomic analysis reveals that T3SS, Tfp, and xanthan gum are key factors in initial stages of *Citrus sinensis* infection by *Xanthomonas citri* subsp. *citri*. *Funct. Integr. Genomics*. 2014;14(1):205-217. <https://doi.org/10.1007/s10142-013-0346-z>
 45. Gazil A., Sarris P.F., Fadoulglou V.E., et al. Phylogenetic analysis of a gene cluster encoding an additional, rhizobial-like type III secretion system that is narrowly distributed among *Pseudomonas syringae* strains. *BMC Microbiol.* 2012;12:188. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-12-188>
 46. Abramovitch R., Martin G. Strategies used by bacterial pathogens to suppress plant defenses. *Curr. Opin. Plant Biol.* 2004;7(4):356-364. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.05.002>

47. Qutob D., Huitema E., Gijzen M., Kamoun S. Variation in structure and activity among elicitors from *Phytophthora sojae*. *Mol. Plant Pathol.* 2003;4(2):119-124. <https://doi.org/10.1046/j.1364-3703.2003.00158.x>
48. Noman A., Aqeel M., Irshad M.K., et al. Elicitins as molecular weapons against pathogens: consolidated biotechnological strategy for enhancing plant growth. *Crit. Rev. Biotechnol.* 2020;40(6):821-832. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1779174>
49. Cernadas R.A., Benedetti C.E. Role of auxin and gibberellin in citrus canker development and in the transcriptional control of cell-wall remodeling genes modulated by *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*. *Plant Sci.* 2009;177(3):190-195. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.05.006>
50. McClerklin S.A., Lee S.G., Harper C.P., et al. Indole-3-acetaldehyde dehydrogenase-dependent auxin synthesis contributes to virulence of *Pseudomonas syringae* strain DC3000. *PLoS Pathog.* 2018;14(1):e1006811. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006811>
51. Чесноков Ю.В. Устойчивость растений к патогенам. *Сельскохозяйственная биология.* 2007;42(1):16-35. <https://www.elibrary.ru/hypgcf>
52. Игнатов А.Н. Распространение возбудителей опасных бактериозов растений в Российской Федерации. *Защита картофеля.* 2014;2:53-57. <https://www.elibrary.ru/tmmlff>
53. Osdaghi E. *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *flaccumfaciens* (bacterial wilt of dry beans). *CABI Compendium.* 2022. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.15333>
54. Игнатов А.Н., Лазарев А.М., Панычева Ю.С., Проворов Н.А., Чеботарь В.К. Бактериальные патогены картофеля рода *Dickeya*: мини-обзор по систематике и этиологии заболеваний. *Сельскохозяйственная биология.* 2018;53(1):123-131. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.1.123rus> <https://www.elibrary.ru/ytjoiq>
55. Доспехов Б.А. Методика опытного дела. М.: Колос; 1985.
25. Shcherbakova L.A., Dzhavakhiya V.G., Duan Y., Zhang J. Microbial proteins as elicitors of plant resistance to pathogens and their potential for eco-friendly crop protection in sustainable agriculture (review). *Agricultural biology.* 2023;58(5):789-820. (in Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.5.789rus> <https://www.elibrary.ru/civlxb>
29. Vasyukova N.I., Ozeretskoykaya O.L. Jasmonate-dependent defense signaling in plant tissues. *Fiziologiya rastenij.* 2009;56(5):643-653. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/kwicwf>
30. Voitsekhevskaya O.V. Phytochromes and other (photo)receptors of information in plants. *Fiziologiya rastenij.* 2019;66(3):163-177. (in Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0015330319030151> <https://www.elibrary.ru/zbqqqx>
31. Shevlyagina O.F., Korobko V.V. Some features of growth of etiolated plants in the aspect of implementation of donor-acceptor relations. *Izvestiya of Saratov university. New series. Series: chemistry. biology. ecology.* 2019;19(2):170-176. (in Russ.) <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-2-170-176> <https://www.elibrary.ru/vjgemx>
32. Kuznetsov V.V., Bychkov I.A., Kudryakova N.V. Phytomelatonin as an element of the plant hormonal system. *Fiziologiya rastenij.* 2024;71(4):377-397. (in Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0015330324040012> <https://www.elibrary.ru/mojikn>
33. Mosolov V.V., Valueva T.A. Involvement of proteolytic enzymes in plant interaction with phytopathogenic microorganisms. *Biokhimiya.* 2006;71(8):1034-1042. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/opotcp>
34. Yarullina L.G., Akhatova A.R., Kasimova R.I. Hydrolytic enzymes and their protein inhibitors in the regulation of plant-pathogen interactions (review). *Fiziologiya rastenij.* 2016;63(2):205-217. (in Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0015330316020159> <https://www.elibrary.ru/vinzcf>
35. Kudryavtseva N.N., Sof'in A.V., Revina T.A., Gvozdeva E.L., levleva E.V., Valueva T.A. Secretion of proteolytic enzymes by three phytopathogenic microorganisms. *Applied biochemistry and microbiology.* 2013;49(5):513-521. (in Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0555109913050073> <https://www.elibrary.ru/qmgewj>
40. Ibragimov R.I., Yarullina L.G., Shpirnaya I.A., Umarov I.A., Tsvetkov V.O., Maksimov I.V. Biochemical factors of plant resistance development to pathogens. *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii* 2010;4:46-48. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/lspuuz>
51. Chesnokov Yu.V. Plant resistance to pathogens. *Agricultural biology.* 2007;42(1):16-35. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/hypgcf>
52. Ignatov A.N. Distribution of dangerous bacterial plant disease pathogens in the Russian Federation. *Zashchita Kartofelya.* 2014;2:53-57. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/tmmlff>
54. Ignatov A.N., Lazarev A.M., Panycheva Yu.S., Provorov N.A., Chebotar' V.K. Potato phytopathogens of genus *Dickeya* – a mini review of systematics and etiology of diseases. *Agricultural biology.* 2018;53(1):123-131. (in Russ.) 2018;53(1):123-131. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.1.123rus> <https://www.elibrary.ru/ytjoiq>
55. Dospekhov B.A. Methodology of experimental work. Moscow: Kolos; 1985. (in Russ.)

• References

1. Kefeli V.I. The effect of light on the growth and morphogenesis of higher plants. Moscow: Nauka; 1975. P. 209-227. (in Russ.)
3. Volotovskii I.D., Sukhaveyeva S.V., Kabachevskaya E.M. Biophysical mechanisms of intracellular signaling (transduction) in higher plants. *Proceedings of the National academy of sciences of Belarus. biological series.* 2023;68(1):75-88. (in Russ.) 2023;68(1):75-88. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-75-88> <https://www.elibrary.ru/qugepz>
12. Kuznetsova V.V., Doroshenko A.S., Kudryakova N.V., Danilova M.N. The role of phytohormones and light in the de-etiolation process. *Fiziologiya rastenij.* 2020;67(6):563-577. (in Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0015330320060093> <https://www.elibrary.ru/xnliq>
21. Ivleva L.V., Golovatskaya I.F., Leonov V.P. Features of the development of bean plant organs (*Phaseolus vulgaris* L.) in conditions of light and darkness. *Biometrika-2000.* Available from: https://biometrika-tomsk.ru/biom-2000/iv_leo4.htm (in Russ.)
24. Knyazeva T.V. Plant growth regulators in the Krasnodar region: monograph. Krasnodar: EDVI; 2013. 128 p. ISBN 978-5-901957-94-3. (in Russ.)

Об авторах:

Елена Георгиевна Козарь – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаб. молекулярно-иммунологических исследований, <https://orcid.org/0000-0002-1319-5631>, SPIN-код: 1148-5177, автор для переписки, kozar_eg@mail.ru
Ирина Александровна Енгальчева – кандидат с.-х. наук, заведующая лабораторией молекулярно-иммунологических исследований, <https://orcid.org/0000-0003-4843-111X>, SPIN-код: 2084-2830, engirina1980@mail.ru

About the Authors:

Elena G. Kozar – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher of the Laboratory of Molecular Immunological Research, <https://orcid.org/0000-0002-1319-5631>, SPIN-code: 1148-5177, Corresponding Author, kozar_eg@mail.ru
Irina A. Engalycheva – Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Molecular Immunological Research, <https://orcid.org/0000-0003-4843-111X>, SPIN-code: 2084-2830, engirina1980@mail.ru

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-138-145>
УДК: 634.11:632.35(048)

М.В. Маслова^{1*}, И.Н. Шамшин¹,
Н.В. Дренова², М.Л. Дубровский¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д.101

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский центр карантина растений» Российская Федерация, Московская область, г.о. Раменское, р.п. Быково

*Автор для переписки:
marinamaslova2009@mail.ru

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №1023051100007-2-4.1.1 (FESU-2023-0007) «Разработка инновационных методов получения, анализа и отбора отдаленных гибридов рода *Malus* Mill. и их хозяйственно-биологическая оценка» на базе ЦКП Мичуринского ГАУ «Селекция сельскохозяйственных культур и технологии производства, хранения и переработки продуктов питания функционального и лечебно-профилактического назначения».

Вклад авторов: М.В. Маслова: концептуализация, создание рукописи и ее редактирование. И.Н. Шамшин: концептуализация создание черновика рукописи. Н.В. Дренова: концептуализация создание черновика рукописи. М.Л. Дубровский: концептуализация создание черновика рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Маслова М.В., Шамшин И.Н., Дренова Н.В., Дубровский М.Л. Факторы вирулентности патогена как основа для разработки методов и стратегий борьбы с болезнью растений на примере бактериального ожога яблони (обзор). *Овощи России*. 2025;(6):138-145. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-138-145>

Поступила в редакцию: 19.05.2025

Принята в печать: 26.08.2025

Опубликована: 18.12.2025

Marina V. Maslova^{1*}, Ivan N. Shamshin¹,
Natalia V. Drenova², Maxim L. Dubrovsky¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Michurinsk State Agrarian University 101, Internationalnaya Street, Michurinsk, Tambov Region, Russian Federation

²All-Russian Plant Quarantine Centre Bykovo Urban Settlement, Ramenskoye Urban District, Moscow Region, Russian Federation

*Corresponding Authors:
marinamaslova2009@mail.ru

Funding. The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 1023051100007-2-4.1.1 (FESU-2023-0007) "Development of innovative methods for obtaining, analyzing and selecting distant hybrids of the genus *Malus* Mill. and their economic and biological assessment" on the basis of the Central Research Institute of Michurinsky State Agrarian University "Crop breeding and technologies for the production, storage and processing of food for functional and therapeutic purposes".

Authors' Contribution. Maslova M.V.: conceptualization, writing – review & editing. Shamshin I.N., Drenova N.V., Dubrovsky M.L.: conceptualization, writing – original draft: conceptualization, writing – original draft.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citations: Maslova M.V.: conceptualization, writing – review & editing. Shamshin I.N., Drenova N.V., Dubrovsky M.L.: conceptualization, writing – original draft: factors as a basis for development methods and strategies to control plant disease on the example of fire blight on apple trees (review). *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):138-145. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-138-145>

Received: 19.05.2025

Accepted for publication: 26.08.2025

Published: 18.12.2025

Факторы вирулентности патогена как основа для разработки методов и стратегий борьбы с болезнью растений на примере бактериального ожога яблони (обзор)

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, который свидетельствует о широком распространении и вредоносности *Erwinia amylovora* (Burrill.) Winslow et al. – возбудителя бактериального ожога плодовых культур, в том числе яблони. Болезнь наносит значительный ущерб сельскохозяйственному производству.

Результаты. К настоящему времени заболевание выявлено более, чем в 50 странах мира. Возбудитель поражает около 200 видов семейства Rosaceae, вызывает усыхание отдельных органов с последующей гибелью всего растения. Высокий уровень вирулентности бактерии обеспечивается рядом физиологических особенностей. *E. amylovora* оснащена системой секреции эффекторных белков III типа, что позволяет ей доставлять их непосредственно в клетку хозяина. Также продукция экзополисахаридов, липополисахаридов, подвижность клеток и другие свойства помогают бактерии колонизировать растения-хозяева. Возможность управления данными факторами вирулентности обеспечит снижение способности бактерии вызывать ожог на плодовых культурах. С этой точки зрения перспективными являются методы борьбы с болезнью, основанные на создании условий для несовместимых взаимодействий растения-хозяина и патогена. Данный подход базируется на углубленном понимании механизма патогенеза *E. amylovora*. В связи с этим необходима информация о факторах вирулентности бактерии и особенностях иммунного ответа растения, ответственных за установление взаимосвязи паразита и хозяина.

Заключение. Настоящий обзор содержит материал по ряду направлений, связанных с возбудителем бактериального ожога плодовых культур *E. amylovora*. Освещены вопросы географического распространения бактерии; определен круг растений-хозяев; дана биологическая характеристика *E. amylovora*; описаны симптомы вызываемого ею заболевания; выявлены факторы вирулентности, наиболее значимые для обеспечения защиты растений от изучаемой болезни. Рассматриваются теоретические и практические достижения в области генетики, молекулярной биологии, физиологии растений, микробиологии, которые имеют большое значение для интеграции современных биотехнологий с целью повышения эффективности борьбы с бактериальным ожогом плодовых культур.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

бактериальный ожог плодовых культур, факторы вирулентности *E. amylovora*, устойчивость

Pathogen virulence factors as a basis for development methods and strategies to control plant disease on the example of fire blight on apple trees (review)

ABSTRACT

Relevance. The analysis of domestic and foreign literature has demonstrated the wide distribution and harmfulness of *Erwinia amylovora* (Burrill.) Winslow et al., the causative agent of fire blight of fruit crops, including apple trees. The disease causes significant damage to agricultural production.

Results. To date, the disease has been identified in more than 50 countries worldwide. The pathogen affects about 200 species of the Rosaceae family, causing drying out of individual organs followed by death of the entire plant. The high level of virulence of the bacterium is provided by a number of physiological features. *E. amylovora* is equipped with a secretion system of type III effector proteins, which allows it to deliver them directly to the host cell. Also, the production of exopolysaccharides, lipopolysaccharides, cell motility and other properties help the bacterium to colonize host plants. The ability to control these virulence factors will reduce the ability of the bacterium to cause fire blight on fruit crops. From this point of view, disease control methods based on creating conditions for incompatible interactions between the host plant and the pathogen are promising. This approach is based on an in-depth understanding of the mechanism of *E. amylovora* pathogenesis. In this regard, information is needed on the virulence factors of the bacterium and the features of the plant immune response responsible for establishing the relationship between the parasite and the host.

Conclusion. This review contains material on a number of areas related to the causative agent of fire blight of fruit crops *E. amylovora*. The issues of the geographical distribution of the bacterium are covered; the range of host plants is determined; the biological characteristics of *E. amylovora* are given; the symptoms of the disease it causes are described; virulence factors that are most significant for ensuring plant protection from the disease under study are identified. Theoretical and practical achievements in the field of genetics, molecular biology, plant physiology, and microbiology are considered, which are of great importance for the integration of modern biotechnologies in order to increase the effectiveness of fight against fire blight of fruit crops.

KEYWORDS:

fire blight of fruit crops, virulence factors of *E. amylovora*, resistance of apple varieties to *E. amylovora*, control measures against *E. amylovora*

Введение

В последнее время на территории РФ среди фитопатогенных микроорганизмов отмечается рост заболеваемости бактериальной природы. На плодовых культурах особой вредоносностью отличается *Erwinia amylovora* (Burrill.) Winslow et al – возбудитель бактериального ожога плодовых растений. Болезнь наносит значительный ущерб производителям сельскохозяйственной продукции, личным подсобным хозяйствам, рекреационным зонам и др. В связи с этим в последнее время исследователями уделяется повышенное внимание этой фитопатогенной бактерии [1-7].

По данным Европейской и Средиземноморской организации по карантину и защите растений (ЕОКЗР) патоген имеет статус ограниченно распространенного карантинного объекта, в т.ч. на территории РФ и других стран ЕАЭС [8]. К настоящему времени заболевание выявлено более чем в 50 странах мира. Бактериальный ожог обнаружен на территории стран бывшего СССР, в том числе России, Беларуси, Украины, Молдовы, Латвии, Киргизии [9]. Последние случаи были зарегистрированы в Казахстане, где бактериальный ожог был впервые отмечен в начале 2000-х годов и его ареал из года в год расширяется [5]. Наличие очагов заболевания в соседних странах (Польше, Украине, Молдове, Беларуси, Латвии, Литве) и странах, экспортирующих в Россию посадочный материал плодовых и декоративных культур, требует постоянного проведения мониторинга на наличие *E. amylovora*. Выявлять данный патоген необходимо не только на плодовых культурах, но и на восприимчивых дикорастущих растениях, которые могут быть многолетними резервуарами инфекции [10].

Возбудитель поражает около 200 видов растений семейства Rosaceae, в основном относящихся к подсемейству Maloideae [8, 11]. К наиболее важным плодовым деревьям, экономически повреждаемым *E. amylovora*, относятся груша, яблоня, айва. Для производства этих культур ожог представляет серьезную угрозу во всем мире [7, 12-18]. Среди дикорастущих и декоративных растений-хозяев особую роль в распространении *E. amylovora* играет боярышник (*Crataegus*), который является признанным резервуаром бактерии в силу своей высокой восприимчивости к ожогу, а также способности хорошо восстанавливать крону и долгое время сохранять в пораженных тканях жизнеспособного возбудителя [8, 13]. Другими широко распространенными растениями-хозяевами *E. amylovora* являются различные виды рябины (*Sorbus*) [3]. Бактерия также может поражать иргу (*Amelanchier*), пираканту (*Pyracantha*). Из-за генетических адаптаций некоторых бактериальных изолятов возникла специализация на ежевике, малине (*Rubus*) [13]. Восприимчивыми к *E. amylovora* являются растения мушмулы (*Eriobotrya japonica*) [14, 19]. Отмечены предпосылки к началу внедрения и колонизации этим карантинным организмом побегов грецкого ореха (*Juglans*) [8]. В сильно зараженных садах *E. amylovora* может поражать от 20 до 50%, в отдельных случаях – до 90% деревьев, часть из которых полностью погибает [2].

E. amylovora – грамотрицательный факультативно-анаэробный палочковидный фитопатоген, принадлежащий к семейству Enterobacteriaceae. Клетки бактерий вирулентного или авирулентного типа имеют форму палочки. с большим количеством жгутиков на поверхности, не образуют спор, имеют экзополисахаридную капсулу. Оптимальное развитие осуществляется при pH 6,0–7,5. Точка термической гибели бактерий, составляет 45–50°C. Оптимальная

температура роста 26–28°C, минимальная – 6–8°C [2, 7, 9]. Штаммы, которые выделены с разницей в несколько десятилетий, не имеют значительных генетических различий в связи с низкой частотой естественных мутаций [20].

E. amylovora может длительно существовать в составе эпифитной микробиоты различных растений. Именно эпифитные популяции бактерий в большинстве случаев служат причиной распространения бактериального ожога [8, 9, 13]. Возбудитель этой болезни может вести биотрофный или некротрофный образ жизни, поскольку вторгается в живых хозяев, но может зимовать и в мертвых растительных остатках [11]. Бактериальный ожог поражает цветки, побеги, плоды и может вызывать как снижение урожайности, так и полную гибель деревьев [21]. *E. amylovora* проникает в растения-хозяева через естественные отверстия и раны, колонизирует межклеточные пространства паренхимы, затем мигрирует в сосудистую систему и образует биопленки, которые блокируют сосуды ксилемы, препятствуя переносу воды. Это провоцирует обширные поражения, а иногда и полное отмирание дерева при благоприятных для возбудителя климатических условиях. Внутреннее перемещение патогена через сосудистую систему растений затрудняет борьбу с ожогом [12, 19, 22]. Опасность этого заболевания заключается в быстрой гибели (в течение 3 месяцев) зараженных растений [2]. Весной, с началом сокодвижения, бактерии активизируются и начинают интенсивно размножаться. Этому способствует высокая влажность воздуха и температура выше 18...20°C.

В результате размножения бактерий появляется экссудат, выделяющийся на поверхность в виде мелких капель или незаметной тонкой пленки, являющийся источником первичной инфекции цветков, листьев и однолетних побегов [9, 10, 19]. На листьях вначале появляются небольшие красноватые (у яблони) или темно-бурые (у груши) некрозы между жилками, которые распространяются к периферии, увеличиваясь в размере. Молодые зеленые побеги увядают, а верхушки их погибают в виде пастушьего посоха – «shepherds crook». Затем инфекция быстро распространяется вниз по дереву, внешний вид которого производит впечатление обожженного огнем. Кора размягчается, наблюдается выделение экссудата в виде капель жидкости молочно-белого цвета. Бактерия поражает и плоды, чаще незрелые; они чернеют, но так же, как и листья, не опадают, а остаются на дереве [2, 9].

Разработано несколько методов обнаружения и идентификации *E. amylovora*: общепринятый метод культивирования на питательных средах с последующим определением принадлежности к систематической группе по морфологии колоний; биохимические и серологические тесты; методы, основанные на использовании ПЦР [23 -27].

В связи с высокой вредоносностью и широким распространением бактериального ожога плодовых растений возникает необходимость поиска эффективных методов борьбы с возбудителем данной болезни. Актуальным аспектом для решения возникшей проблемы является обобщение существующих результатов исследований как отечественных, так и зарубежных ученых, касающихся механизмов патогенеза *E. amylovora*.

Факторы вирулентности бактерий *E. amylovora*

Чтобы успешно осуществить инфицирование, *E. amylovora* использует сложную регуляторную сеть сигналов окружающей среды и координации экспрессии факторов

вирулентности. Среди них основными являются система секреции III типа (T3SS), наличие экзополисахаридов, липополисахаридов, способность образовывать биопленку, подвижность, продукция железосидерофора и др. [15, 22, 28-30].

Система секреции III типа (T3SS). Доставка эффекторных белков через систему секреции III типа (T3SS) является важным моментом в патогенезе с участием многих грамотрицательных бактерий. Эта система секреции используется *E. amylovora* для экспорта и доставки эффекторных белков в цитозоль клеток растений-хозяев через пиллообразную структуру [13, 18, 31]. T3SS фитопатогенных бактерий в основном состоит из белков Hrc, кодируемых кластером генов гиперчувствительного ответа и патогенности (hypersensitive response and pathogenicity – *hrp*), которые контролируют способность патогена вызывать заболевание у восприимчивых растений-хозяев и вызывать гиперчувствительный ответ (hypersensitive response – HR) у резистентных растений. *Hrp* отвечают за доставку нескольких бактериальных белков в апопласты или цитоплазму растений [31-33].

E. amylovora выделяет несколько эффекторных белков: DspA/E (или DspE), HrpA, HrpN, HrpW, Eop1, AvrRpt2 Ea/Eop4 (или Eop4), Eop3, HrpC1 [29, 30, 34]. В клетки-хозяева транслицируются несколько эффекторов третьего типа, однако, на сегодняшний день известно, что только AvrRpt2EA играет роль для патогенеза [13]. Двойственная природа AvrRpt2EA важна для патогенности на восприимчивых хозяевах и устойчивости на резистентных генотипах. У *E. amylovora* существуют два естественных аллеля AvrRpt2EA. Они отличаются только одним нуклеотидом [35]. DspA/E – эффектор T3SS, имеет значение в подавлении защиты хозяина [13]. В свою очередь HrpA участвует в формировании пилуса. HrpN был охарактеризован как белок, способный вызывать HR [30]. Белки-шапероны TTS проявляют кооперативное поведение для управления динамикой секреции эффекторов и транслокации у *E. amylovora*. DspE специфически взаимодействует с белком-шапероном TTSDspF, который стабилизирует эффекторный белок в цитоплазме и способствует его эффективной транслокации через T3SS. Выявлены функциональные взаимодействия между эффекторными белками DspE, Eop1, Eop3 с шаперонами TTS DspF, Esc1, Esc3. Три шаперона TTS играют аддитивную роль в секреции и транслокации DspE в растительные клетки, тогда как DspF отрицательно влияет на транслокацию Eop1 и Eop3 [34]. Следует отметить, что нуклеотидная последовательность гена, кодирующего Eop1, у штаммов *E. amylovora*, на малине и ежевике, явно отличается от таковой у группы, заражающей яблоню, грушу, айву [13].

Продукция внеклеточных полисахаридов. Бактерии продуцируют множественные поверхностно-экспонированные полисахариды, включая экзополисахариды (ЭПС), а также липополисахариды (ЛПС). Их синтез осуществляется специализированными ферментами, кодируемыми генами в одном или нескольких локусах. ЭПС и ЛПС обеспечивают вирулентность *E. amylovora* [22]. ЭПС предотвращают потерю влаги и питательных веществ у бактерий, защищают клетки от антибиотиков, ультрафиолетового излучения и от распознавания хозяином веществ, запускающих иммунный ответ. Так же они играют важную роль в формировании биопленки, обеспечивают клеткам скользящую подвижность [36]. ЭПС могут состоять из одного или нескольких сахаров, соединенных различными связями. Они обычно отрицатель-

но заряжены и сильно гидратированы, что усиливает их поверхностную ассоциацию, способствует адгезии и опосредует взаимодействие хозяина и микроорганизма. ЭПС используются бактериями для модификации среды хозяина, обеспечивая более благоприятные условия для своего роста [22].

E. amylovora продуцирует ЭПС амиловоран. Это гетерополимер, мономерные субъединицы которого состоят из одной глюкуроновой кислоты и четырех остатков галактозы, с пироватными и ацетатными группами [36]. Синтез амиловорана является необходимым условием для развития бактериального ожога, поскольку он способен физически блокировать движение воды по сосудистым элементам растения. Количество амиловорана, продуцируемого отдельными штаммами *E. amylovora*, коррелирует со степенью вирулентности. Штаммы *E. amylovora*, которые не обладают способностью продуцировать амиловоран, являются непатогенными и не способны распространяться в сосудах растений [12, 36]. Амиловоран, кодируемый двенадцатью генами *ams*, подавляет защиту растений. Ферменты AmsC, AmsH и AMSL участвуют в транспорте и размещении олигосахаридов, тогда как AmsA обладает активностью тирозинкиназы. Белки AmsB, AmsD, AmsE, AmsG, AmsJ и AmsK участвуют в связывании различных субъединиц галактозы, глюкуроновой кислоты и пирувата с липидным транспортером с образованием амиловорановой единицы. AmsF может обрабатывать вновь синтезированные повторяющиеся звенья и/или участвовать в их полимеризации, присоединяя их к существующей цепи амиловорана. С другой стороны, AmsI участвует в рециркуляции липидного транспортера, который дифосфорилируется после высвобождения синтезированной повторяющейся единицы [30, 37].

Леван – еще один ЭПС, продуцируемый *E. amylovora*, рассматриваемый как фактор вирулентности. Это полифруктозан (β -2, 6-d-фруктофуран), синтезируемый левансахаразой, которая выделяется многими грамотрицательными и грамположительными бактериями. У *E. amylovora* этот фермент кодируется геном *lsc*, который экспрессируется независимо от сахарозы. Секретируемая левансахараза расщепляет сахарозу, тем самым полимеризуя фруктозу в леван и высвобождая глюкозу в окружающую среду [38]. Как и амиловоран, леван участвует в формировании биопленок и обеспечивает защиту бактерий от неблагоприятных факторов окружающей среды [30, 39]. Недостаток синтеза левана может привести к замедлению развития симптомов у растения-хозяина [12].

Липополисахариды (ЛПС) у *E. amylovora* у грамотрицательных бактерий являются одним из компонентов внешней мембраны, обеспечивающие структурную целостность и адгезию клеток на различных поверхностях [40]. ЛПС у *E. amylovora* имеют ядро, состоящее из глюкозы, гептозы, 3-дезоксид-D-манно-окт-2-улоносовой кислоты, уроновой кислоты и относительно коротких боковых цепей полисахаридов. ЛПС служит физическим барьером бактериальных клеток. Было описано несколько специфических функций, включая опосредование взаимодействий с окружающей средой посредством развития биопленки и подвижности бактерий. ЛПС может выполнять защитную роль, предотвращая контакт пептида хозяина с фосфолипидной мембраной патогена [22]. В ходе анализа геномной последовательности бактерии *E. amylovora* выявлены и аннотированы гены биосинтеза ЛПС (*waaC*, *waaD*, *waaL*, *waaF*, *wabK*, *wabM*), потенциально связанные с патогенностью. Делеции некоторых из

них привели к утрате вирулентности мутантного штамма, который оказался авирулентным при искусственном заражении плодов груши [40]. Приобретение *E. amylovora* другого набора генов биосинтеза ЛПС или потеря ряда кластеров генов, ответственных за деградацию фенольных и сернистых соединений, а также метаболизм L-арабинозы привело к возможности поражать представителей рода *Rubus* [13].

Для патогенеза критически важна защита от активных форм кислорода (АФК), продуцируемых растениями-хозяевами в процессе индукции защитных реакций. Ферменты каталаза, амилазоран и липополисахаридный слой способствуют защите от токсичности АФК [13, 40].

Формирование биопленки. Одним из основных условий для успешного развития бактериозов считается формирование биопленок. ЭПС являются основным компонентом матрицы биопленок, агрегатов микроорганизмов, окруженных внеклеточным материалом. Только 10% биопленки составляют собственно клетки микроорганизмов, а на долю ЭПС приходится большая часть остатка, придавая биопленке трехмерную архитектуру [22]. *E. amylovora* образует биопленку *in vitro* и *in planta*. Колонизация ксилемы имеет решающее значение для системного перемещения патогена через растения. Мутанты со сниженной способностью к образованию биопленки, оказались неспособными к созданию больших популяций в ксилеме яблони [12].

Подвижность. Подвижность клеток *E. amylovora* также способствует установлению патогенеза [41, 42]. *E. amylovora* имеет два набора генов, кодирующих биосинтез жгутиков и белки, связанные с хемотаксисом. Они определяют подвижность клеток патогена, которая напрямую связана с конкурентоспособностью штаммов *E. amylovora* [43]. Изучение аспектов её перемещения по ветвям деревьев и между ними, а также тех, которые лежат в основе воздействия хозяина на передвижение, предоставляет практическую информацию, которая будет полезна для оптимизации стратегий контроля болезни [13].

Вспомогательные факторы вирулентности. Существует ряд факторов вирулентности, которые не являются необходимыми для установления совместимых взаимодействий с хозяином, но участвуют в метаболических процессах, обеспечивающих выживании бактерий и колонизацию хозяина. Так, например, мутанты с измененным метаболизмом сорбита и сахарозы снижают вирулентность и выраженность симптомов ожога на яблони и груше [12, 42]. Железо является фундаментальным элементом, присутствующим в качестве кофактора в белках и ферментах живых организмов. У *E. amylovora* поглощение железа, опосредовано сидерофорами и зависит от десферриоксиаминов (ДФО). Их производство является критической функцией для потребления бактериями железа во время патогенеза, а также для индукции утечки электролита из растительных клеток [44, 45]. В процессе патогенеза *E. amylovora* подвергается воздействию различных антимикробных соединений растительного происхождения (фитоалексинов, фитоантисипинов). Транспортная система эффлюкс-насос различных токсических веществ (AcrAB) играет важную роль в качестве белкового комплекса, необходимого для устойчивости *E. amylovora* к фитоалексинам яблони. Она нужна для успешной колонизации растения-хозяина. Мутанты бактерии с ослабленной эффлюкс-системой обладают низкой вирулентностью на яблоне и восприимчивы к экстрактам и фитоалексину листьев (флоретину, нарингенину, кверцетину и катехину) [12].

Иммунный ответ растений, как способ подавления факторов вирулентности *E. amylovora*

Иммунитет растений к *E. amylovora* зависит от их способности распознавать возбудителей с помощью различных молекулярных стратегий. Белки поверхностных рецепторов, известные как рецепторы распознавания образов (pattern recognition receptors – PRR), выявляют консервативные молекулярные паттерны, связанные с патогеном (pathogen-associated molecular patterns – PAMP), такие как бактериальный флагеллин, ЛПС и др. В результате такого узнавания запускается целый ряд защитных реакций неспецифического иммунитета (pattern trigger immunity – PTI) [17, 46, 47].

Специфическое распознавание патогена внутриклеточными рецепторами зависит от эффекторных белков (effector proteins – EP), которые *E. amylovora* доставляет в клетки растений [35]. Для этого она использует T3SS в качестве транспортного канала для доставки EP непосредственно в цитоплазму клетки-хозяина с целью подавления PTI [48]. Иммунитет, запускаемый эффектором (effector-triggered immunity – ETI) включает в себя экспрессию белков, связанных с патогеном (resistance proteins – PR), за синтез которых отвечают гены устойчивости (R-гены) хозяина. При этом включается гиперчувствительный ответ (HR). Гены *hrp* кодируют компоненты T3SS у фитопатогенов [45, 46]. Процесс распознавания белков авирулентности (Avr) патогена позволяет активировать систему защиты растений [30]. И PTI, и ETI запускают ряд реакций хозяина, включая образование АФК, NO, отложение каллозы и др. *E. amylovora* также индуцирует экспрессию некоторых генов, ответственных за устойчивость растений по пути жасмоновой кислоты, а также по пути салициловой кислоты [45].

Растения обычно имеют несколько изоформ каждого белка PR. Хорошо известны белки PR1, β -1,3-глюканазы (PR2), хитиназы (PR3, PR4), лизоцимы (PR8), осмотиноподобные и тауматоподобные белки (PR5), белки переноса липидов (PR14), ингибиторы протеиназ (PR6), эндопротеиназы (PR7), пероксидазы (PR9), белки, богатые цистином, белки, богатые глицином, и хитозаназы. При заражении яблони *E. amylovora* повышается экспрессия белков PR2, PR5 и PR8 [30]. В 2006 году Zhao идентифицировали аналог эффекторного белка AvrRpt2 из *P. syringae* pv. *tomato* в геноме *E. amylovora* и обозначили его как AvrRpt2EA [49].

Чтобы повысить устойчивость растений атакам, цекропин и лизоцим стимулируют выработку антимикробных белков в растении-хозяине, ингибируют факторы бактериальной патогенности гена деполимеразы, а белки, такие как PR, DIPM, HIPM и HarpN, участвуют в улучшении естественной защиты растений [30].

Биологический и селекционный методы борьбы с *E. amylovora*, основанные на манипуляции факторами бактериальной вирулентности

При организации защитных мероприятий в первую очередь предпочтение отдается экологически безопасным и высокоэффективным методам борьбы с болезнями. С этой точки зрения перспективными являются биологический и селекционный, основанные на создании условий для несовместимых взаимодействий растения-хозяина и патогена. Данный подход базируется на углубленном понимании механизма патогенеза *E. amylovora*. В связи с этим необходимо знать особенности установления взаимосвязи паразита и хозяина, факторы вирулентности бактерии и механизмов иммунного ответа растения.

Знания биологии патогенов растений необходимы для разработки экологически безопасных стратегий управления ими. Развитие заболевания является конечным результатом множественных взаимосвязей, установленных между клетками *E. amylovora*, растением-хозяином и окружающей средой. Создание условий для несовместимых взаимодействий между растением и патогеном предотвращает развитие болезни [16, 30]. Для решения этих проблем исследования различных аспектов, касающихся бактериального ожога плодовых культур, включая биологию патогена, устойчивость растения, особенности взаимодействия в системе «среда-хозяин-паразит», привели к открытию новых механизмов патогенности и потенциальных способов борьбы [21].

Сегодня против *E. amylovora* предпринимаются попытки разработать стратегии, направленные на подавление факторов бактериальной вирулентности, стимуляцию выработки хозяином антимикробных соединений, усиление естественной защиты растений [30]. Манипуляции факторами вирулентности позволяют получить авирулентные штаммы, способные конкурировать в биоценозе с вирулентными бактериями *E. amylovora* и осуществлять биоконтроль ожога плодовых культур. Распространение непатогенных штаммов, которые способны вытеснить агрессивные формы возбудителя болезни является одним из эффективных и безопасных способов борьбы с этим заболеванием [50]. Важно отметить, что штаммы *E. amylovora* демонстрируют фенотипические вариации подвижности, вирулентности и продукции амиловорана. Но генетически имеют довольно низкое разнообразие. Это представляет собой трудности и поднимает вопросы о механизмах функциональной изменчивости *E. amylovora* [21].

В качестве альтернативных стратегий борьбы с бактериальными болезнями растений возможно использовать способы, которые подавляют функцию T3SS и блокируют вирулентность бактерий. Добавление производного растительной фенольной кислоты в культуру *E. amylovora* в условиях *in vitro* подавляло экспрессию нескольких генов регулона T3SS, включая главный ген регулятора *hrpL*. Полученными штаммами обрабатывали деревья. На них в период с 2015 по 2022 гг. было отмечено снижение заболеваемости ожогом на 96,7% по сравнению с необработанными образцами. Таким образом, показана высокая эффективность ингибиторов T3SS против бактериального ожога плодовых культур [18].

Совместная инокуляция побегов яблони двумя непатогенными мутантами *E. amylovora* с делециями в генах, ответственных за синтез амиловорана и работу T3SS, привела к системному распространению обоих мутантных штаммов [13].

Белки семейства MarR (multiple antibiotic resistance – множественная устойчивость к антибиотикам) составляют группу транскрипционных регуляторов, изменяющих экспрессию генов, отвечающих за вирулентность, стрессовые реакции, формирование биопленок и выведение из бактериальной клетки широкого спектра токсичных веществ. MarR является важным регулятором транскрипции, участвующим в регуляции синтеза большой группы факторов, связанных с вирулентностью *E. amylovora*. Мутация в этом гене проявляется в сниже-

нии продукции экзополисахарида левана, подвижности, а также общей вирулентности по отношению к вегетирующим растениям груши [6, 40]. Методом случайного мутагенеза путем введения транспозона Tn5 были получены мутанты. Путем инокуляции ими плодоножек яблони выявлено, что 17 из 960 случайных мутантов были авирулентны [50]. Непатогенный штамм *E. amylovora* CP200242 был недавно выявлен в грушевом саду в Южной Корее [51].

Способность растений-хозяев вырабатывать антимикробные белки также определяет успех борьбы с *E. amylovora*. Флоретин вырабатывается яблоней и грушей. В яблоне его содержание значительно увеличивается в ответ на заражение бактерией *E. amylovora*. Поэтому он считается фитоалексином. Флоретин может повышать устойчивость к бактериальному ожогу [52]. Были клонированы и экспрессированы гены в яблоне и груше, кодирующие антимикробные белки (аттацин E, цекропины и лизоцимы), которые придают устойчивость к *E. amylovora* [30].

Получение новых сортов, устойчивых к бактериальному ожогу, это важный аспект в рамках комплексной борьбы с этим заболеванием [53]. Все большее значение приобретает стратегия селекции, которая фокусируется на основных молекулярных механизмах резистентности хозяина к ожогу [17]. Длительная устойчивость к *E. amylovora* требует пирамидирования нескольких генов и/или локусов, которые потенциально обладают различными механизмами действия [54].

В настоящее время охарактеризованы четыре локуса количественных признаков (quantitative trait loci – QTL) у различных генетических источников устойчивости, которые могут быть использованы в селекции с применением маркеров (marker-associated selection – MAS) [55]:

1. FBF7 QTL 'Фиесты' объясняет 35-40% фенотипических вариации [56];
2. QTL *Malus × robusta* 5 объясняет 67-83% [57];
3. QTL 'Эвереста' объясняет 50-70% [58];
4. QTL 'Флорины' на LG10 объясняет 15% фенотипической изменчивости [59].

Анализ QTL у двух потомков F1, полученных от скрещивания сортов 'Фиеста' и 'Дискавери' или 'Прима' позволил выявить основной QTL, объясняющий 34,3–46,6% фенотипической изменчивости в группе сцепления (linkage group – LG) 7 у Fiesta в обоих потомствах с одинаковой генетической позицией. QTL у LG7 показал стабильность при двух различных скрещиваниях. Четыре второстепенных QTL также были выявлены в LG 3, 12 и 13. Кроме того, у обоих потомков отмечено несколько значимых дигенных взаимодействий. Эти результаты подтверждают сложную полигенную природу устойчивости к ожогу у изученных потомков [56].

Маркеры AE10-375 и GE-8019 расположены по бокам от QTL FBF7. Однако фланкирующие этот локус маркеры AFLP и RAPD не подходили для MAS. Два RAPD маркера GE-8019 и AE10-375 были преобразованы в SCAR. Для повышения надёжности молекулярно-генетического анализа используется маркер CH-F7-Fb1, который находится на той же стороне QTL, что и AE10-375 [60]. Анализ генома сорта яблони 'Фиеста' с помощью этих маркеров позволил отследить аллель QTL F7. Стабильность эффекта этого аллеля QTL в разных

условиях проанализирована путём заражения потомства от скрещивания сортов, которые являются носителями или не являются носителями этого аллеля. Генотипы, несущие оба маркера, были значительно более устойчивыми, что указывает на высокую стабильность аллеля QTL F7 в разных условиях. Это обстоятельство и наличие воспроизводимых маркеров, ограничивающих QTL, делают данный локус перспективным для использования в MAS [32, 61 - 64].

С помощью методов генетического картирования было выявлено несколько QTL, связанных с устойчивостью к ожогу у диких видов *Malus*, таких как *M. robusta* 5 (Mr5), *M. floribunda* 821 (Mf821), *M. arnoldiana* и *M. fusca*. В генотипе Mr5 был обнаружен один ген устойчивости, называемый FB_MR5, расположенный в пределах крупного QTL, в LG3, который отвечает за устойчивость к ожогу. FB_MR5 относится к семейству R-генов растений и кодирует белок спиральной структуры, связывающий нуклеотиды, с богатым лейцином повтором (coiled-coil nucleotide-binding leucine-rich repeat – CC-NB-LRR). Данный ген способен распознавать эффектор патогена и инициировать ETI [35]. Исследование, посвящённое анализу структуры белка AvrRpt2EA, предполагает его прямое взаимодействие с FB_MR5 [17]. Проанализированы профили транскриптома Mr5, заражённого авирулентным штаммом дикого типа Ea1189 (содержащим аллель AvrRpt2EA) или вирулентным штаммом avrRpt2EA-делетированного мутанта ZYRKD3-1. Сравнение уровней транскрипции между двумя вариантами заражения позволило выявить дифференциально экспрессируемые гены (differentially expressed genes – DEG) в зависимости от наличия или отсутствия эффектора AvrRpt2EA, следовательно, они связаны с устойчивостью или восприимчивостью к *E. amylovora*. [35]. Выраженная устойчивость к ожогу обнаружена у некоторых образцов дикой яблони, которые являются донорами QTL устойчивости в LG3 у Mr5, в LG10 у *M. fusca* и в LG12 у сорта 'Эверест', а также видовых форм *M. floribunda* 821, *M. arnoldiana*, *M. baccata*. Сильная и стабильная устойчивость к ожогу обеспечивается QTL (FB_Mar12), отображенной на LG12 [17, 54]. QTL в дистальной области LG12 генома яблони объяснял от 50 % до 70 % фенотипических вариаций в потомстве сорта 'Эверест'. Более 40 % фенотипических вариаций объяснялись QTL *M. floribunda* во втором поколении. 'Эверест' и *M. floribunda* 821 несут разные аллели QTL в этом геномном регионе. У 'Эвереста' был выявлен дополнительный QTL с небольшим эффектом в LG15 [58].

У *M. fusca* ген-кандидат (FB_Mfu10), кодирующий лектин, домен PAN и серин-треониновые протеинкиназы, был обнаружен в Mfu10. Если FB_Mfu10 действительно обеспечивает устойчивость к широкому спектру патогенов, то механизм может быть аналогичен модели PRR в качестве первой линии активной защиты. AvrRpt2EA в исследуемых системах *M. fusca* и *M. floribunda* 821 роли не играет [17]. QTL высокой устойчивости к *E. amylovora* FB_Mfu10 объясняет до 66% фенотипической вариативности в потомстве F₁, полученном в результате скрещивания высокоустойчивой видовой формы *Malus fusca* MAL0045 и высокочувствительного сорта яблони 'Айдаред'. Несмотря на высокий уровень устойчивости MAL0045 к ожогу, большинство потомков F₁ были очень

восприимчивы. Весьма вероятно, что в геноме MAL0045 существуют другие предполагаемые факторы устойчивости, не проявляющиеся в потомстве F₁ [21].

QTL в LG5 объяснял 10,1% фенотипической изменчивости. Генотипирование растений сорта 'Флорина' с помощью микросателлитов, фланкирующих QTL, показало, что данный локус был унаследован от сорта 'Джонатан'. Другие предполагаемые QTL обнаружены в LG5 и LG9 у сорта 'Нова Изигро' [59]. QTL устойчивости к бактериальному ожогу у сортов яблони 'Фиеста' и 'Флорина' имеют незначительные эффекты. Однако, механизм снижения восприимчивости сортов к *E. amylovora* также важен, так как способствует достижению цели долговременной устойчивости, замедляя действие мутаций патогена, которые позволяют преодолеть резистентность хозяина [17]. Идентифицировали два новых QTL устойчивости у особей F₂ в LG4 и LG15. Также были разработаны тесно связанные SSR-маркеры для этих QTL, которые позволяют отбирать особи, несущие комбинацию благоприятных аллелей, обеспечивающих устойчивость к бактериальному ожогу [21].

Важно продолжать поиск и идентификацию альтернативных и новых генов, их функциональных аллелей, связанных молекулярных маркеров, которые были бы полезны для пирамидирования с целью получения стабильной устойчивости к ожогу у растений методом маркерной селекции [54].

Заключение

Обобщение данных отечественной и зарубежной литературы свидетельствует о том, что высокий уровень вирулентности бактерии *E. amylovora* обеспечивается рядом её физиологических особенностей. Она оснащена системой секреции эффекторных белков III типа, что позволяет доставлять их непосредственно в клетку хозяина. Также продукция экзополисахаридов, липополисахаридов, подвижность клеток и другие свойства помогают бактерии успешно колонизировать растения-хозяева. Возможность управления данными факторами вирулентности обеспечит снижение способности бактерии вызывать ожог на плодовых культурах. С этой точки зрения перспективными являются методы борьбы с болезнью, основанные на создании условий для несовместимых взаимодействий растения-хозяина и патогена. Данный подход базируется на углубленном понимании механизма патогенеза *E. amylovora*, информации о факторах вирулентности бактерии, о специфике иммунных реакций растения, ответственных за установление взаимосвязи паразита и хозяина.

В настоящем обзоре освещены вопросы географического распространения бактерии; определен круг растений-хозяев; дана биологическая характеристика *E. amylovora*; описаны симптомы вызываемой ею болезни; выявлены факторы вирулентности, наиболее значимые для разработки методов борьбы с данным заболеванием; рассматриваются теоретические и практические достижения в области генетики, молекулярной биологии, физиологии растений, микробиологии, связанные с устойчивостью плодовых растений к бактериальному ожогу. Освещаемые вопросы имеют большое значение для интеграции современных биотехнологий с целью повышения эффективности борьбы с *E. amylovora*.

• Литература / References

- Ignatov A.N., Egorova M.S., Khodykina M.V. Spread of bacterial and phytoplasma plant diseases in Russia. *Plant protection and quarantine*. 2015;(5):6-9. (In Russ.) <https://elibrary.ru/trkkdp>
- Karimova E.V., Shneider Yu.A., Smirnova I.P., Pakina E.N., Astarkhanova T.S. Phytopathogenic bacteria *Erwinia amylovora* and *Acidovorax citrulli* and analysis of their phytosanitary risk. *Development problems of regional agro-industrial complex*. 2019;(4):71-77. (In Russ.) <https://elibrary.ru/hwyxog>
- Drenova N.V., Kondratyev M.O., Kharchenko A.A., Tsybalyu Yu.S., Sukholozova E.A., Kvashnina N.A., Dzhaliylov F.S. Rowan (*Sorbus spp.*) as a potential host plant of the causative agent of bacterial blight of fruit crops (*Erwinia amylovora*) in the Russian Federation. *Phytosanitary. Plant quarantine*. 2020;4(4):46-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.69536/fkr.2020.12.82.001> <https://elibrary.ru/rdszjb>
- Gorovik Yu.N., Lagonenko A.L., Evtushenkov A.N., Kukharchik N.V. Evaluation of resistance of clonal apple rootstocks to bacterial blight *in vitro* culture. *Fruit growing*. 2022;30(1):34-38. (In Russ.) <https://elibrary.ru/mahhjm>
- Malakhova N.P., Skiba Yu.A., Tezekbaeva B.K., Khasein A., Dmitrieva K.D., Romashkin V.N., Zharmukha-Medova G.A., Dzhumanova Zh.K., Maltseva E.R. Prevalence of *Erwinia amylovora* on wild and cultivated apple trees of the genus *Malus* spp. for the period of 2021. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*. 2022;(2):62-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.11134/btp.2.2022.9> <https://elibrary.ru/oamocs>
- Pesotskaya K. Yu., Lagonenko A. L., Evtushenkov A. N. Effect of OHRR gene deletion on the production of virulence factors by phytopathogenic bacteria *Erwinia amylovora*. *Molecular and Applied Genetics*. 2023;34:109-120. (In Russ.) <https://elibrary.ru/dntxbf>
- Guliyeva Z.M. Methods for determining bacterial blight on pome crops in the western part of Azerbaijan. *Bulletin of Science and Practice*. 2024;10(2):105-114. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/99/13> (In Russ.)
- Drenova N.V., Dzhaliylov F.S., Sviridova L.A. Prospects for expanding the range of host plants of the causative agent of bacterial blight of fruit crops *Erwinia amylovora* in the Russian Federation. Proc. of the 10th international scientific and practical conference "Protection of plants from pests", Krasnodar. 2021:124-126 (In Russ.) <https://elibrary.ru/zvyebo>
- Sadanov A.K., Suleimenova Zh.B., Ismailova E.T., Shemshura O.N., Baimakhanova B.B., Baimakhanova G.B., Bisko N.A., Molzhigitova E., Elubakova A.E., Tleubekova D.A., Kondratiev M.O. Bacterial burn of fruit crops. *Microbiology and Virology*. 2023;40(1):35-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2023.01.02>
- Alexandrov I.N. Bacterial blight of fruit crops in the Russian Federation. Historical background. *Plant protection and quarantine*. 2009;(12):26-29 (In Russ.) <https://elibrary.ru/kxwfoz>
- Sobiczewski P., Iakimova E. T., Mikiciński A., Węgrzynowicz-Lesiak E., Dyki B. Necrotrophic behaviour of *Erwinia amylovora* in apple and tobacco leaf tissue. *Plant Pathology*. 2017;66(5):842-855. <https://doi.org/10.1111/ppa.12631>
- Piqué N., Miñana-Galbis D., Merino S., Tomás J. M. Virulence factors of *Erwinia amylovora*: a review. *International journal of molecular sciences*. 2015;16(6):12836-12854. <https://doi.org/10.3390/ijms160612836>
- Rezzonico F., Emeriewen O. F., Zeng Q., Peil A., Smits T. H., Sundin G. W. Burning questions for fire blight research: I. Genomics and evolution of *Erwinia amylovora* and analyses of host-pathogen interactions. *Journal of Plant Pathology*. 2024: 797-810. <https://doi.org/10.1007/s42161-023-01581-0>
- Balaž J., Radunović D., Krstić M. Status of *Erwinia amylovora* in Montenegro. *International Symposium on Current Trends in Plant Protection with esenias workshop - Managing Invasive Alien Species in se countries: the way ahead, 25-28 septembar 2012, Beograd*. 2012:373-378.
- Evrenosoğlu Y., Misirli A., Saygili H., Bilen E., Boztepe Ö., Acarsoy, N. Evaluation of susceptibility of different pear hybrid populations to fire blight (*Erwinia amylovora*). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2011;39(1):226-236.
- Pedroncelli A., Puopolo G. This tree is on fire: a review on the ecology of *Erwinia amylovora*, the causal agent of fire blight disease. *Journal of Plant Pathology*. 2023:823-837. <https://doi.org/10.1007/s42161-023-01397-y>
- Emeriewen O.F., Wöhner T., Flachowsky H., Peil A. *Malus* hosts *Erwinia amylovora* interactions: strain pathogenicity and resistance mechanisms. *Frontiers in plant science*. 2019;10:551. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00551>
- Yuan X., Sundin G.W., Zeng Q., Johnson K.B., Cox K.D., Yu M., Yang C.H. *Erwinia amylovora* type III secretion system inhibitors reduce fire blight infection under field conditions. *Phytopathology*. 2023;113(12):2197-2204. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-23-0111-SA>
- Mendes R.J., Luz J.P., Santos C., Tavares F. CRISPR genotyping as complementary tool for epidemiological surveillance of *Erwinia amylovora* outbreaks. *PLoS One*. 2021;16(4):e0250280. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250280>
- Rezzonico F., Smits T.H.M., Duffy B. Diversity, evolution, and functionality of clustered regularly interspaced short palindromic repeat (CRISPR) regions in the fire blight pathogen *Erwinia amylovora*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011;77(11):3819-3829. <https://doi.org/10.1128/AEM.00177-11>
- Zeng Q., Slack S., Amine Hassani M. Pathogen Spotlight on *Erwinia amylovora* Recent Advances in Genomics, Resistance Breeding, and Disease Management. *Phytopathology*. 2023;113(12):2140-2142. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-23-0439-SA>
- Klee S.M., Sinn J.P., Christian E., Holmes A.C., Zhao K., Lehman B.L., Mc Nellis T.W. Virulence genetics of an *Erwinia amylovora* putative polysaccharide transporter family member. *Journal of bacteriology*. 2020;202(22):e00390-20. <https://doi.org/10.1128/jb.00390-20>
- Kaluźna M., Puławska J., Mikiciński A. Evaluation of methods for *Erwinia amylovora* detection. *Journal of Horticultural Research*. 2013;21(2):65-71. <https://doi.org/10.2478/johr-2013-0023>
- Pirc M., Ravnika M., Tomlinson J., Dreoj J. Improved fireblight diagnostics using quantitative real-time PCR detection of *Erwinia amylovora* chromosomal DNA. *Plant Pathology*. 2009;58:872-881. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02083.x>
- Mager M.G. Application of diagnostic nutrient media for identification of the phytopathogen *E. amylovora*. *Fruit and berry growing in Russia*. 2013;36(2):9-15. (In Russ.) <https://elibrary.ru/pwwjkl>
- Jin Y.J., Lee S.Y., Kong H.G., Yang S.I., Ham H., Lee M.H., Park D.S. Novel detection and quantification approach of *Erwinia amylovora in vitro* and in planta using SYBR green-based real-time PCR assay. *Plant Disease*. 2023;107(3):624-627. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-22-1227-SC>
- Brurberg M. B., Elameen A., Sletten A., Rossmann S. L. Genetic characterization of historic Norwegian *Erwinia amylovora* isolates by SSR-genotyping. *Journal of Plant Pathology*. 2024;106:987-996. <https://doi.org/10.1007/s42161-024-01596-1>
- Pesotskaya K.Yu., Lagonenko A.L., Evtushenkov A.N. Pleiotropic effect of mutation in the genes of lipopolysaccharide biosynthesis of phytopathogenic bacteria *Erwinia amylovora*. *Molecular and Applied Genetics*. 2021;30:31-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.47612/1999-9127-2021-30-31-38> <https://elibrary.ru/gbbhsy>
- Kudina I.V., Gorovik Yu.V., Lagonenko A.L., Evtushenkov A.N. Characteristics of the virulence properties of *Erwinia amylovora* strains. *Microbial biotechnology: fundamental and applied aspects*. 2018:91-98. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ihytbq>
- Baştaş K.K., Gedük A. Effected proteins in apple and *Erwinia amylovora*. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*. 2020;(8):215-225. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8isp1.215-225.3923>
- Oh C.S., Beer S.V. Molecular genetics of *Erwinia amylovora* involved in the development of fire blight. *FEMS Microbiology Letters*. 2005;253(2):185-192. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.09.051>
- Khan M.A., Durel C.E., Duffy B., Drouet D., Kellerhals M., Gessler C., Patocchi A. Development of molecular markers linked to the 'Fiesta' linkage group 7 major QTL for fire blight resistance and their application for marker-assisted selection. *Genome*. 2007;6(50):568-577. <https://doi.org/10.1139/G07-033>
- Kim J.F., Beer S.V. *Hrp* genes and harpins of *Erwinia amylovora*: a decade of discovery. *Fire blight and its causative agent Erwinia amylovora*. 2000:141-162. <https://doi.org/10.1079/9780851992945.0000>
- Castiblanco L.F., Triplett L.R., Sundin G.W. Regulation of effector delivery by type III secretion chaperone proteins in *Erwinia amylovora*. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9:146. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00146>
- Schröpper S., Vogt I., Broggini G.A.L., Dahl A., Richter K., Hanke M.V., Peil A. Transcriptional profile of AvrRpt2 EA-mediated resistance and susceptibility response to *Erwinia amylovora* in apple. *Scientific reports*. 2021;11(1):8685. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88032-x>
- Yuan X., McGhee G. C., Slack S. M., Sundin G. W. A novel signaling pathway connects thiamine biosynthesis, bacterial respiration, and production of the exopolysaccharide amylovoran in *Erwinia amylovora*. *Molecular Plant - Microbe Interactions*. 2021;34(10):1193-1208. <https://doi.org/10.1094/MPMI-04-21-0095-R>
- Carlini L., Esposito A., Ambrosino L., Bharti S., Invernizzi L. M., Piazza S., Benini S. The ams proteins and the amylovoran biosynthetic pathway: an extensive bioinformatic study. *Journal of Plant*

- Pathology*. 2024;106(3):997-1010.
<https://doi.org/10.1007/s42161-023-01532-9>
38. Du Z., Jakovljevic V., Salm H., Geider K. Creation and genetic restoration of *Erwinia amylovora* strains with low levan synthesis. *Physiological and molecular plant pathology*. 2004;65(3):115-122.
<https://doi.org/10.1016/j.pmp.2004.12.003>
39. Öner E.T., Hernández L., Combie J. Review of Levan polysaccharide: From a century of past experiences to future prospects. *Biotechnology advances*. 2016;34(5):827-844.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.05.002>
40. Pesotskaya K.Yu., Lagonenko A.L., Evtushenkov A.N. Study of the role of the transcriptional regulator MARR in the virulence of phytopathogenic bacteria *Erwinia amylovora*. *Molecular and Applied Genetics*. 2021;31:53-61 (In Russ.) <https://doi.org/10.47612/1999-9127-2021-31-53-61> <https://elibrary.ru/mnkzeo>
41. Fontana R., Macchi G., Caproni A., Sicurella M., Buratto M., Salvatori F., Marconi P. Control of *Erwinia amylovora* growth by *Moringa oleifera* leaf extracts: *In vitro* and in planta effects. *Plants*. 2022;11(7):957. <https://doi.org/10.3390/plants11070957>
42. Schachterle J.K., Gdanetz K., Pandya I., Sundin G.W.. Identification of novel virulence factors in *Erwinia amylovora* through temporal transcriptomic analysis of infected apple flowers under field conditions. *Molecular Plant Pathology*. 2022;23(6):855-869.
<https://doi.org/10.1111/mpp.13199>
43. Choi J.H., Kim J.Y., Park D.H. Evidence of greater competitive fitness of *Erwinia amylovora* over *E. pyrifoliae* in Korean isolates. *The Plant Pathology Journal*. 2022;38(4):355.
<https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.04.2022.0056>
44. Polsinelli I., Borruso, L., Caliendo R., Triboli L., Esposito A., Benini S. A genome-wide analysis of desferrioxamine mediated iron uptake in *Erwinia* spp. reveals genes exclusive of the *Rosaceae* infecting strains. *Scientific Reports*. 2019;9(1):2818.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-39787-x>
45. Kharadi R.R., Schachterle J.K., Yuan X., Castiblanco L. F., Peng J., Slack S. M., Sundin G. W. Genetic dissection of the *Erwinia amylovora* disease cycle. *Annual review of phytopathology*. 2021;59(1):191-212.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095540>
46. Shafikova T.N., Omelichkina Yu.V. Molecular and genetic aspects of plant immunity to phytopathogenic bacteria and fungi. *Plant Physiology*. 2015;62(5):611-611.
<https://doi.org/10.7868/S0015330315050140>
<https://elibrary.ru/udesrh>
47. Shamrai S.N. Immune system of plants: basal immunity. *Cytology and Genetics*. 2014;48(4):67-82.
48. He L.L., Wang X., Rothenberg D. O. N., Xu X., Wang H. H., Deng X., Cui Z. N. A novel strategy to control *Pseudomonas syringae* through inhibition of type III secretion system. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2023;194:105471.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105471>
49. Zhao Y., He S.-Y., Sundin G.W. The *Erwinia amylovora* avrRpt2EA gene contributes to virulence on pear and AvrRpt2EA is recognized by *Arabidopsis* RPS2 when expressed in *Pseudomonas syringae*. *Molecular plant-microbe interactions*. 2006;19(6):644-654.
<https://doi.org/10.1094/MPMI-19-0644>
50. Lee S. Y., Kong H. G., Kang I. J., Oh H., Woo H. J., Roh E. Identification of virulence-associated genes of *Erwinia amylovora* by transposon mutagenesis. *Korean Journal of Agricultural Science*. 2023;50(2):241-247.
51. Ham H., Oh G.R., Park D.S. Genomic Data Analysis of the Nonpathogenic *Erwinia amylovora* Strain CP200242 Isolated from an Asian Pear Tree. *PhytoFrontiers*™. 2023;3(3):747-752.
<https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-12-22-0146-A>
52. Pun M., Khazanov N., Galsurker O., Weitman M., Kerem Z., Senderowitz H., Yedidia I. Phloretin, an apple phytoalexin, affects the virulence and fitness of *Pectobacterium brasiliense* by interfering with quorum-sensing. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:671807.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.671807>
53. Korba J., Šillerová J., Kúdela V. Resistance of apple varieties and selections to *Erwinia amylovora* in the Czech Republic. *Plant Protection Science*. 2008;44(3):91-96.
54. Emeriewen O.F., Richter K., Flachowsky H., Malnoy M., Peil A. Genetic analysis and fine mapping of the fire blight resistance locus of *Malus x arnoldiana* on linkage group 12 reveal first candidate genes. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:667133.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.667133>
55. Kellerhals M., Franck L., Baumgartner I. O., Patocchi A., Frey J. E. Breeding for fire blight resistance in apple. *XII International Workshop on Fire Blight*. 2010:385-389.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.896.55>
56. Calenge F., Drouet D., Denancé C., Van de Weg W.E., Brisset M. N., Paulin J. P., Durel, C. E. Identification of a major QTL together with several minor additive or epistatic QTLs for resistance to fire blight in apple in two related progenies. *Theoretical and Applied Genetics*. 2005;111:128-135. <https://doi.org/10.1007/s00122-005-2002-z>
57. Peil A., Hanke M.-V., Flachowsky H., Garcia-Libreros T., Horner M. Bus V. Confirmation of the fire blight QTL of *Malus robusta* 5 on linkage group 3. *Acta Hort*. 2008;793:297-303.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.793.44>
58. Durel C.E., Denance C., Brisset M.N. Two distinct major QTL for resistance to fire blight co-localize on linkage group 12 in apple genotypes 'Evereste' and *Malus floribunda* clone 821. *Genome*. 2009;52(2):139-147. <https://doi.org/10.1139/G08-111>
59. Le Roux P. M., Khan M. A., Brogini G. A., Duffy B., Gessler C., Patocchi A. Mapping of quantitative trait loci for fire blight resistance in the apple cultivars 'Florina' and 'Nova Easygro'. *Genome*. 2010;53(9):710-722. <https://doi.org/10.1139/G10-047>
60. Kairova G., Daulet N., Solomadin M., Sandybayev N., Orkara S., Belousov V., Sapakhova Z. Identification of Apple Varieties Resistant to Fire Blight (*Erwinia amylovora*) Using Molecular Markers. *Horticulturae*. 2023;9(9):1000.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9091000>
61. Kairova G., Pozharskiy A., Daulet N., Solomadin M., Sandybayev N., Khushnidinova M., Gritsenko D. Evaluation of Fire Blight Resistance of Eleven Apple Rootstocks Grown in Kazakhstani Fields. *Applied Sciences*. 2023;13(20):11530.
<https://doi.org/10.3390/app132011530>
62. Lyzhin A., Saveleva N. Identification of QTL FBF7 fire blight resistance in apple varieties germplasm. *BIO Web of Conferences. EDP Sciences*. 2021;34:02002.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20213402002>
63. Lyzhin A.S., Saveleva N.N. Occurrence of the FBF7 fire blight resistance locus in accessions of apple wild species (*Malus* Mill.). *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2023;184(4):133-142. (In Russ.) <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-4-133-142> <https://www.elibrary.ru/epfsmo>
64. Drenova N.V., Shamshin I.N., Dubrovsky M.L. Marking QTL resistance to fire blight in apple varieties and hybrids. *Fruit and Berry Growing of Russia*. 2019;(59):219-226. (In Russ.) <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2019-59-219-226> <https://www.elibrary.ru/efbvwi>

Об авторах:

Марина Витальевна Маслова – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетического анализа плодовых растений, <https://orcid.org/0000-0002-5400-5937>, Researcher ID E-4506-2015, SPIN-код: 1343-5655, автор для переписки, marinamaslova2009@mail.ru

Иван Николаевич Шамшин – кандидат биол. наук, зав. лабораторией молекулярно-генетического анализа плодовых растений, <https://orcid.org/0000-0002-4464-1876>, Scopus ID: 56708633300, Researcher ID: AAZ-9047-2021, SPIN-код: 4212-6451

Наталья Васильевна Дренова – старший научный сотрудник научно-методического отдела бактериологии, <https://orcid.org/0000-0003-4020-2910>, Scopus ID: 55638016500, SPIN-код: 5372-2540

Максим Леонидович Дубровский – кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией селекции слаборослых клоновых подвоев и других культур, <https://orcid.org/0000-0003-0883-2867>, Scopus ID: 57204561635, SPIN-код: 8307-7988

About the Authors:

Marina V. Maslova – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Analysis of Fruit Plants, <https://orcid.org/0000-0002-5400-5937>, Researcher ID E-4506-2015, SPIN-code: 1343-5655, Corresponding Author, marinamaslova2009@mail.ru

Ivan N. Shamshin – Cand. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of Molecular Genetic Analysis of Fruit Plants, <https://orcid.org/0000-0002-4464-1876>, Scopus ID: 56708633300, Researcher ID: AAZ-9047-2021, SPIN-code: 4212-6451

Natalia V. Drenova – Senior Researcher, Scientific and Methodological Department of Bacteriology, <https://orcid.org/0000-0003-4020-2910>, Scopus ID: 55638016500, SPIN-code: 5372-2540

Maxim L. Dubrovsky – Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Laboratory of Selection of Dwarf Clonal Rootstocks and Other Crops, <https://orcid.org/0000-0003-0883-2867>, Scopus ID: 57204561635, SPIN-code: 8307-7988

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-146-153>
УДК: 635.21:631.524.86

О.Г. Казаков¹, О.Б. Поливанова^{1*},
М.К. Деревягина¹, В.А. Бирюкова¹,
С.К. Темирбекова²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха» (ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха») 140051, Россия, Московская область, г.о. Люберцы, д.п. Красково, улица Лорха, дом 23, литера «В»

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии 143050, Россия, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5

*Автор для переписки:
polivanovaoks@gmail.com

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха согласно тематическому плану НИР по теме FGGM-2024-0014.

Вклад авторов: Казаков О.Г.: концептуализация, руководство исследованием, администрирование данных, проведение исследований, создание черновика рукописи. Поливанова О.Б.: верификация данных, формальный анализ, создание рукописи и ее редактирование. Деревягина М.К.: методология, проведения исследований. Бирюкова В.А.: проведение исследований. Темирбекова С.К.: ресурсы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Казаков О.Г., Поливанова О.Б., Деревягина М.К., Бирюкова В.А., Темирбекова С.К. Выявление устойчивых к фитофторозу гибридов картофеля с использованием маркеров *R*-генов и искусственного заражения. *Овощи России*. 2025;(6):146-153. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-146-153>

Поступила в редакцию: 29.09.2025

Принята к печати: 18.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Oleg G. Kazakov¹, Oksana B. Polivanova^{1*},
Marina K. Derevyagina¹, Victoria A. Biryukova¹,
Sulukhan K. Temirbekova²

¹Russian Potato Research Center
23, Lorkha str., letter "B", Moscow region,
Lyubertsy, Kraskovo village, 140051, Russia

²All-Russian Scientific Research Institute
of Phytopathology
Institut str, property 5, Moscow Region,
village Bolshye Vyazemy, 143050, Russia

*Corresponding author: polivanovaoks@gmail.com

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Potatoes named after A.G. Lorkh in accordance with the thematic plan of research on the topic FGGM-2024-0014.

Authors' contribution: Kazakov O.G.: conceptualization, supervision, data curation, investigation, writing – original draft. Polivanova O.B.: validation, formal analysis, writing – review & editing. Derevyagina M.K.: methodology, investigation. Biryukova V.A.: investigation. Temirbekova S.K.: resources.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citations: Kazakov O.G., Polivanova O.B., Derevyagina M.K., Biryukova V.A., Temirbekova S.K. Identification of potato hybrids resistant to late blight using *R*-gene markers and artificial infection. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):146-153. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-146-153>

Received: 29.09.2025

Accepted for publication: 18.11.2025

Published: 18.12.2025

Выявление устойчивых к фитофторозу гибридов картофеля с использованием маркеров *R*-генов и искусственного заражения

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Фитофтороз является заболеванием, сопряженным со значительными экономическими потерями картофеля. Потери от данного заболевания в России в среднем составляют более 4 млн тонн ежегодно. Наиболее оптимальной стратегией по сдерживанию распространения патогена и борьбы с ним является создание устойчивых сортов картофеля, несущих один или несколько *Rpi*-генов в совокупности с высоким уровнем горизонтальной устойчивости. Цель исследования – выделить фитофтороустойчивые генотипы среди гибридов различного генетического происхождения и соотнести их уровень устойчивости с наличием *Rpi*-генов.

Материалы и методы. Объектом исследования были гибриды картофеля различного генетического происхождения, отобранные по хозяйственно-биологическим признакам из 45 комбинаций скрещиваний. Устойчивость к фитофторозу оценивали лабораторным методом, путем искусственного заражения листьев и клубней. Оценка наличия молекулярных маркеров производилась методами ПЦР с использованием ранее опубликованных SCAR-маркеров 5-ти *Rpi*-генов (*R1*, *R2*, *R3a*, *R3b* и *Rpi-blb1* = *Rpi-sto1*).

Результаты. В рамках скрининга было выявлено 24 гибрида с высокой и очень высокой устойчивостью листьев к фитофторозу, большинство из которых несут хотя бы один *Rpi*-ген. Преобладающим среди очень высокоустойчивых и устойчивых образцов является ген *R2*. Ген *R1* чаще встречается в группе гибридов со средней устойчивостью и с отсутствием устойчивости листьев. Уровень устойчивости клубней не зависит от количества и сочетания *Rpi*-генов и, вероятно, контролируется другим набором генов. Полученные результаты отражают сложность взаимодействия генотипа и фенотипа в системе «растение картофель – *Phytophthora infestans*». Для повышения эффективности использования молекулярных маркеров в селекции при получении и отборе фитофтороустойчивых генотипов картофеля необходимо расширить линейку тестируемых маркеров известных *R*-генов, проводить анализ исходных родительских форм, на основании которого вести оценку гибридного потомства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

картофель, *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, устойчивость к фитофторозу, молекулярные маркеры, традиционная и маркер-вспомогательная селекция

Identification of potato hybrids resistant to late blight using *R*-gene markers and artificial infection

ABSTRACT

Relevance. Late blight is a disease associated with significant economic losses in potatoes. Losses from this disease in Russia average over 4 million tons annually. The optimal strategy for containing and combating the spread of the pathogen is the development of resistant potato varieties carrying one or more *Rpi* genes combined with a high level of horizontal resistance.

The aim of research. To identify late blight-resistant genotypes among hybrids of different genetic origins and correlate their resistance level with the presence of *Rpi* genes.

Materials and methods. The study involved potato hybrids of different genetic origins, selected for their agronomic and biological traits from 45 crosses. Resistance to late blight was assessed using a laboratory method, artificially infecting leaves and tubers. The presence of molecular markers was assessed using PCR methods using previously published SCAR markers for five *Rpi* genes (*R1*, *R2*, *R3a*, *R3b*, and *Rpi-blb1* = *Rpi-sto1*).

Results. The screening identified 24 hybrids with high and very high foliar resistance, most of which carried at least one *Rpi* gene. The *R2* gene was predominant among the very highly resistant and resistant samples. The *R1* gene was more common in the group of hybrids with moderate resistance and without leaf resistance. Tuber resistance level does not depend on the number and combination of *Rpi* genes and is likely controlled by a different set of genes. These results reflect the complexity of genotype-phenotype interactions in the potato plant-*Phytophthora infestans* system. To increase the efficiency of using molecular markers in breeding for the production and selection of late blight-resistant potato genotypes, it is necessary to expand the range of tested markers of known *R*-genes and conduct an analysis of the original parental forms, on the basis of which to evaluate the hybrid offspring.

KEYWORDS:

potato, *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, resistance to late blight, molecular markers, traditional and marker-assisted selection



Введение

Фитофтороз (возбудитель оомицет *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) остается одной из самых распространенных и вредоносных болезней картофеля, ежегодные потери в картофелеводческих хозяйствах России составляют более 4 млн тонн. Болезнь наносит серьезный экономический ущерб картофелю, приводя к существенным потерям урожайности – до 70% и более, при этом значительно ухудшается качество клубней [1].

В полевых условиях источниками первичной инфекции фитофтороза являются больные семенные клубни, перезимовавшие в почве ооспоры, а также зооспорангии, принесенные ветром [2]. Дополнительную нагрузку оказывает изменение климата в сторону увеличения безморозного периода, что благоприятно сказывается на сохранении источников первичной инфекции [3].

Борьба с фитофторозом связана со значительными материальными затратами на обработку фунгицидами, что влечет дополнительную экологическую нагрузку на окружающую среду и представляет угрозу для здоровья человека [3]. При этом при росте средней температуры на 1 °C, период применения фунгицидов для защиты картофеля от фитофтороза удлиняется на 10–20 дней, в зависимости от количества осадков [5].

В настоящее время наиболее предпочтительным способом борьбы с *P. infestans* и сдерживания распространения патогена является выведение новых сортов картофеля с долговременной устойчивостью [6]. Устойчивость к фитофторозу исходного материала картофеля и создаваемых на их основе новых сортов, независимо от их конечного целевого использования, остается одной из важнейших задач селекции. Периодически в отдельные годы складываются благоприятные условия для развития болезни. Затяжные дожди, повышенная влажность воздуха и температурные скачки – оптимальные погодные условия для развития фитофтороза. Устойчивые сорта гарантируют существенное снижение рисков потери урожая, задерживая начало и интенсивность развития эпифитотии, и зависимость проведения опрыскивания от погодных условий. Более того, развитие направления органического картофелеводства невозможно без наличия устойчивых к фитофторозу сортов картофеля [2].

Устойчивые к фитофторозу сорта картофеля несут в себе доминантные гены устойчивости к *P. infestans* – *Rpi*-гены. Интрогрессия *Rpi*-генов в сорта культурного картофеля осуществляется от диких видов *Solanum* как методами гибридизации, так и посредством генно-инженерных манипуляций [7]. В настоящее время охарактеризованы более 70 *Rpi*-генов, донором которых потенциально являются 32 диких видов *Solanum*, большинство из которых клубненосные [8]. В практической селекции в основном используют образцы с *Rpi*-генами, источниками которых являются дикие виды картофеля из Северной и Центральной Америки – *S. bulbocastanum* Dunal, *S. demissum* Lindl., *S. stoloniferum* Schldl. [9].

Размножение оомицета *P. infestans* как в бесполой, так и в половой форме в сочетании с быстро эволюционирующими генами-эффекторами *R*, необходимыми для успешной инфекции [10], делает его быстро эволюционирующим патогеном, который легко генерирует новые вирулентные штаммы [11], что значительно

затрудняет выведение устойчивых сортов картофеля. Даже сочетание нескольких генов устойчивости от *S. demissum* в одном сорте не всегда приводит к стабильной резистентности [12]. Пирамидирование различных *Rpi*-генов в сочетании с высокой горизонтальной устойчивостью к патогену фитофтороза картофеля может стать решением для повышения как долговременности, так и уровня устойчивости [13].

Ряд исследователей отмечают, что не только постоянно нарастает вредоносность фитофтороза, но и на 1,0–1,5 месяца сдвинулось проявление первых симптомов заболевания [14]. Это означает, что поражаться начинают растения на начальных этапах онтогенеза, а наличие сильного прессинга фитофтороза увеличивает риск преодоления генов устойчивости. Заражение клубней возможно с самых ранних этапов их формирования и до уборки урожая. Отмечаются также случаи перезаражения в хранилищах. При этом связь степени пораженности клубней с динамикой болезни на листьях не является устойчивой. Сильное поражение клубней возможно как при высокой, так и при низкой степени пораженности листьев [15]. Поэтому необходимо расширять генетическую основу контроля устойчивости, привлекая к созданию исходного родительского материала новые гены.

Учитывая риски, которые обусловлены более ранним возникновением признаков болезни, увеличением скорости развития в течение вегетационного сезона и возможным числом генераций на фоне снижения эффективности принятых ранее методов защиты, возрастает роль генетической устойчивости сортов.

В селекции картофеля при отборе по признаку фитофтороустойчивости ориентируются на полевые и лабораторные оценки признака. При этом новые технологии селекции, основанные на молекулярном маркер-опосредованном отборе, призваны ускорить выделение генотипов, несущих определенные *R*-гены.

Цель исследования – выделить фитофтороустойчивые генотипы среди гибридов различного генетического происхождения и соотнести их уровень устойчивости с наличием и количеством *Rpi*-генов.

Материалы и методы исследований

Материалы исследования. В исследование были включены гибриды картофеля различного генетического происхождения, отобранные по хозяйственно-биологическим признакам из 45 комбинаций скрещиваний. В их происхождении было задействовано 47 исходных родительских форм, 7 форм использовали в прямых и обратных скрещиваниях. Данные о происхождении гибридов представлены в таблице 1.

В рамках оценки лабораторной устойчивости к фитофторозу листьев и клубней было исследовано 60 гибридов 3-го года методом искусственного заражения. Также гибриды были проанализированы на наличие молекулярных маркеров *Rpi*-генов.

Оценка устойчивости листьев к фитофторозу. Оценка листьев производилась методом искусственного заражения изолетом сложного состава (предоставлен Всероссийским научно-исследовательским институтом фитопатологии), включающего гены вирулентности 1,2,3,4,5,6,7...xyz фитофтороза. Для оценки использовали по три листа со среднего яруса, взятые у отдель-

Таблица 1. Молекулярные маркеры, использованные в исследовании
Table 1. Molecular markers used in the study

Наименование маркера	Нуклеотидная последовательность праймеров	Размер ПЦР-продукта, п. о.	Температура отжига, °C	Ссылка
<i>IR1</i>	F: CACTCGTGACATATCCTCACTA R: GTAGTACCTATCTTATTTCTGCAAGAAT	1205	65	[17]
<i>R2</i>	F: GCTCCTGATACGATCCATG R: ACGGCTTCTTGAATGAA	686	54	[18]
<i>R3a</i>	F: TCCGACATGTATTGATCTCCCTG R: AGCCACTTCAGCTTCTTACAGTAGG	1380	64	[19]
<i>R3b</i>	F: GTCGATGAATGCTATGTTTCTCGAGA R: ACCAGTTTCTTGCAATTCCAGATTG	378	64	[19]
<i>Rpi-blb1 = Rpi-sto1</i>	F: ACCAAGGCCACAAGATTCTC R: CCTGCGGTTCCGGTTAATACA	890	65	[20]

ных растений. Суспензия для заражения готовилась из расчета 30-35 тыс. зооспорангий на 1 мл. Лабораторная оценка устойчивости листьев к фитофторозу складывается как средняя между двумя учетами. В ходе первого учета спустя 3 суток после заражения оценивается степень проникновения патогена. В последующие 24 часа определяют динамику распространения патогена в растительной ткани. Для оценки уровня поражения листьев использовалась 9-ти балльная шкала, где наивысший балл характеризовал отсутствие признаков поражения [16].

Оценка устойчивости клубней к фитофторозу. Для заражения клубней использовали инокулюм того же сложного состава, что и для искусственного заражения листьев. Целые клубни, по 5 шт. каждого образца, помещали в суспензию инокулюма (20-25 зооспорангий в поле зрения микроскопа) на 3 минуты. Далее клубни выдерживались в климатической проветриваемой камере (влажность 80-90%, температура 18...20°C) в течение 15 суток, после чего производился учет. Оценивалась как степень поражения поверхности клубня, так и глубина поражения. Устойчивость оценивалась по 9-ти балльной шкале, где 9 – отсутствие признаков фитофтороза как на поверхности, так и на срезе клубня. Опыт проводился в трехкратной повторности [16].

Определение наличия маркеров генов устойчивости к фитофторозу. Оценка наличия молекулярных маркеров производилась методами ПЦР с использованием опубликованных SCAR-маркеров 5-ти *Rpi*-генов (*R1*, *R2*, *R3a*, *R3b* и *Rpi-blb1* = *Rpi-sto1*) [17, 18, 19, 20]. Информация о нуклеотидных последовательностях праймеров для проведения ПЦР представлена в таблице 1.

Таблица 2. Результаты теста Шапиро-Уилка
Table 2. Shapiro-Wilk test results

Переменная	W	p-value
Количество R-генов	0,806	1.946e-11<0,05
Баллы устойчивости листьев	0,966	0,09>0,05
Баллы устойчивости клубней	0,908	0,0002<0,05

На первом этапе производили экстракцию геномной ДНК из ткани листа с использованием СТАВ-буфера. Ткань листа (навеска около 0,75 г) измельчали с использованием пестика и ступки, после чего около 100 мг измельченной ткани переносили в микроцентрифужную пробирку с 600 мкл экстракционного буфера (50 mM Трис, pH 8; 0,7 M NaCl; 10 mM ЭДТА; 1% СТАВ). Образцы инкубировали в течение 1 часа, периодически перемешивая с помощью вортекса. После инкубации следовало центрифугирование при 20000 g в течение 10 минут. Супернатант переносили в новые пробирки, добавляли 800 мкл смеси хлороформ : изоамиловый спирт (24:1), перемешивали, переворачивая пробирки, и центрифугировали 5 минут при 15000 g. После центрифугирования отбирали водную фазу и производили осаждение ДНК изопропанолом (1,5 объема). Промыву ДНК осуществляли 70 % этанолом. Полученную ДНК растворяли в 50 мкл ТЕ-буфера.

ПЦР-амплификацию осуществляли при параметрах, соответствующих используемым парам праймеров. Объем реакционной смеси для ПЦР составлял 25 мкл и включал 1× реакционный буфер, 0,25 mM дНТФ, 2,5 mM хлорида магния, 0,2 μM каждого из праймеров, 1 ед. Таq-полимеразы и геномную ДНК (около 10 нг на реакцию). При проведении ПЦР использовались следующие параметры амплификации: начальная денатурация – 95°C в течение 5 минут; денатурация (94°C, 30 секунд), отжиг праймеров (соответствующая температура отжига, 20 секунд), элонгация (72°C, 30 секунд) – 35 циклов; финальная элонгация – 72°C в течение 5 минут.

Разделение продуктов амплификации производилось в 1,5% агарозном геле, окрашенном бромидом этидия с последующей визуализацией с использованием трансиллюминатора.

Статистическая обработка полученных данных. Полученные экспериментальные данные были обработаны с использованием R и Excel. Цель анализа – оценить, связано ли

наличие и количество идентифицированных маркеров R-генов с балльной оценкой проявления признака устойчивости клубней и листьев. Нулевая гипотеза – отсутствие связи между наличием/количеством R-генов и баллом устойчивости. На первом этапе производилась оценка нормальности распределения с помощью теста Шапиро-Уилка, результаты которой представлены в таблице 2.

Так как распределение отличается от нормального для большинства из переменных, для оценки корреляции использовался коэффициент Спирмена. Для определения, связано ли наличие R-генов с уровнем проявления признака, использовался тест Манна-Уитни.

Результаты исследований

В 2024 году развитие фитофтороза в полевых условиях было незначительным, разница по этому показателю между устойчивыми и восприимчивыми образцами не проявилась. Данные по устойчивости гибридов картофеля были получены в лабораторных условиях методом искусственной инокуляции.

Результаты лабораторной оценки листьев и клубней представлены в таблице 3. Среди 60 гибридов 3-го года по устойчивости листьев к фитофторозу наибольшую группу составили генотипы со средней устойчивостью – 18 шт., с высокой устойчивостью – 14 шт., очень высокой – 11 шт. и 17 гибридов показали низкую и очень низкую устойчивость. По устойчивости клубней к фитофторозу наибольшую группу составили гибриды с низкой устойчивостью – 20 шт., с высокой устойчивостью – 12 шт., очень высокой – 17 шт. и 12 гибридов показали среднюю устойчивость.

При этом уровень устойчивости листьев и клубней сочетался в одном генотипе по-разному. Гибриды 3069-380-22 и 3016-290-22 сочетали оба компонента устойчивости на очень высоком уровне, их балл устойчивости по листьям и клубням составил 8,1 и 9,0 соответственно. Остальные гибриды с очень высокой устойчивостью листьев к фитофторозу имели высокую, среднюю и низкую устойчивость клубней. В то же время генотипы с очень высокой устойчивостью клубней также имели высокую, среднюю и низкую устойчивость листьев.

В группе высокоустойчивых гибридов оценка поражения листьев фитофторозом в лабораторных условиях составила от 6,1 до 8,0 баллов. Клубни 2-х гибридов были высокоустойчивы, 6 гибридов – со средней устойчивостью и 4 – с низкой. По сочетанию этих показателей на высоком уровне выделились гибриды 3070-20-м-22 (Austin x Brooke), 3042-32-0-22 (Д5 x Варяг), 3072-26-м-22 (8х-2 x BP 808).

Группы гибридов со средней и низкой устойчивостью листьев к фитофторозу оказались самыми многочисленными по количеству образцов – 18 и 17 форм соответственно. В обеих группах имелись образцы с грацией устойчивости клубней от очень высокой до очень низкой.

Наличие гибридов, сочетающих устойчивость к фитофторозу листьев и клубней в разных вариантах, подтверждает слабую их корреляцию. Расчет коэффициента корреляции между устойчивостью листьев и клубней в анализируемой выборке гибридов имел слабое отрицательное значение – 0,01. То есть оба компонента устойчивости сочетаются в одном генотипе как независимые признаки, предположительно контролируемые разными генетическими системами, хотя ранее были представлены доказательства того, что устойчивость листьев и клубней может быть обусловлена одним и тем же аллелем [21]. В других исследованиях также отмечено, что устойчивость листьев не всегда коррелирует с устойчивостью клубней [22, 23, 24]. Поэтому для отбора генотипов, сочетающих данные признаки на высоком уровне, требуется получение и анализ большого объема гибридного материала. В то же время наблюдается сильная положительная корреляция (коэффициент 0,8) между первоначальным заражением поверхности листа или клубня и последующим распространением патогена.

Таблица 3. Происхождение и лабораторная оценка устойчивости к фитофторозу листьев и клубней гибридов картофеля 3-го года, 2024 год
 Table 3. Origin and laboratory evaluation of resistance to late blight of leaves and tubers of potato hybrids of the 3rd year, 2024

№ п/п	Селекционный номер	Происхождение	Листья, балл			Клубни, балл		
			1-ый учёт	2-ой учёт	Общая оценка	Поверхность	Срез	Общая оценка
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3001-13м-22	Brooke x Евпатий	6,0	3,4	4,7±1,8	9,0	9,0	9,0±0
2	3004-25о-22	715 x Сюрприз	6,3	3,9	5,1±1,7	7,3	8,3	7,8±0,7
3	3006-13м-22	Brooke x Евпатий	6,2	4,1	5,1±1,5	9,0	9,0	9,0±0
4	3007-11о-22	1018 x Сюрприз	8,7	6,9	7,8±1,3	2,3	4,7	3,5±1,7
5	3008-24о-22	1049 x Сюрприз	8,6	7,7	8,1±0,6	7,3	7,3	7,3±0
6	3011-34м-22	Надежда x Austin	8,2	7,2	7,7±0,7	5,0	5,7	5,3±0,5
7	3013-45м-22	Северное сияние x Adirondack Red	8,6	7,6	8,1±0,7	1,0	2,3	1,7±0,9
8	3015-25о-22	715 x Сюрприз	5,6	2,0	3,8±2,5	8,0	7,7	7,8±2,1
9	3016-29о-22	552 x 46-98-6	8,7	7,7	8,2±0,7	9,0	9,0	9,0±0
10	3017-35о-22	43В x 36-1к	6,2	2,7	4,4±2,5	3,7	2,3	3,0±1,0
11	3019-11о-22	1018 x Сюрприз	6,0	3,7	4,8±1,6	1,7	3,3	2,5±1,1
12	3020-15м-22	Северн. сияние x 3	4,3	1,0	2,7±2,3	1,0	4,3	2,7±2,3
13	3021-45м-22	Северное сияние x Adirondack Red	3,0	1,0	2,0±1,4	3,7	4,3	4,0±0,4
14	3022-47м-22	Newton x BP 808	5,3	2,0	3,7±2,3	6,3	8,0	7,2±1,2
15	3024-39м-22	Варяг x 4 CIP	6,6	4,7	5,6±1,3	8,7	8,7	8,7±0
16	3025-34м-22	Надежда x Austin	6,7	5,0	5,8±1,2	9,0	9,0	9,0±0
17	3026-22м-22	4CIP x Brooke	6,7	3,4	5,1±2,3	9,0	9,0	9,0±0
18	3028-22м-22	4CIP x Brooke	6,0	2,0	4,0±2,8	9,0	9,0	9,0±0
19	303032-м-22	Северное сияние x Евпатий	6,7	4,3	5,5±1,7	1,0	3,7	2,3±1,9
20	3031-39м	Варяг x 4 CIP	6,6	6,2	6,4±0,3	4,3	3,7	4,0±0,4
21	3032-25о-22	715 x Сюрприз	6,0	3,0	4,5±2,1	7,7	7,7	7,7±0
22	3033-40м-22	BP808 x Austin	6,6	4,2	5,4±1,7	9,0	9,0	9,0±0
23	3034-617о-21	4421-13 x Blue Congo	6,8	5,8	6,3±0,7	3,3	4,7	4,0±1,0
24	3036-13м-22	Brooke x Евпатий	6,1	4,7	5,4±1,0	9,0	9,0	9,0±0
25	3038-25о-22	715 x Сюрприз	5,0	1,0	3,0±2,8	5,0	5,0	5,0±0
26	3040-36о-22	74В x 36-1к	6,9	3,7	5,3±2,3	3,7	4,3	4,0±0,4
27	3042-32о-22	Д5 x Варяг	7,1	5,3	6,2±1,3	6,7	6,0	6,3±0,5
28	3045-36о-22	74В x 36-1к	7,6	5,7	6,6±1,3	4,3	5,0	4,7±0,5
29	3047-36о-22	74В x 36-1к	9,0	8,8	8,9±0,1	1,0	1,0	1,0±0
30	3049-26м-22	8х-2 x BP 808	7,1	6,0	6,6±0,8	5,0	7,0	6,0±1,4
31	3051-36о-22	74В x 36-1к	4,8	1,8	3,3±2,1	2,3	2,3	2,3±0
32	3055-617о-21	4421-13 x Blue Congo	2,1	1,0	1,6±0,8	1,0	1,0	1,0±0
33	3056-679о-21	Piroska x №27	7,4	5,2	6,3±1,6	1,0	3,0	2,0±1,4
34	3057-27о-22	1063 x ПС153-25	5,7	2,0	3,8±2,6	1,0	1,0	1,0±0
35	3061-44м-22	Innovator x 36-1	2,1	1,0	1,6±0,8	7,7	7,7	7,7±0
36	3062-610о-21	Piroska x №16	8,9	8,3	8,6±0,4	6,0	6,7	6,3±0,5
37	3067-46м-22	4 CIP x Евпатий	6,8	5,6	6,2±0,8	9,0	9,0	9,0±0
38	3068-26о-22	42-18(о)1 x 66-18	6,0	3,4	4,7±1,8	3,7	6,3	5,0±1,8
39	3069-38о-22	20412-5 x гала	8,9	7,6	8,2±0,9	9,0	9,0	9,0±0
40	3070-20м-22	Austin x Brooke	7,1	5,4	6,3±1,2	9,0	9,0	9,0±0
41	3071-22о-22	135м x Сюрприз	5,8	1,7	3,7±2,3	8,7	8,7	8,7±0
42	3072-26м-22	8х-2 x BP 808	7,2	5,1	6,2±1,5	6,7	6,0	6,3±0,5
43	3073-55о-22	64м x IVP48	6,1	5,0	5,6±0,8	1,0	3,0	2,0±1,4
44	3075-21о-22	1049 x ПС153-25	9,0	9,0	9,0±0	5,3	6,3	5,8±0,7
45	3077-44м-22	Innovator x 36-1	6,1	1,0	3,6±3,6	8,7	8,7	8,7±0
46	3078-10о-22	1049 x 1034	9,0	8,6	8,8±0,3	7,7	7,7	7,7±0
47	3079-679о-21	Piroska x №27	9,0	8,3	8,7±0,5	6,0	6,0	6,0±0
48	3081-36о-22	74В x 36-1к	6,8	5,8	6,3±0,7	5,0	5,0	5,0±0
49	3083-55о-22	64м x IVP48	6,0	4,0	5,0±1,4	2,3	3,7	3,0±1,0
50	3085-4о-22	1034 x Сюрприз	7,0	4,7	5,8±1,6	2,3	6,0	4,2±2,6
51	3086-10о-22	1049 x 1034	7,8	4,7	6,2±2,2	3,7	4,7	4,2±0,7
52	3087-610о-21	Piroska x №16	9,0	8,0	8,5±0,7	3,7	3,0	3,3±0,5
53	3089-15-11	66-18 x ПС153-25	5,2	1,0	3,1±3,0	9,0	9,0	9,0±0
54	3090-18м-22	Lady Claire x Brooke	3,3	1,0	2,2±1,6	6,3	6,3	6,3±0
55	3098-10о-22	1049 x 1034	7,1	5,0	6,1±,5	3,7	5,7	4,7±1,4
56	3103-5о-22	П153-25 x Сюрприз	5,8	2,3	4,1±2,5	1,0	5,0	3,0±2,8
57	3104-21о-22	1049 x ПС153-25	5,4	1,0	3,2±3,1	9,0	9,0	9,0±0
58	3105-619о-21	4421-13 x Blue Congo	6,3	1,0	3,7±3,7	3,3	4,3	3,8±0,7
59	3112-21о-22	1049 x ПС153-25	9,0	8,6	8,8±0,3	5,3	7,0	6,2±1,2
60	3113-18о-22	705 x ПС153-25	6,0	1,0	3,5±3,5	8,7	8,7	8,7±0

– очень высокоустойчивый (8,1-9,0 баллов);

– высокоустойчивый (6,1-8,0 баллов)

– среднеустойчивый (4,1-6,0 баллов)

– низкая устойчивость (2,1-4,0 балла)42

Таблица 4. Наличие маркеров генов устойчивости к фитофторозу
 Table 4. Presence of markers of genes for resistance to late blight

№	Селекционный номер	Маркеры генов устойчивости к фитофторозу			
		R1-1250	R2-686	R3a-1380	R3b-378
		ген R1	ген R2	ген R3a	ген R3b
1	3001-13м-22	-	-	-	-
2	3004-25о-22	-	-	-	-
3	3006-13м-22	+	-	-	-
4	3007-11о-22	-	+	-	-
5	3008-24о-22	-	+	-	-
6	3011-34м-22	+	+	+	+
7	3013-45м-22	-	-	-	-
8	3015-25о-22	-	-	-	-
9	3016-29о-22	-	+	-	-
10	3017-35о-22	-	-	-	-
11	3019-11о-22	-	-	-	-
12	3020-15м-22	-	-	-	-
13	3021-45м-22	-	-	-	-
14	3022-47м-22	-	-	+	+
15	3024-39м-22	-	-	-	-
16	3025-34м-22	-	-	+	+
17	3026-22м-22	+	-	-	-
18	3028-22м-22	-	-	-	-
19	3030-32м-22	-	-	-	-
20	3031-39м	-	-	-	-
21	3032-25о-22	-	-	-	-
22	3033-40м-22	+	-	-	-
23	3034-617о-21	-	-	-	-
24	3036-13м-22	+	-	-	-
25	3038-25о-22	-	-	-	-
26	3040-36о-22	-	-	-	-
27	3042-32о-22	-	-	+	+
28	3045-36о-22	+	-	-	-
29	3047-36о-22	+	+	-	-
30	3049-26м-22	+	+	-	-
31	3051-36о-22	+	-	-	-
32	3055-617о-21	-	-	-	-
33	3056-679о-21	-	-	+	+
34	3057-27о-22	-	-	-	+
35	3061-44м-22	+	-	-	-
36	3062-610о-21	-	+	+	+
37	3067-46м-22	-	-	-	-
38	3068-26о-22	-	+	-	+
39	3069-38о-22	-	-	-	-
40	3070-20м-22	-	-	-	-
41	3071-22о-22	+	-	-	-
42	3072-26м-22	+	-	-	-
43	3073-55о-22	-	-	-	-
44	3075-21о-22	-	+	-	-
45	3077-44м-22	-	-	-	+
46	3078-10о-22	+	+	-	-
47	3079-679о-21	-	+	-	-
48	3081-36о-22	+	-	-	-
49	3083-55о-22	+	-	-	-
50	3085-4о-22	-	-	-	-
51	3086-10о-22	+	+	-	+
52	3087-610о-21	-	+	-	+
53	3089-15-1-1	+	-	-	-
54	3090-18м-22	-	-	-	-
55	3098-10о-22	+	-	-	+
56	3103-5о-22	-	-	-	-
57	3104-21о-22	-	-	-	+
58	3105-619о-21	-	-	-	-
59	3112-21о-22	-	+	-	+
60	3113-18о-22	-	-	-	-

Часто генотипы с устойчивой ботвой имеют менее устойчивые клубни и в эпифитотийные годы оказываются сильно пораженными из-за длительного периода их контакта с патогеном, чем клубни менее устойчивых по ботве сортов. Поэтому высокая полевая устойчивость клубней к фитофторозу наиболее предпочтительна для производства [16].

Данные 1-го и 2-го учета устойчивости листьев показывают, что гибриды с итоговой оценкой менее 6,0 баллов, как правило, характеризуется средней устойчивостью к проникновению патогена и интенсивным распространением со значительными участками поражения на поверхности листа.

Устойчивые генотипы с оценкой более 6,0 баллов имеют высокую степень сопротивления к проникновению инфекции и сдержанную динамику ее дальнейшего распространения. Высокоустойчивые генотипы хорошо сопротивляются как проникновению, так и распространению патогена в ткани листа.

Программы селекции картофеля с устойчивостью к фитофторозу в настоящее время включают в себя стратегии с применением молекулярных маркеров, чтобы оценить возможность объединения нескольких генов устойчивости.

Подвергнутые лабораторной оценке гибриды были проанализированы на наличие молекулярных маркеров, ассоциированных с *Rpi*-генами. Гены *R1*, *R2*, *R3a* и *R3b* принадлежат дикому виду *S. demissum*, который широко ранее использовался для получения устойчивых к фитофторозу сортов картофеля. Данные гены принадлежат к классу CC-NB-LR [17] и отвечают за специфическое распознавание патогена и неспецифические защитные реакции растения. Однако данный тип устойчивости преодолевается появлением новых рас патогена [25].

Ген *Rpi-blb1* был впервые идентифицирован у *Solanum bulbocastanum*, как часть кластера из 4-х паралогов. Высококонсервативный гомолог *Rpi-blb1* был позднее выявлен в геноме *Solanum stoloniferum* [26].

Результаты оценки представлены в таблице 4.

В анализируемой выборке не было выявлено маркеров генов *Rpi-blb1*. Все обнаруженные маркеры связаны с *S. demissum*. Наиболее распространенным геном в представленной выборке является ген *R1* (идентифицирован у 17 образцов); гены *R2* и *R3b* были выявлены у 15 и 13 гибридов соответственно. Наименее распространенным геном является ген *R3a* – его наличие было подтверждено у трех образцов. У двух гибридов было выявлено сочетание из 3-х *R*-генов. Гибрид 3086-10о-22, имеющий генотип *R1+R2+R3b*, отличается высокой устойчивостью листьев в сочетании со средней устойчивостью клубней.

Гибрид 3062-610о-21 сочетает в себе гены *R2*, *R3a* и *R3b* и отличается очень высоким уровнем устойчивости листьев и высоким уровнем устойчивости клубней. Образец под селекционным номером 3011-34м-22, имея 4 гена устойчивости (*R1+R2+R3a+R3b*), также характеризуется высокой устойчивостью листьев и средней устойчивостью клубней.

Таблица 5. Частота встречаемости генотипов в анализируемой выборке

Table 5. Frequency of occurrence of genotypes in the analyzed sample

Генотип	Число образцов	Частота встречаемости
<i>R1</i>	13	0,216667
<i>R2</i>	5	0,083333
<i>R3b</i>	3	0,05
<i>R1+R2</i>	3	0,05
<i>R1+R3b</i>	1	0,016667
<i>R2+R3a</i>	1	0,016667
<i>R2+R3b</i>	3	0,05
<i>R3a+R3b</i>	4	0,066667
<i>R1+R2+R3b</i>	1	0,016667
<i>R2+R3a+R3b</i>	1	0,016667
<i>R1+R2+R3a+R3b</i>	1	0,016667
Маркеры <i>R</i> -генов не выявлены	24	0,4

Соотношение уровня устойчивости листьев по лабораторным тестам с количеством выявленных *R*-генов показано на рисунке 1. У большинства очень высокоустойчивых и устойчивых гибридов выявлено наличие хотя бы одного *R*-гена. Преобладающим среди очень высокоустойчивых и устойчивых образцов является ген *R2*. Ген *R1* чаще встречается в группе гибридов со средней устойчивостью и с отсутствием устойчивости. Примечательно, что среди среднеустойчивых и неустойчивых гибридов, несущих маркеры *R*-генов, практически отсутствуют образцы, имеющие маркер гена *R2*, за исключением одного среднеустойчивого гибрида.

Результаты статистических тестов представлены в таблице 6.

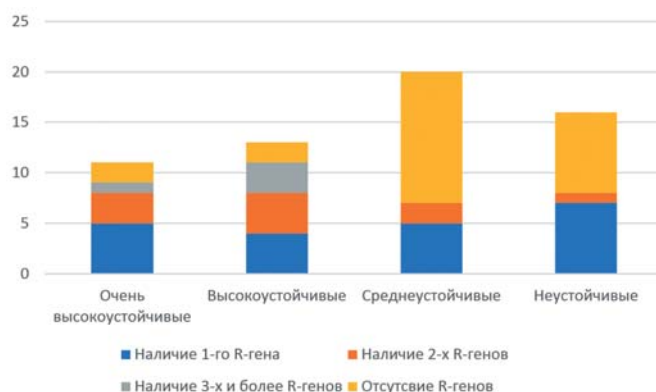


Рис. 1. Диаграмма распределения гибридов картофеля по уровню устойчивости ботвы к фитофторозу в зависимости от количества выявленных *R*-генов
Fig. 1. Distribution diagram of potato hybrids by the level of resistance of tops to late blight depending on the number of identified *R*-genes

Полученные данные демонстрируют, что уровень устойчивости листьев в лабораторных тестах умеренно связан с количеством выявленных *R*-генов (коэффициент корреляции Спирмена – 0,387), при этом данная корреляция является статистически значимой ($p < 0,05$).

На рисунке 2 представлена диаграмма распределения гибридов по уровню устойчивости клубней в зависимости от количества и наличия *R*-генов. Среди очень высокоустойчивых по клубням гибридов наиболее распространен ген *R1*, как и во всей исследуемой выборке.

Анализ данных продемонстрировал слабую и статистически не значимую связь между количеством *R*-генов и уровнем устойчивости клубней ($\rho = 0,109$, $p > 0,05$). Предположительно, устойчивость клубней к фитофторозу определяется генами, которые к настоящему времени не являются достаточно изученными.

Полученные данные демонстрируют, что образцы, имеющие 1 и более *R*-ген, отличаются большим баллом устойчивости листьев (рисунок 3А). Для устойчивости клубней различий в баллах между группами, несущими хотя бы один *R*-ген, и группами без *R*-генов не являются статистически значимыми (рисунок 3В).

Таким образом, можно предположить, что *R*-гены, донором которых является *S. demissum*, обуславливают устойчивость листьев картофеля, но не клубней. Аддитивный эффект от наличия нескольких *Rpi*-генов может быть отмечен в случае листьев, однако для более достоверных выводов необходимо большее количество изученных гибридов с разным сочетанием *R*-генов. Полученные результаты согласуются с ранее опубликованными данными по влиянию других *R*-генов на устойчивость листьев и клубней.

Например, в работе [27] было показано, что трансгенные растения картофеля, трансформированные геном *Rpi-blb1*, отличаются высоким уровнем устойчивости листьев и отсутствием проявления устойчивости в клубнях. В исследовании [28], было показано, что наличие маркеров генов *Rpi-blb1* и *Rpi-bt1* коррелировало с устойчивостью ботвы, но не клубней. Это может быть

Таблица 6. Результаты статистических тестов
Table 6. Results of statistical tests

Зависимость	Rho/W	p-value
Оценка корреляции Спирмена		
Устойчивость листьев и количество R-генов	Rho=0,387	0,002
Устойчивость клубней и количество R-генов	Rho=0,109	0,408
Тест Манна-Уитни		
Устойчивость листьев и наличие R-генов	W=279	0,015
Устойчивость клубней и наличие R-генов	W=369	0,278

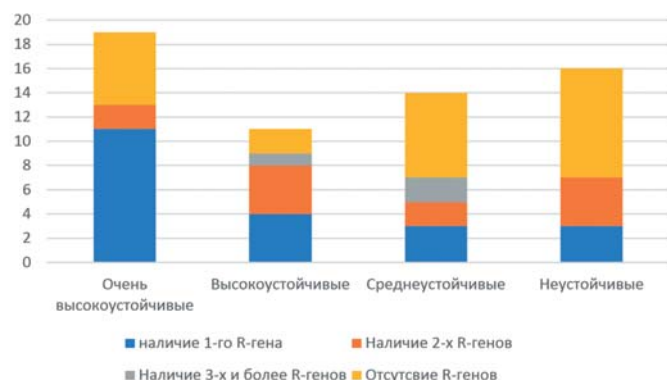


Рис. 2. Диаграмма распределения гибридов картофеля по уровню устойчивости клубней к фитофторозу в зависимости от количества выявленных R-генов

Fig. 2. Distribution diagram of potato hybrids by the level of tuber resistance to late blight depending on the number of identified R-genes

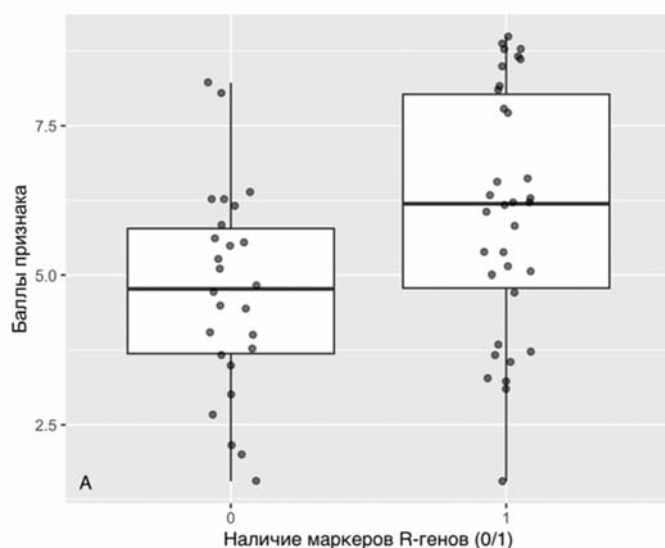
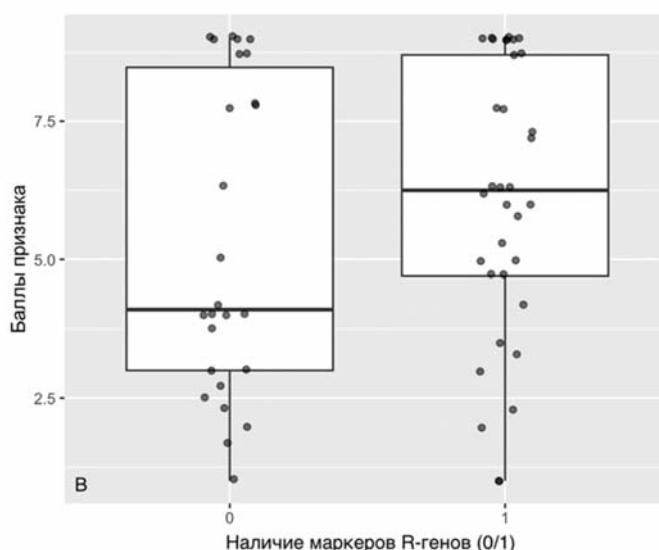


Рис 3. Распределение баллов признака устойчивости листьев (А) и клубней. (В) в группах с наличием и отсутствием R-генов
Fig. 3. Распределение баллов признака устойчивости листьев (А) и клубней. (В) в группах с наличием и отсутствием R-генов



связано с недостаточным уровнем экспрессии соответствующих генов в клубнях или тканеспецифическим характером экспрессии. Полученные результаты отражают сложные взаимодействия фенотипа и генотипа в системе «растение картофеля – *Phytophthora infestans*».

Заключение

В данной работе, методом искусственного заражения в лабораторных условиях, была определена устойчивость гибридов картофеля к фитофторозу, которая была соотнесена с наличием в их генотипе молекулярных маркеров некоторых *Rpi*-генов.

Учитывая, что на сегодня известно более 20 генов, контролирующих расоспецифическую устойчивость к фитофторозу, то их

пирамидирование в одном генотипе может стать бесконечным с практической точки зрения процессом. По нашему мнению, оптимальным решением является сосредоточиться на создании сортов для конкретных природно-климатических условий на основании данных о генотипическом составе патогена.

Отбор по молекулярным маркерам устойчивости к фитофторозу является потенциально эффективным инструментом селекции для оценки гибридного материала картофеля. Для этого необходимо расширять линейку используемых маркеров известных *R*-генов при массовом скрининге генотипов, включая маркеры генов, донорами которых является не только *S. demissum*, а другие дикие виды-доноры перспективных генов, такие как *S. bulbocastanum*, *S. berthaultii*, *S. stoloniferum*. Устойчивость, обусловленная генами от *S. demissum* является расоспецифической и во многом была преодолена появлением новых вирулентных штаммов патогена [29]. Интродукция генов *R1*, *R2* и *R3* в культурный картофель активно осуществлялась еще в середине 20 века, многие широко культивируемые на территории Европы сорта несут один или несколько этих генов [30, 31]. С другой стороны, важно уделить внимание анализу исходных родительских форм на наличие маркеров *Rpi*-генов. Это позволит значительно снизить объем анализируемого гибридного материала, если в исходных родительских формах интересные маркеры отсутствуют.

Генотипы сортов картофеля несут обе устойчивости: вертикальную (абсолютная) и горизонтальную (частичная). Достигнуть длительной устойчивости на основе только одних *R*-генов невозможно из-за появления вирулентных рас. Поэтому применение молекулярных маркеров в сочетании с полевой и лабораторной оценкой являются оптимальными при отборе фитофтороустойчивых гибридов.

Использование молекулярных маркеров для отбора растений имеет очевидные выгоды, связанные с экономией финансовых и трудовых затрат на выращивание большого количества гибридного материала и его фитопатологической оценки традиционными методами. В тоже время при создании сортов в первую очередь идет отбор на основании оценки клубней и потом наиболее качественные и урожайные в этом отношении генотипы оцениваются по признакам устойчивости с применением лабораторных методов и полевой оценки.

На данном этапе представляется наиболее эффективным использовать маркеры для подбора исходных родительских форм.

• Литература / References

1. Информационный листок Россельхозцентра. № 22/2025 г., Исх. № 1-8/2610 от 01.08.2025 г.
2. <https://potatosystem.ru/osobennosti-razvitiya-fitoftoroza/> (дата обращения 15.06.25)
3. <https://www.agroxxi.ru/mirovye-agronovosti/ezhegodno-3-demonstracionnyh-polja-kartofelja-s-ustoichivostyu-k-fitoftore-zakladyvayutsja-v-niderlandah.html> (дата обращения 15.06.25)
4. Bagchi P., Sawicka B., Stamenkovic Z., Markovic D., Bhattacharjee D. Potato Late Blight Outbreak: A Study on Advanced Classification Models Based on Meteorological Data. *Sensors*. 2024;24:7864. <https://doi.org/10.3390/s24237864>
5. Kaukoranta T. Impact of global warming on potato late blight: risk, yield loss and control. *Agricultural and Food Science*. 1996;(5):311-327.
6. Rogozina E.V., Beketova M.P., Muratova O.A., Kuznetsova M.A., Khavkin E.E. Stacking Resistance Genes in Multiparental Interspecific Potato Hybrids to Anticipate Late Blight Outbreaks. *Agronomy*. 2021;11(1):115. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010115>
7. Gaiero P., Speranza P.R., De Jong H. Introgressive hybridization in potato revealed by novel cytogenetic and genomic technologies. *Am. J. Potato Res.* 2018;95:607–621.
8. Paluchowska P., Śliwka J. & Yin Z. Late blight resistance genes in potato breeding. *Planta*. 2022;255: 127. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03910-6>
9. Muratova (Fadina) O.A., Beketova M.P., Kuznetsova M.A., Rogozina E.V., Khavkin E.E. South American species *Solanum alandiae* Card. and *S. okadae* Hawkes et Hjerting as potential sources of genes for potato late blight resistance. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2020;181(1):73-83. (In Russ.) <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2020-1-73-83>
10. <https://elibrary.ru/nruqfx>
11. Haas B.J., Kamoun S., Zody, M.C., Jiang R.H.Y., Handsaker R.E., Cano L.M., Nusbaum C. Genome sequence and analysis of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans*. *Nature*. 2009;461(7262):393–398. <https://doi.org/10.1038/nature0835>
12. Su Y., Viquez-Zamora M., den Uil D. et al. Introgression of Genes for Resistance against *Phytophthora infestans* in Diploid Potato. *Am. J. Potato Res.* 2020;97:33–42. <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09741-8>
13. Fry W. *Phytophthora infestans*: The plant (and R gene) destroyer. *Molecular Plant Pathology*. 2008;9:385–402.
14. Khavkin E.E., Rogozina E.V., Kuznetsova M.A. Breeding of unique donors from interspecific potato hybrids by dna marker-assisted pyramiding of late blight resistance genes. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2018;32(7):21–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10705>
15. <https://elibrary.ru/uyyiwz>
16. FAOSTAT [Web resource] URL: <https://www.fao.org/faostat/r/#data/QCL>. Access date: 20.12.25
17. Filippov A.V. Potato late blight. Supplement to the journal "Plant Protection and Quarantine". 2012;5. (In Russ.)
18. Guidelines for the evaluation of potato breeding material for resistance to late blight, rhizoctonia, bacterial diseases and mechanical damage. [Prepared by Yu.I. Schneider et al.]. Moscow, 1980. 53 p. (In Russ.)
19. Sokolova E., Pankin A., Beketova M., Kuznetsova M., Spiglazova S., Rogozina E. et al. SCAR markers of the R-genes and germplasm of wild *Solanum* species for breeding late blight-resistant potato cultivars. *Plant Genet Res.* 2011;9(2):309–12. <https://doi.org/10.1017/S1479262111000347>
20. Kim H.J., Lee H.R., Jo K.R., Mortazavian S.M.M., Huigen D.J., Evenhuis B., et al. Broad spectrum late blight resistance in potato differential set plants MaR8 and MaR9 is conferred by multiple stacked R genes. *Theor Appl Genet.* 2012;124(5):923–935.
21. Rietman H., Bijsterbosch G., Cano L.M., Lee H.-R., Vossen J.H., Jacobsen E., Visser R.G.F., Kamoun S., Vleeshouwers V.G.A.A. Qualitative and quantitative late blight resistance in the potato cultivar Sarpo mira is determined by the perception of five distinct RXLR effectors. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 2012;25:910–919. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-12-0010-R>
22. Haesaert G., Vossen J.H., Custers R., De Loose M., Haverkort A., Heremans B., Hutten R., Kessel G., Landschoot S., van Droogenbroeck B. et al. Transformation of the potato variety Desiree with single or multiple resistance genes increases resistance to late blight under field conditions. *Crop. Prot.* 2015;77:163–175.
23. Bradshaw J.E., B. Pande G.J., Bryan C.A., Hackett K. McLean, H.E. Stewart, and R. Waugh. Interval mapping of quantitative trait loci for resistance to late blight [*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary], height and maturity in a tetraploid population of potato (*Solanum tuberosum* subsp. *Tuberosum*). *Genetic*. 2004; Oct;168(2):983–995. <https://doi.org/10.1534/genetics.104.030056>
24. Simko, I., S. Costanzo, V. Ramanjulu, B.J. Christ, and K.G. Haynes. Mapping polygenes for tuber resistance to late blight in a diploid *Solanum phureja* × *S. stenotomum* hybrid population. *Plant Breeding*. 2006;125(4):385–389. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2006.01232.x>
25. Liu Z., Halterman D. Different genetic mechanisms control foliar and tuber resistance to *Phytophthora infestans* in wild potato *Solanum verrucosum*. *American Journal of Potato Research*. 2009;86:476–480.
26. Mayton H., Griffiths H.I., Simko S., Cheng J., Lorenzen W., De Jong, Fry W.E. Foliar and tuber late blight resistance in a *Solanum tuberosum* breeding population. *Plant Breeding*. 2010;129(2):197–201. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2009.01671.x>
27. Beketova M.P., Drobyazina P.E. & Khavkin E.E. The R1 gene for late blight resistance in early and late maturing potato cultivars. *Russ J Plant Physiol.* 2006;53:384–389. <https://doi.org/10.1134/S1021443706030149>
28. Wang M., Allefs S., van den Berg R.G. et al. Allele mining in *Solanum*: conserved homologues of Rpi-blb1 are identified in *Solanum stoloniferum*. *Theor Appl Genet.* 2008;116:933–943. <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0725-3>
29. Halterman D.A., Kramer L.C., Wielgus S., Jiang, J.M. Performance of Transgenic Potato Containing the Late Blight Resistance Gene RB. *Plant Disease*. 2008;92:339-343. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-3-0339>
30. Chen S.H., Borza T., Byun B., Coffin R., Coffin J., Peters R. and Wang-Pruski, G. DNA Markers for Selection of Late Blight Resistant Potato Breeding Lines. *American Journal of Plant Sciences*. 2017;8:1197-1209. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.86079>
31. Jo K.R., Kim C.J., Kim S.J., Kim T.Y., Bergervoet M., Jongsma M.A., Visser R.G., Jacobsen E., Vossen J.H. Development of late blight resistant potatoes by cisgene stacking. *BMC Biotechnol.* 2014; 14: 50. <https://doi.org/10.1186/1472-6750-14-50>
32. Black W., Mastenbroek C., Mills W.R., Peterson L.C. A proposal for an international nomenclature of races of *Phytophthora infestans* and of genes controlling immunity in *Solanum demissum* derivatives. *Euphytica*. 1953;2:173–179. <https://doi.org/10.1007/BF00053724>
33. Malcolmson J.F. Races of *Phytophthora infestans* occurring in Great Britain. *Trans Br Mycol Soc.* 1969;53:417–423. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(69\)80099-9](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(69)80099-9)

Об авторах:

Олег Геннадьевич Казаков – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории клеточных и геномных технологий,

<https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>,
SPIN-код: 7011-6863, kazakov-og@yandex.ru

Оксана Борисовна Поливанова – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории клеточных и геномных технологий, <https://orcid.org/0000-0002-3992-5452>,
SPIN-код: 1731-5221, автор для переписки, polivanovaoks@gmail.com

Марина Константиновна Деревягина – кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории защиты растений, <https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>,
SPIN-код: 4834-7461, vzeyruk@mail.ru

Виктория Александровна Бирюкова – кандидат биол. наук, ведущий сотрудник лаборатории клеточных и геномных технологий генома, <https://orcid.org/0000-0001-7521-6883>,
SPIN-код: 2393-5849, vika_biryukova@inbox.ru

Сулухан Кудайбердиевна Темирбекова – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией по селекции на устойчивость к абиотическим и биотическим стрессовым факторам, <https://orcid.org/0000-0001-9824-6364>,
SPIN-код: 4535-7802, sul20@yandex.ru

About the Authors:

Oleg G. Kazakov – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Laboratory of Cell and Genomic Technologies, <https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>,
SPIN-code: 7011-6863, kazakov-og@yandex.ru

Oksana B. Polivanova – Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory of Cell and Genomic Technologies, <https://orcid.org/0000-0002-3992-5452>,
SPIN-code: 1731-5221, Corresponding Author, polivanovaoks@gmail.com

Marina C. Derevyagina – Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Plant Protection, <https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>,
SPIN-code: 4834-7461, vzeyruk@mail.ru

Victoria A. Biryukova – Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Cell and Genomic Technologies, <https://orcid.org/0000-0001-7521-6883>,
SPIN-code: 2393-5849, vika_biryukova@inbox.ru

Sulukhan K. Temirbekova – Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Professor, Head of the Laboratory for Breeding for Resistance to Abiotic and Biotic Stress Factors, <https://orcid.org/0000-0001-9824-6364>,
SPIN-code: 4535-7802, sul20@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-154-158>
УДК: 634.75:631.524.86:001.8

Т.Н. Камедько*, Р.М. Пугачёв, В.В. Скорина

Учреждение образования
«Белорусская государственная орденов
Октябрьской Революции и Трудового Красного
Знамени сельскохозяйственная академия»
Республика Беларусь, 213410,
Могилевская обл., г. Горки, ул. Мичурина, 5

*Автор для переписки: t.kamedko@yandex.by

Финансирование. Данные исследования выполнялись в рамках темы ЗМ-24 «Оценка и отбор устойчивых к антракнозу селекционных образцов земляники садовой на основе ДНК-анализа и фенотипирования» задания 2.31 «Усовершенствование методов отбора исходного селекционного материала плодовых, ягодных и орехоплодных культур в изменяющихся климатических условиях» подпрограммы «Земледелие и селекция», государственной программы научных исследований «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы и проекта Б19-087 «Генетическая идентификация потенциала устойчивости к болезням сортов земляники садовой (*Fragaria × ananassa* Duch.) для использования в маркер-сопутствующей селекции» Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Вклад авторов: Камедько Т.Н.: проведение исследования, концептуализация, методология, верификация и администрирование данных, создание рукописи. Пугачёв Р.М.: проведение исследований, создание рукописи и её редактирование. Скорина В.В.: научное руководство исследованием, анализ данных, редактирование рукописи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов. Скорина В.В. является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2008 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Камедько Т.Н., Пугачёв Р.М., Скорина В.В. Результаты оценки устойчивости к антракнозу сортов земляники садовой на основе фенотипирования и ДНК-анализа. *Овощи России*. 2025;(6):154–158. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-154-158>

Поступила в редакцию: 25.08.2025

Принята к печати: 12.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Tatsiana N. Kamedzko*, Roman M. Puhachov,
Vladimir V. Skorina

Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy"
5, Michurin St., Gorki, Mogilev Region,
213410, Republic of Belarus

*Correspondence Author: t.kamedko@yandex.by

Funding. The study was supported as part of Project ЗМ-24 «Evaluation and selection of anthracnose-resistant strawberry breeding samples based on DNA-analysis and phenotyping» task 2.31 «Improving the methods of initial breeding material selection of fruit, berry and nut crops in changing climatic conditions», subprogram «Agriculture and breeding», state program of scientific research «Agricultural technology and food safety» on 2021–2025 and Project Б19-087 «Genetic identification of disease resistance opportunities among strawberry varieties (*Fragaria × ananassa* Duch.) for using in marker-associated selection» of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

Authors' Contribution: Kamedzko T.N.: investigation, conceptualization, methodology, validation, data curation, writing – original draft. Puhachov R.M.: investigation, writing – original draft. Skorina V.V.: supervision, formal analysis, writing – review & editing. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Conflict of interest. Skorina V.V. has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2008, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citation: Kamedzko T.N., Puhachov R.M., Skorina V.V. Results of anthracnose resistance assessment of strawberry cultivars based on phenotyping and DNA analysis. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):154–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-154-158>

Received: 25.08.2025

Accepted for publication: 12.11.2025

Published: 18.12.2025

Результаты оценки устойчивости к антракнозу сортов земляники садовой на основе фенотипирования и ДНК-анализа

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Антракноз является вредоносным грибным заболеванием земляники садовой. Во многих странах этот возбудитель включен в список карантинных объектов. Для создания новых устойчивых к антракнозу сортов необходимо вместе с традиционными методами оценки и отбора устойчивых форм на инфекционном фоне, использовать и маркер-ассоциированную селекцию.

Материал и методика. Объект исследований – 197 сортов земляники садовой различного происхождения. Предмет исследований – устойчивость сортов к антракнозу. Оценка проводилась в полевых условиях на естественном инфекционном фоне. В работе использовались молекулярно-генетические методы выделения ДНК, ПЦР-анализ, оценка продуктов амплификации в агарозном геле. Экспериментальные данные обрабатывали методом кластерного анализа.

Результаты. При оценке на естественном инфекционном фоне все сорта были разделены на 5 кластеров. Из них второй кластер с баллом поражения меньше 1 объединил в себя 82 относительно устойчивых сорта, которые можно рекомендовать в качестве источников ценных признаков в селекции на устойчивость к антракнозу. Первый и пятый кластер объединили в себя неустойчивые сорта с баллом поражения 3 и выше, куда вошло 20 и 21 сорт соответственно. Третий и четвертый кластеры объединили в себя среднеустойчивые сорта с баллом поражения выше 1 и меньше 3, куда вошло 43 и 31 сорта соответственно. На основе генетического анализа ПЦР-продукты обоих маркеров (STS-Rca2_240 и STS-Rca2_417) были идентифицированы у 15,2% изученных сортов земляники садовой, среди них сорта Татиус и Тарро, созданные в УО БГСХА на кафедре плодовоовощеводства. 11,7% сортов имели маркер STS-Rca2_240. Наибольшее количество сортов (53,8%) характеризовались наличием маркера STS-Rca2_417. У остальных сортов данные маркеры не выявлены. Учитывая полученные результаты, нельзя утверждать, что наличие в геноме образца земляники обоих изученных маркеров обеспечивает устойчивость к антракнозу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Fragaria × ananassa, *Colletotrichum acutatum*, ДНК-маркеры, устойчивость к болезням, гены, сорт, кластерный анализ.

Results of anthracnose resistance assessment of strawberry cultivars based on phenotyping and DNA analysis

ABSTRACT

Relevance. Anthracnose is a harmful fungal disease for strawberries. In many countries, this pathogen is included in the list of quarantine objects. A good way to create new anthracnose resistant cultivars is to join forces of traditional breeding to assess and select resistant forms in conditions of infectious background with the opportunities of marker-associated selection.

Material and Methods. The object of the research – 197 strawberry cultivars of various origins. The subject of the research is the resistance to anthracnose. The assessment was carried out in conditions of natural infectious background in open field. We used molecular genetic methods of DNA extraction, PCR analysis, and assessment of amplification products in agarose gel. The experimental data were processed using cluster analysis.

Results. All cultivars were divided into 5 clusters according to the results of the assessment on the natural infectious background. The second cluster had a damage score of less than 1 and united 82 relatively resistant cultivars. They can be recommended as sources of valuable traits for anthracnose resistance breeding. The first and fifth clusters united unstable varieties with a damage score of 3 and higher, which included 20 and 21 varieties, respectively. The third and fourth clusters united moderately resistant varieties with a damage score higher than 1 and less than 3, which included 43 and 31 varieties, respectively. The results of DNA-analysis showed the presence of PCR products for both markers (STS-Rca2_240 and STS-Rca2_417) in 15.2 % of the studied strawberry cultivars, including the Tatiush and Tarro, which were created at the Department of Horticulture, Belarusian State Agricultural Academy. Additionally, 11.7 % of the cultivars had fragment of the STS-Rca2_240 marker. The largest number of samples (53.8 %) were characterized by the manifestation of the STS-Rca2_417 marker. In the remaining cultivars, these markers did not appear. Taking into account the obtained results, it cannot be stated that the presence of both assessed markers in the strawberry sample genome provides resistance to anthracnose.

KEYWORDS:

Fragaria × ananassa, *Colletotrichum acutatum*, DNA markers, disease resistance, genes, cultivar, cluster analysis



Введение

Во многих странах Европы, Азии, Африки, Америки антракноз является широко распространенным грибным заболеванием земляники садовой. В странах Европейского союза, в Израиле и Чили этот возбудитель включен в карантинный список, также *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds – карантинный организм, ограниченно распространенный на территории Евразийского экономического союза [1].

Грибной патоген *C. acutatum* обладает высокой вредоносностью. Антракнозом поражаются все органы растений земляники. Гифы гриба распространяются внутриклеточно, уничтожая при этом клетки или участки тканей растений. При сильном поражении листья некротизируются и опадают, на черешках и побегах отмечается формирование мелких, глубоких язвочек, которые при слиянии формируют вмятины, плоды покрываются пятнами и мумифицируются. Также болезнь опасна тем, что после проникновения в растение патоген может прекратить свое развитие до определенного периода и симптомы заражения могут не проявляться в течение нескольких лет [2].

Экономические потери урожая земляники садовой от антракноза могут составлять от 30 до 80%, а выпадения растений в маточных насаждениях – более 33% [2, 3].

О развитии антракноза на землянике садовой в научных работах белорусских исследователей ранее не упоминалось. Однако в ходе научно-исследовательских работ по темам «Видоспецифический состав и патогенность эпифитотийно опасных возбудителей болезней земляники садовой (*Fragaria × ananassa* Duch.) на территории Беларуси» (проект БРФФИ № Б14-120) и «Разработать эффективный метод отбора устойчивых к болезням генотипов земляники садовой на ранних этапах развития растений» (проект БРФФИ № Б16М-124) из пораженных органов земляники (листья, ягоды) был выделен и введен в культуру гриб *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds, вызывающий антракноз [4, 5]. Также О.В. Скрипка, заведующий лабораторией микологии ФГБУ «ВНИИКР» утверждает, что из Беларуси в Воронежскую область РФ с посадочным материалом был завезен патоген, вызывающий антракноз земляники садовой [3].

Для успешного решения селекционных задач путем создания новых устойчивых к антракнозу сортов и гибридов, особое значение приобретает не только использование традиционных методов оценки и отбора на естественном инфекционном фоне, но и современные, пока мало применяемые на ягодных культурах в Республике Беларусь, селекционные методы, такие как МАС (маркер-ассоциированная селекция). Использование диагностических ДНК-маркеров для выявления генотипов, несущих локусы, ассоциированные с устойчивостью земляники садовой к антракнозу, повысит надёжность идентификации и ускорит селекционный процесс.

Устойчивость к антракнозу у земляники контролируется доминантным геном Rca2. Методом сегрегационного bulk-анализа (BSA-Bulked segregant analysis) картировали ген Rca2 и идентифицировали сцепленные с ним AFLP-маркеры mf1, mf2, mf3 и mf4. Два из них были конвертированы в ПЦР-маркеры STS-Rca2_240 и STS-Rca2_417. Ген Rca2 был картирован на расстоянии 2,8 cM от маркера STS-Rca2_240 и 0,6 cM от маркера STS-Rca2_417 [6].

В связи с этим целью наших исследований являлась оценка устойчивых к антракнозу сортов земляники садовой на основе гено- и фенотипирования, сопоставление результатов и на их основе выделить источники устойчивости к антракнозу для дальнейшей селекции.

Задачи исследований:

– оценить коллекцию сортов земляники садовой различного происхождения по устойчивости к антракнозу на инфекционном фоне;

– на основе ДНК-анализа выявить генотипы несущие локусы ДНК, ассоциированные с устойчивостью к антракнозу;

– сопоставить результаты гено- и фенотипирования и рекомендовать устойчивые генотипы в качестве источников ценных признаков в селекции.

Материал и методика проведения исследований

Полевые опыты проводили в учебно-опытном саду кафедры плодоовощеводства учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Белорусская государственная сельскохозяйственная академия). Коллекционные насаждения земляники садовой включают более 200 сортов различного происхождения. Растения выращивали на гребнях, мульчированных черной плёнкой, с расположением растений двумя строчками 30×30 см и междурядьем 1,4 м.

Во время проведения исследований (2024 год) погодные условия были близкими к оптимальным для развития антракноза [7], что позволило объективно оценить устойчивость сортов.

Среднемесячные температуры вегетационного периода 2024 года значительно отличались от средних многолетних. В целом отмечены превышения среднемесячных температур от 2,6–3,0 ° в июне, августе, июле и апреле, до 6,2, 6,3 и 6,8 °C в марте, сентябре и феврале. Колебания температур по декадам характеризовались той же тенденцией.

Для режима осадков вегетационного периода 2024 года были характерны существенные колебания по сравнению со средней многолетней. В целом, относительный дефицит влаги ощущался в августе, что повлияло на спад в развитии болезни, и значительный в сентябре (осадков выпало только 10% от среднего многолетнего значения), а также во второй половине апреля.

В июне, во время максимального развития антракноза на землянике, среднесуточная температура воздуха составила 20 °C, а максимальная температура была на уровне 31,8 °C. Относительная влажность воздуха была на уровне 70–80%.

Опытный участок представлен дерново-подзолистой суглинистой почвой. Содержание фосфора (P₂O₅) и калия (K₂O) в почве составляло – 316,95 мг/кг и 184,15 мг/кг соответственно, содержание гумуса 2,5%, pHKCl – 6,1.

Уход за опытными насаждениями осуществляется по общепринятой агротехнике без применения средств защиты от болезней [8].

Сведения о динамике развития антракноза на землянике в Республике Беларусь отсутствуют. Поэтому был проведён ряд учетов, чтобы выявить время начала проявления болезни и время максимального развития антракноза земляники садовой за вегетационный период. Учеты проводили в период с мая по сентябрь 2024 года.

Оценку сортов на устойчивость к антракнозу проводили визуально по всей опытной деланке, опираясь на балльную шкалу для грибных болезней, вызывающих увядание растений [9]:

0 – признаки болезни отсутствуют, растения развиваются нормально;

1 – очень слабое поражение: в росте отдельных растений наблюдается отставание или легкое подвядание;

2 – слабое поражение: поражено слабо до 10 % растений. В росте заболевших растений заметно отставание или подвядание;

3 – среднее поражение: поражено в значительной степени до 25 % растений; отмечается явное отставание в росте и подсыхание листьев на периферии кустов или явное увядание с резкой потерей тургора без отставания в росте;

4 – сильное поражение: поражено в сильной степени до 50 % растений; растения с сильным поражением на грани отмирания, побурели, в центре кустов в области сердечка сохранились молодые листочки; остальные растения ослаблены в росте или имеют подвядание;

5 – очень сильное поражение: поражено в сильной степени свыше 50 % растений; растения на грани гибели.

Устойчивыми считались растения без признаков болезни (0 баллов), относительно устойчивыми (до 1 балла) – с признаками болезни, но энергично растущие, среднеустойчивыми (1–3 балла) – растения с явным отставанием в росте и неустойчивыми (более 3 баллов) – растения, рост которых сильно подавлен.

Молекулярно-генетический анализ проводили в научно-исследовательской генетической лаборатории УО БГСХА.

Выделение ДНК из растений осуществляли с использованием набора компании Thermo Scientific (Genomic DNA Purification Kit #K0512) с модификациями протокола, рекомендованного производителем. Для получения препаратов ДНК использовали 100–200 мг растительной ткани (молодые листья), гомогенизировали их в микропробирках (тип Эппендорф) на лабораторном гомогенизаторе MILLMIX 20. Концентрацию и чистоту выделенной ДНК проверяли на спектрофотометре DeNovix DS-11 FX.

Использованные для анализа праймеры были синтезированы ОДО «Праймтех» (Беларусь) (табл. 1).

Таблица 1. Праймеры и их нуклеотидные последовательности [6]
Table 1. Names, sequences and the sizes of DNA fragments for used primers [6]

Праймер	Нуклеотидная последовательность	Размер ампликонов, п.н.
STS-Rca2_240	F 5'GCC ACG TCA CTA GTC AAA TTC AA3', R 5'TCA TGG ACA GTG GTC TCA GC3'	240
EMFv020 (контроль)	F 5' CAG GCG CCA ACG GCG TGC TCT TGT3' R 5'CAG GCG GCG CAG CTC ATC CCT AGG3'	154
STS-Rca2_417	F 5'ACC ATG CAG AAC GTT CAG ATA T3', R 5'TCC CAG CTG AAG ATC AAT GTA GT3'	417

Реакционная смесь для ПЦР объемом 20 мкл содержала: 3 мкл ДНК (20 нг/мкл), 0,2 мМ dNTPs, 0,2 мМ каждого праймера, 0,8 U Taq-полимеразы и 1 мМ Taq-буфера $(+)(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{KCl}+\text{MgCl}_2$.

Амплификацию проводили в термоциклере C1000 производства фирмы Touch по следующим программам: маркер STS-Rca2_240: денатурация: 95°C – 3 мин, 35 циклов: 95°C – 50 с; 64°C – 50 с; 72°C – 1 мин; 1 цикл – 72°C – 5 мин; маркер STS-Rca2_417: денатурация: 95°C – 3 мин, 35 циклов: 95°C – 50 с; 62°C – 50 с; 72°C – 1 мин; 1 цикл – 72°C – 5 мин. Разделение ампликонов осуществляли методом электрофореза в 1,5% агарозном геле. Для определения длины амплифицированных фрагментов использовали ДНК маркер молекулярного веса, m100bp (Евроген). Гели документировали с помощью фотографиярования после окрашивания этидиум бромидом.

В результате амплификации у образцов выявляли фрагменты длиной 154 (контроль ПЦР) и 240 п.н. Сцепленный с геном Rca2 фрагмент имеет длину 240 п.н. Также фрагменты длиной от 417 до 421 п.н. и дополнительно фрагмент 397 п.н. Сцепленный с геном Rca2 фрагмент имеет длину 417 п.н.

Кластерный анализ по степени поражения растений земляники антракнозом (в баллах) проводился в программе STATISTICA 12. В качестве правила объединения был выбран метод полной связи, который определяет расстояние между кластерами как наибольшее расстояние между любыми двумя объектами в различных кластерах. В качестве меры близости – Евклидово расстояние, геометрическое расстояние в n-мерном пространстве. На основе полученных данных выделили 5 кластеров. Далее проводилась кластеризация методом k-средних.

Результаты исследований и их обсуждение

Первые признаки развития антракноза начали появляться в конце мая на черешках в виде мелких глубоких язвочек темного цвета и крупных пятен с хорошо заметным красно-фиолетовым оттенком на листьях. Максимальное развитие антракноза было отмечено в конце июня в середине плодоношения, когда на многих сортах уже начали появляться усы. Характерные сухие вдавленные пятна были на всех частях растения (черешки, цветоносы, листья, усы, плоды). В этот промежуток времени имели

место близкие к оптимальным условия для жизнедеятельности гриба: среднесуточная температура 20°C и относительная влажность воздуха 70%. Снижение степени развития болезни у 53 сортов наблюдалось в августе, что объясняется высокой температурой воздуха в этот период и ограниченным количеством осадков, это обуславливало слабое заражение отрастающих листьев. У 62 сортов земляники садовой степень поражения растений значительно возросла, что вероятнее всего связано с морфологическими и генетическими особенностями сорта (габитус растения, слабая опушенность черешков и листьев, низкая плотность ягод и др.).

Кластеризация методом k-средних позволила установить сорта со сходными особенностями в отношении поражения антракнозом (рисунком).

Во второй кластер относительно устойчивых сортов, с баллом поражения меньше 1 вошло 82 сорта: Сюзи, Ремонтантная розовая, Талия, Олимпия, Готика, Гигантелла Максима, Троицкая, Богота, Элькат, Онега, Найдена добрая, Кармен, Натали, Дивная, Ударница, Холидей, Викоде, Сенди, Купчиха улучшенная, Садовый рубин, Фронтерас, Торпеда, Рания, Камароза, Дестини, Бьянка Фрагола №5, Барокко, Вента, Лия, Текла, Кори, Лималексия, Кимберли, Татиус, Веснянка, Тарро, Соловушка, Фламинго, Фестивальная ромашка, Любава, Мишутка, Красный берег, Кама, Загадка, Сириус, Полли, Челси, Фраголория, Набила, Джолли, Марисоль, Пальмерита, Сударушка, Априка, Вима Тарда, Фенелла, Осирис, Кент, Лаура, Магнус, Мальвина, Витязь, Вима Занта, Эльсанта, Талка, Польшина, Аргентера, Флавия, Венди, Петалума, Элиани, Элли, Примелла, Фламиния, Сирия, Фейерверк, Гармония, Пегасус, Флоранс, Мадлен, Царскосельская, Моллинг столетие.

Первый и пятый кластер объединили в себя неустойчивые сорта с баллом поражения 3 и более, куда вошло 20 и 21 сорт соответственно:

– кластер 1: Дали, Хадемар, Брилла, Мурано, Румба, Эми, Славутич, ВР4, Хансалола, Вирена, Полка, Викториана, Ренессанс, Гора Эверест, Синсерли, Эви 2, Анаис, Фернандо, Осенняя радость;

– кластер 5: Вима Ксима, Красавица, Сапоро, Шарлотта, Фестивальная, Лакомка, Дели, Багряная, Корона, Сладкая Анна, Лорд, Росинка, Ирма, Сюрприз Олимпиаде, Зенга Зенгана, Флорида Фестиваль, Мармолада, Эльвира, Тея, Рубиновый кулон, Дачница.

Третий и четвертый кластеры включали среднеустойчивые сорта с баллом поражения более 1, но меньше 3, куда вошло 43 и 31 сорта:

– кластер 3: Наяд, Ева, Чендлер, Вега, Моллинг Аллур, Онда, Слоненок, Тетис, Маригет, Жемчужница, Джоника, Королева Элиза, Аллегро, Студенческая, Купчиха, Сандра, Вырицкая, Кандис, Кокинская ранняя, Гаригуэтта новая, Роксана, Сизоже, Принцесса Диана, Хику, Кембридж, Спасская, Московский деликатес, Сенсация, Кристина, Антеа, Хоней, Эверли, Маришка, Маэстро, Верити, Елизавета, Остара, Вивара, Клери, Соната, Женева, Тельма, Альба;

– кластер 4: Арабелла, Царица, Азия, Крапо 10, Скала, Сибилла, Эвита, Елизавета II, Гренада, Кокинская заря, Дука, Классика, Боровицкая, Орли, Люция, Флорида, Гелеос, Фаворит, Юния Смайдж, Присвята, Тенира, Торос, Прими, Гаригуэтта, Заря, Квики, Нанди, Фейт, Вима Рина, Красная Капелька, Джемил.

В ходе проведения ДНК-анализа с использованием генетических маркеров для идентификации устойчивости земляники садовой к *S. acutatum*, нами были использованы ПЦР-маркеры STS-Rca2_240 и STS-Rca2_417. На основе их наличия изучаемые сорта были разделены на четыре группы: имеющие оба маркера, имеющие только один из маркеров и не имеющие их (табл. 2).

ПЦР-продукты маркеров STSRca2_240 и STS-Rca2_417 с размером 240 п.н. и 417 п.н. были идентифицированы у 15,2

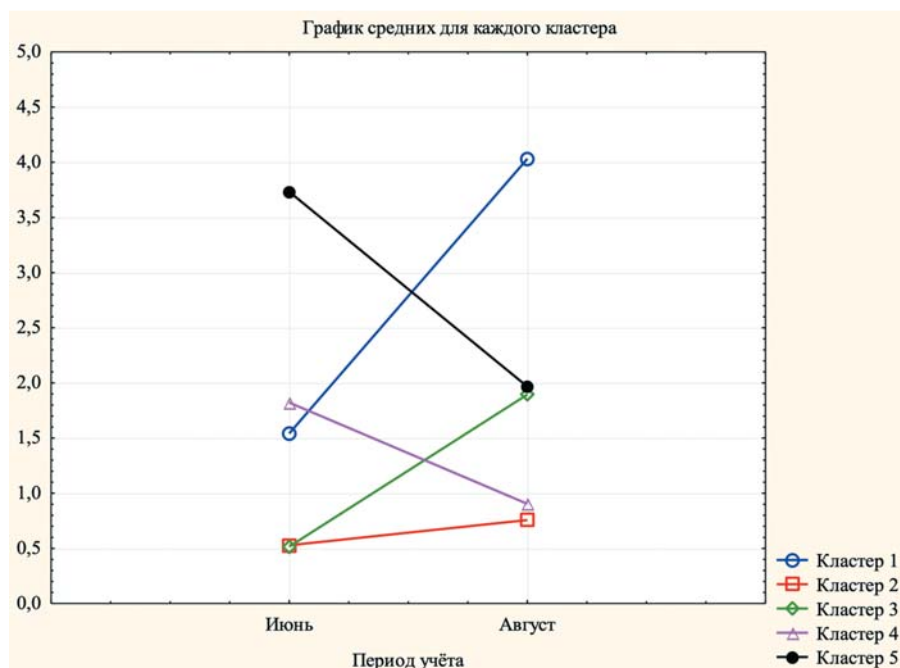


Рис. Результаты кластерного анализа устойчивости к антракнозу сортов земляники садовой на основе метода k-средних, 2024 г.
Fig. Results of cluster analysis of strawberry anthracnose resistance based on the k-means method, 2024

% сортов земляники садовой, среди них сорта Татиус и Тарро, созданные в УО БГСХА на кафедре плодовоовощеводства. Маркер STSRca2_240 без маркера STSRca2_417 был отмечен у 11,7% сортов. Наибольшее количество сортов – 53,8%, характеризовались отсутствием в генотипах маркера STSRca2_240 и проявлением маркера STSRca2_417. Отсутствие обоих маркеров было отмечено у 19,3% сортов.

Использовали два способа оценки сортов земляники садовой на устойчивость к антракнозу: на естественном инфекционном фоне и с помощью ДНК-анализа. На основе сравнительного анализа полученных результатов были выделены две группы сортов – относительно устойчивые и восприимчивые (табл. 3). К относительно устойчивым сортам отнесли те, которые в полевых условиях имели поражение антракнозом не выше 1 балла и характеризовались наличием одного или

обоих маркеров устойчивости к антракнозу. В эту группу вошли следующие 64 сорта: Сюзи –/+, Ремонтантная розовая +/+, Талия –/+, Олимпия –/+, Готика –/+, Гигантелла Максима –/+, Онега –/+, Найдена добрая +/–, Кармен –/+, Дивная +/–, Холидей +/+, Викоде –/+, Купчиха улучшенная +/+, Садовый рубин +/+, Фронтерас –/+, Торпеда –/+, Рания +/+, Камароза +/–, Дестини –/+, Вента –/+, Лия –/+, Текла –/+, Кори –/+, Кимберли –/+, Татиус +/+, Веснянка +/–, Тарро +/+, Фестивальная ромашка –/+, Мишутка +/–, Красный берег +/–, Кама +/–, Загадка –/+, Сириус –/+, Набила +/+, Джоли –/+, Марисоль +/–, Сударушка +/–, Априка +/–, Вима Тарда –/+, Осирис –/+, Кент –/+, Лаура +/+, Магнус –/+, Мальвина +/+, Витязь –/+, Вима Занта –/+, Талка +/–, Польвина –/+, Аргентера –/+, Петалума +/+, Элиани +/–, Элли +/–, Фламиния +/–, Сирия +/+, Фейерверк –/+, Гармония –/+,

Таблица 2. Структура коллекции земляники садовой по наличию маркеров устойчивости к антракнозу
Table 2. Structure of the strawberries collection by the presence of anthracnose resistance markers

Наличие (+), отсутствие (–) маркера	Удельный вес, %	Распределение сортот по кластерам
Rca2_240+ Rca2_417+	15,2	1 – Викториана, Вирена, Эви 2, Ренессанс, Дали; 2 – Мальвина, Ремонтантная розовая, Лаура, Тарро, Царскосельская, Холидей, Купчиха улучшенная, Сирия, Садовый Рубин, Рания, Петалума, Набила, Татиус; 3 – Тельма, Роксана, Наяд, Жемчужница; 4 – Вима Рина, Крапо 10, Сибилла, Гренада; 5 – Росинка, Эльвира
Rca2_240+ Rca2_417–	11,7	1 – нет; 2 – Талка, Мишутка, Красный берег, Дивная, Найдена добрая, Кама, Сударушка, Веснянка, Элиани, Элли, Априка, Камароза, Фламиния, Марисоль; 3 – Кокинская ранняя, Спасская, Тетис; 4 – Эвита, Боровицкая, Орли; 5 – Багряная, Сладкая Анна, Флорида Фестиваль
Rca2_240– Rca2_417+	53,8	1 – Полка, Анаис, Осенняя радость, Гора Эверест, Славутич, Брилла, Синсерли, Мурано, Эми, ВР4, Фернандо; 2 – Богота, Elsanta, Флоранс, Сириус, Кент, Кармен, Вента, Фейерверк, Витязь, Вима Тарда, Торпеда, Сюзи, Загадка, Фестивальная ромашка, Викоде, Онега, Гигантелла максима, Фронтерас, Корри, Талия, Магнус, Вима Занта, Пегасус, Олимпия, Фраголотрия, Гармония, Польвина, Осирис, Джоли, Мадлен, Моллинг Столетие, Кимберли, Лия, Аргентера, Дестини, Текла, Готика, Бьянка Фрагола №5, Примела; 3 – Маришка, Маэстро, Хоней, Кембридж, Остара, Онда, Вырицкая, Вега, Сандра, Студенческая, Хику, Гаригуэтта, Моллинг Аллюр, Антеа, Сизожэ, Купчиха, Верити, Кристина, Вивара, Ева, Альба, Соната, Джоника, Клери, Королева Элиза, Кандис; 4 – Флорида, Тенира, Царица, Классика, Фаворит, Торос, Прими, Гелеос, Присвята, Кокинская заря, Гаригуэтта, Азия, Арабелла, Фейт, Нанди, Квики, Скала; 5 – Сюрприз Олимпиаде, Зенга Зенгана, Лорд, Красавица, Ирма, Мармолада, Лакомка, Рубиновый кулон, Фестивальная, Сапоре, Дели, Тея, Шарлотта
Rca2_240– Rca2_417–	19,3	1 – Хансалолла, Румба, Хадемар; 2 – Барокко, Полли, Ударница, Троицкая, Элькат, Натали, Сенди, Лималексия, Соловушка, Фламинго, Любава, Челси, Пальмерита, Фенелла, Флавия, Венди; 3 – Сенсация, Маригет, Аллегро, Женева, Московский деликатес, Принцесса Диана, Слононок, Чендлер, Эверли; 4 – Джемил, Дукал, Елизавета II, Заря, Красная капелька, Люция, Юния Смайдс; 5 – Вима Ксима, Дачница, Корона

Флоранс –/+, Мадлен –/+, Царскосельская +/+, Моллинг столетие –/+, Бьянка Фрагола №5 –/+, Фраголория –/+, Примела –/+. Среди них можно отметить сорта, имеющие в своем геноме оба маркера (STSRca2_240 и STS-Rca2_417): Ремонтантная розовая, Холидей, Купчиха улучшенная, Садовый рубин, Рания, Татиус, Тарро, Набила, Лаура, Мальвина, Петалума, Сирия, Царскосельская.

Восприимчивые – сорта, поражавшиеся патогеном более, чем на 1 балл и не имеющие в своем геноме маркеров STS-Rca2_240 и STS-Rca2_417: Вима Ксима –/–, Дачница –/–, Корона –/–, Румба –/–, Хадемар –/–, Хансалола –/–.

Заключение

В селекции на устойчивость к антракнозу земляники садовой, вызываемому патогенным грибом *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds, целесообразно использовать сорта, которые на естественном инфекционном фоне имели балл

поражения до 1 и имеющие в своем геноме маркеры, ассоциированные с геном устойчивости к антракнозу STS-Rca2_240 и STS-Rca2_417: Ремонтантная розовая, Холидей, Купчиха улучшенная, Садовый рубин, Рания, Татиус, Тарро, Набила, Лаура, Мальвина, Петалума, Сирия, Царскосельская.

Однако, учитывая результаты проведенных исследований, нельзя достоверно сделать заключение, что наличие в геноме образца земляники обоих изученных маркеров обеспечивает устойчивость к антракнозу.

В связи с этим, необходимо продолжать изучать особенности генетического контроля устойчивости земляники садовой к антракнозу и разрабатывать на этой основе новые генетические маркеры для использования в МАС. Важным также является совершенствование методов оценки устойчивости к антракнозу на ранних этапах развития гибридных сеянцев на инфекционных фонах.

• Литература

- Baroncelli R., Talhinas P., Pensec F., Sukno S.A., Gaetan le F., Thon M.R. The *Colletotrichum acutatum* species complex as a model system to study evolution and host specialization in plant pathogens. *Frontiers in Microbiology*. 2017;(8):2001. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02001>
- Forcelini B. B., Gonçalves F. P., Peres N. A. Effect of inoculum concentration and interrupted wetness duration on the development of anthracnose fruit rot of strawberry. *Plant disease*. 2017;2(101):372–377. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-16-1175-RE>
- Скрипка О.В., Дудченко И.П., Никифоров С.В., Копина М.Б. Антракноз *Colletotrichum acutatum* Simmonds – опасное заболевание земляники. *Карантин растений. Наука и практика*. 2014;4(10):24–35. <https://elibrary.ru/vkbszj>
- Пугачёв Р.М., Пугачева И.Г. Купцов В.Н., Камедько Т.Н. Морфологические особенности фитопатогенных грибов земляники садовой на различных питательных средах. *Земледелие и защита растений*. 2015;6(103):30–33.
- Камедько Т.Н. Результаты оценки различных методов искусственного заражения семян земляники садовой антракнозом (*Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds). *Вестник Бел. гос. с.-х. акад.* 2017;(3):81–84. <https://elibrary.ru/zmmfeb>
- Lerceteau-Köhler E., Guerin G., Denoyes-Rothan B. Identification of SCAR markers linked to Rca2 anthracnose resistance gene and their assessment in strawberry germplasm. *Theoretical and applied genetics*. 2005;5(111):862–870.
- Staňková B., Vichová J., Pokorný R. Virulence of *Colletotrichum acutatum* isolates to several host plants. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2011;3(20):161–169.
- Организационно-технологические нормативы возделывания овощных, плодовых, ягодных культур и выращивания посадочного материала : сб. отраслевых регламентов / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т систем исслед. в АПК НАН Беларуси; рук. разраб.: В. Г. Гусаков [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2010. 520 с.
- Пугачёв Р.М., Пугачева И.Г. Камедько Т.Н., Купцов В.Н., Сандалова М.В. Методические рекомендации по проведению экспедиционного обследования насаждений земляники садовой. Горки: БГСХА; 2017.

• References

- Baroncelli R., Talhinas P., Pensec F., Sukno S.A., Gaetan le F., Thon M.R. The *Colletotrichum acutatum* species complex as a model system to study evolution and host specialization in plant pathogens. *Frontiers in Microbiology*. 2017;(8):2001. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02001>
- Forcelini B. B., Gonçalves F. P., Peres N. A. Effect of inoculum concentration and interrupted wetness duration on the development of anthracnose fruit rot of strawberry. *Plant disease*. 2017;2(101):372–377. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-16-1175-RE>
- Skripka O.V., Dudchenko I.P., Nikiforov S.V., Kopina M.B. Anthracnose *Colletotrichum acutatum* Simmonds is a dangerous disease of strawberries. *Plant health. Research and practice*. 2014;4(10):24–35. (In Russ.) <https://elibrary.ru/vkbszj>
- Puhachov R.M., Puhachova I.G., Kupczov V.N., Kamedzko T.N. Morphological features of phytopathogenic fungi of strawberries on various nutrient media. *Agriculture and plant protection*. 2015;6(103):30–33. (In Russ.)
- Kamedko T.N. Results of estimation of different methods of artificial contamination of garden strawberry seeds with anthracnose (*Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds). *Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*. 2017;(3):81–84. (In Russ.) <https://elibrary.ru/zmmfeb>
- Lerceteau-Köhler E., Guerin G., Denoyes-Rothan B. Identification of SCAR markers linked to Rca2 anthracnose resistance gene and their assessment in strawberry germplasm. *Theoretical and applied genetics*. 2005;5(111):862–870.
- Staňková B., Vichová J., Pokorný R. Virulence of *Colletotrichum acutatum* isolates to several host plants. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2011;3(20):161–169.
- Organizational and technological standards for the cultivation of vegetable, fruit, and berry crops and growing of planting material: collection of industry regulations / National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Research Systems in the Agro-Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus; head developer: V. G. Gusakov [et al.]. Minsk: Belarusian Science, 2010. 520 p. (In Russ.)
- Puhachov R.M., Puhachova I.G., Kamedzko T.N., Kupczov V.N., Sandalova M.V. Methodological recommendations for conducting an expeditionary survey of strawberry plantings. Gorki: BSAA, 2017. (In Russ.)

Об авторах:

Татьяна Николаевна Камедько – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры плодовоовощеводства Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, SPIN-код: 5009-8054, автор для переписки, t.kamedko@yandex.by

Роман Михайлович Пугачёв – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры плодовоовощеводства Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, SPIN-код: 8980-9461, <https://orcid.org/0000-0002-0194-317X>, puhrom@yandex.by

Владимир Владимирович Скорина – доктор с.-х. наук, профессор кафедры плодовоовощеводства Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, SPIN-код: 1772-1712, skorina@list.ru

About the Authors:

Tatsiana N. Kamedzko – Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Belarusian State Agricultural Academy, SPIN-code: 5009-8054, Correspondence Author, t.kamedko@yandex.by

Roman M. Puhachov – Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of Horticulture, Belarusian State Agricultural Academy, SPIN-code: 8980-9461, <https://orcid.org/0000-0002-0194-317X>, puhrom@yandex.by

Vladimir V. Skorina – Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Horticulture, Belarusian State Agricultural Academy, SPIN-code: 1772-1712, skorina@list.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-159-168>
 УДК: 635.713:581.175.11:628.9

Д.С. Аникина^{1,2*}, А.В. Широкова³, А.Б. Шевкунов¹,
 В.Л. Дмитриева¹, А.О. Ружикский¹, Л.Б. Дмитриев³,
 А.В. Жевнеров³, В.Е. Радина³, С.А. Джатдоева³

¹Федеральное государственное учреждение
 «Федеральный исследовательский центр
 «Фундаментальные основы биотехнологии»
 Российской академии наук»
 119071, РФ, Москва

²Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Российский государственный аграрный университет
 МСХА имени К.А. Тимирязева»
 127434, РФ, Москва

³Федеральное государственное бюджетное
 научное учреждение «Федеральный
 научный центр овощеводства» (ФНЦ ОВ)
 143072, Россия, Московская область,
 Одинцовский район,
 п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14

*Автор для переписки: black-cat99@inbox.ru

Благодарности: При проведении исследований
 использовалось оборудование ИНО ФЦК УН ЦКП
 «Сервисная лаборатория комплексного анализа
 химических соединений» (ФНЦ ОВ РГАУ-МСХА
 имени К.А. Тимирязева) и ЦКП «Промышленные биотехнологии» (ФИЦ Биотехнологии РАН).

Вклад авторов: Аникина Д.С.: методология, прове-
 дение исследований, верификация данных, фор-
 мальный анализ, ресурсы, создание рукописи и ее
 редактирование, визуализация. Широкова А.В.: мето-
 дология, научное руководство исследованием, ресур-
 сы, проведение исследований, верификация данных,
 формальный анализ, создание рукописи и ее редак-
 тирование. Шевкунов А.Б.: визуализация, проведение
 исследований, ресурсы. Дмитриева В.Л., Ружикский
 А.О.: методология, ресурсы, проведение исследова-
 ний; Дмитриев Л.Б.: методология, администрирова-
 ние данных. Радина В.Е.: проведение исследований.
 Жевнеров А.В., Джатдоева С.А.: научное руководство
 исследованием, ресурсы, администрирование про-
 екта, создание рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсут-
 ствии конфликта интересов.

Для цитирования: Аникина Д.С., Широкова А.В.,
 Шевкунов А.Б., Дмитриева В.Л., Ружикский А.О.,
 Дмитриев Л.Б., Жевнеров А.В., Радина В.Е.,
 Джатдоева С.А. Содержание пигментов и вторичных
 метаболитов в листьях базилика (*Ocimum basilicum* L.
 и *O. × citriodorum*) в условиях светокультуры. *Овощи
 России*. 2025;(6):159–168. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-159-168>

Поступила в редакцию: 27.09.2025

Принята в печать: 17.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Daria S. Anikina^{1,2*}, Anna V. Shirokova³,
 Andrey B. Shevkunov¹, Valeria L. Dmitrieva²,
 Alexander O. Ruzhitskiy¹, Lev B. Dmitriev³,
 Alexey V. Zhevnerov³, Valeriya E. Radina³,
 Sofya A. Dzhatdueva³

¹Federal Research Centre "Fundamentals of
 Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences»
 Moscow, Russia, 119071

²Russian State Agrarian University –
 Moscow Timiryazev Agricultural Academy
 Moscow, Russia, 127434

³Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC)
 14, Selektionnaya str., VNIISOK, Odintsovo region,
 Moscow district, 143072, Russia

*Corresponding Author: black-cat99@inbox.ru

Acknowledgments: The measurements were carried
 out on the equipment of the ICE FCC ES "Service
 Laboratory for Comprehensive Analysis of Chemical
 Compounds" (RSAU-MAA named after K.A. Timiryazev)
 and the CSRF "Industrial Biotechnologies" (Research
 Centre of Biotechnology RAS).

Authors' Contribution: Anikina D.S.: methodology,
 investigation, validation, formal analysis, visualization,
 writing – review & editing. Shirokova A.V.: methodology,
 supervision, investigation, validation, formal analysis,
 resources, writing – review & editing. Shevkunov A.B.:
 visualization, resources, investigation. Dmitrieva V.L.,
 Ruzhitskiy A.O.: methodology, investigation, resources.
 Dmitriev L.B.: methodology, data curation. Radina V.E.:
 investigation. Zhevnerov A.V., Dzhatdueva S.A.: supervi-
 sion, resources, project administration, writing – review &
 editing.

Conflict of interest. The authors declare
 no conflict of interest.

For citation: Anikina D.S., Shirokova A.V., Shevkunov
 A.B., Dmitrieva V.L., Ruzhitskiy A.O., Dmitriev L.B.,
 Zhevnerov A.V., Radina V.E., Dzhatdueva S.A. Content
 of pigments and secondary metabolites in basil leaves
 (*Ocimum basilicum* L. and *O. × citriodorum*) under light
 culture conditions. *Vegetable crops of Russia*.
 2025;(6):159–168. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-159-168>

Received: 27.09.2025

Accepted for publication: 17.11.2025

Published: 18.12.2025

Содержание пигментов и вторичных метаболитов в листьях базилика (*Ocimum basilicum* L. и *O. × citriodorum*) в условиях светокультуры

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Светодиодное освещение позволяет управлять биосинтезом первичных и вторичных метаболитов, повышая пищевую и фармакологическую ценность растений. Базилик – ценная эфиромасличная культура с высоким содержанием биологически активных соединений. При этом малоизученными остаются вопросы, связанные с регулированием спектрального состава светодиодов для направленной стимуляции роста и биосинтеза конкретных компонентов.

Материалы и методы. Исследовано влияние четырёх LED-режимов (Синий: Красный: Розовый, %: 25:70:25:25; 50:80:25:50; 50:60:50:25; 50:70:25:25; Плотность фотонного потока 126–149 мкмоль/0,5 м²/с) на базилик разных хемотипов: «цитральный» (*O. × citriodorum* Vis. Каприз), «линалольный» (*Ocimum basilicum* L. Лучано), «метилциннаматный» (*Ocimum basilicum* L. №232/21). Спектрофотометрически определяли содержание хлорофиллов, каротиноидов, фенольных соединений (ФС) и флавонолов. Путем гидродистилляции получали эфирное масло, компонентный состав которого анализировали методом газовой хроматографии с масс-селективным детектированием. Статистическая обработка – двухфакторный анализ ANOVA (тест Тьюки, $p < 0,05$).

Результаты. Содержание хлорофиллов и каротиноидов у сорта Каприз выше в вариантах, в которых содержание ФС, в том числе флавонолов, наименьшее, и наоборот, у растений сорта Лучано содержание фотосинтетических пигментов выше в тех вариантах, где у сорта Каприз и образца №232/21 наблюдалось их снижение. Наименее заметны изменения в накоплении ФС у образца №232/21, эфирное масло которого на 87% состоит из фенилпропаноидного компонента метилциннамата. Наиболее чувствительными к стрессу оказались растения сорта Каприз, а наиболее устойчив – образец №232/21.

Заключение. Режим 50:60:50:25 способствовал увеличению количества фотосинтетических пигментов, тогда как 50:70:25:25 стимулировал накопление ФС через активацию фенилпропаноидного пути из-за фотоокислительного стресса. Предложенные LED-режимы позволяют направленно модулировать биохимический профиль базилика, обеспечивая либо высокую антиоксидантную активность, либо максимальный выход эфирного масла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

светодиодное освещение; *Ocimum*; вторичные метаболиты; фотосинтетические пигменты

Content of pigments and secondary metabolites in basil leaves (*Ocimum basilicum* L. and *O. × citriodorum*) under light culture conditions

ABSTRACT

Relevance. LED lighting enables targeted control of primary and secondary metabolite biosynthesis, enhancing the nutritional and pharmacological value of plants. Basil is a valuable essential-oil crop rich in bioactive compounds. However, the regulation of LED spectral composition for directed stimulation of growth and biosynthesis of specific components remains underexplored.

Materials and Methods. The effects of four LED regimes (Blue:White:Red:Deep Pink, %: 25:70:25:25; 50:80:25:50; 50:60:50:25; 50:70:25:25; photon flux density 126–149 $\mu\text{mol}/0.5 \text{ m}^2/\text{s}$) were studied on basil chemotypes: "citral" (*O. × citriodorum* Vis. Kapriz), "linalool" (*Ocimum basilicum* L. Luchano), "methyl cinnamate" (*Ocimum basilicum* L. №232/21). Chlorophylls, carotenoids, phenolic compounds (PC), and flavonols were quantified spectrophotometrically. Essential oil was obtained by hydrodistillation and analysed by GC-MS. Data were processed by two-way ANOVA (Tukey test, $p < 0.05$).

Results. In Kapriz, chlorophyll and carotenoid levels were highest where PC (including flavonols) were lowest, and vice versa. In Luchano, photosynthetic pigments peaked in regimes where they declined in Kapriz and №232/21. Sample №232/21 showed the least change in PC accumulation; its essential oil consisted of 87% methyl cinnamate. Kapriz plants were most stress-sensitive, while №232/21 was the most resilient.

Conclusion. The 50:60:50:25 regime boosted photosynthetic pigments, whereas 50:70:25:25 enhanced PC via phenylpropanoid pathway activation under photo-oxidative stress. The proposed LED regimes enable targeted modulation of basil's biochemical profile – delivering either high antioxidant activity or maximum essential-oil yield.

KEYWORDS:

LED lighting; *Ocimum*; secondary metabolites; photosynthetic pigments

Введение

Свет представляет собой один из важнейших факторов, контролирующих жизнедеятельность растений. Ответная реакция на свет определяется наличием множества фоторецепторов – белков, способных воспринимать качество, интенсивность, продолжительность и направление света и запускать сигналы, которые регулируют многочисленные физиологические и метаболические реакции. Фоторецепторы играют решающую роль в стимуляции биохимических путей метаболитов за счет модуляции экспрессии определенных генов [1].

В настоящее время искусственное освещение способно обеспечивать контроль над растениями, влияя на синтез первичных и вторичных метаболитов. Светодиодные (LED) светильники имеют преимущества перед традиционными источниками искусственного освещения благодаря возможности манипуляции спектральным составом, мощностью освещения, продолжительностью фотопериода и направлением света. Они часто используются для круглогодичного промышленного производства растительной продукции. Светодиодное освещение может содействовать эффективному использованию защищенного грунта за счет доступного и менее затратного выращивания растений с повышенной пищевой ценности [2].

Биосинтез фотосинтетических пигментов и вторичных метаболитов может регулироваться светочувствительными генами. Хлорофиллы поглощают свет в красной и синей областях видимого спектра, каротиноиды – в синей, зеленой и фиолетовой. Поэтому красная и синяя длины волн света являются наиболее эффективными для управления фотосинтезом. Как правило, красный свет регулирует процессы роста и развития растений, повышает урожайность и накопление пигментов. Синий свет влияет на движение устьиц, фотосинтез и фотоморфогенез. В дополнение к красному и синему свету, дальний красный свет также используется в качестве источника освещения, опосредующего фоторецепторные реакции [3; 4]. Зеленый свет в значительной мере повышает эффективность использования воды растениями, способствует фотосинтетической ассимиляции углерода, улучшает качество и усиливает продуктивность растений [3].

Базилик (*Ocimum L.*) – ценная эфиромасличная и пряно-ароматическая культура, широко выращиваемая в России и других странах. Родовое название происходит от греческого слова "ozo", что означает «благоухать» [5]. Род *Ocimum L.* включает около 150 однолетних и многолетних видов травянистых растений, реже – вечнозеленых кустарников, произрастающих в тропических, субтропических районах Азии и интродуцированных на территориях Южной и Северной Америки, Африки, Европы [6; 7]. Такие религии, как христианство и индуизм, с давних времен придавали символическое и ритуальное значение представителям семейства Яснотковых (Lamiaceae), а именно *Ocimum basilicum L.* в христианстве и *Ocimum tenuiflorum L.* (син. *Ocimum sanctum L.*) в индуизме. Этот фактор сыграл значительную роль в дальнейшем распространении базилика, часто называемого «королем трав». Растение было популярно не только благодаря своей сакральной и декоративной ценности, но и лечебным свойствам. Собранная в период цветения трава и семена упоминались в различных учебниках по фитотерапии и травниках [8]. Базилик обладает противоаллергенным, обезболивающим, противовоспалительным, антиоксидантным, антимикробным, гипогликемическим, гепатопротектор-

ным, антигиперлипидемическим, противоязвенным, гипотензивным, кардиопротекторным, цитопротекторным, иммуномодулирующим, кардиостимулирующим, седативным, спазмолитическим, антиноцицептивным, противосудорожным, химиопрофилактическим, химиомодулирующим, противораковым, ларвицидным и др. свойствами [9-12]. Фармакологический потенциал лекарственного растения объясняется наличием широкого спектра биологически активных соединений.

Базилик отличается высокой питательной ценностью, что обусловлено присутствием в его составе жиров, белков, витаминов (включая С, Е, К, А, β -каротин, В₁, В₂, В₃, В₅, В₆, В₉ и холин), минеральных веществ (Fe, Ca, Mg, P, Mn, Na, K, Zn), а также множества вторичных метаболитов, таких как эфирные масла, фенолы, флавоноиды, антоцианы, дубильные вещества и стероиды [12].

Лекарственное растительное сырье включает первичные и вторичные метаболиты. Первичные метаболиты включены в процессы роста, развития и репродукции. Вторичные метаболиты способствуют взаимодействию организма с окружающей средой, выполняя экологические функции [13]. Присутствие последних в растительном сырье в значительной степени определяет его биологическую ценность, вкус и аромат. Фотосинтетические пигменты, а именно хлорофиллы и каротиноиды, относятся к изопrenoидным липидам, участвующим в поглощении квантов света, оптимальном перераспределении энергии между реакционными центрами фотосистем, защите от окислительного стресса [14].

Оксигенные фотосинтезирующие организмы содержат хлорофилл а и хлорофилл b. Хлорофилл а – наиболее распространенная форма, присутствующая в реакционных центрах и светособирающих комплексах; хлорофилл b, напротив, у высших растений функционирует как вспомогательный светособирающий пигмент [15]. Каротиноиды можно разделить на две группы: каротины (α -каротин, β -каротин, γ -каротин, ликопин) и ксантофиллы (β -криптоксантин, лютеин, зеаксантин, астаксантин). Они входят в состав светособирающей антенны и расширяют спектральный диапазон фотосинтетически активной радиации (ФАР). Как следствие, играют важную роль в фотосинтезе и фотозащите, способствуя поглощению света и гашению избыточной энергии. При этом в нефотосинтезирующих органеллах ксантофиллы действуют как антиоксиданты, цветочные аттрактанты и предшественники растительных гормонов [16].

Эфирные масла (ЭМ), состоящие преимущественно из производных терпеноидов (моно- и сесквитерпены) и фенилпропаноидов, содержат летучие соединения, которые отвечают за характерный аромат многих растений [17]. Они обладают высокой практической ценностью благодаря своим терапевтическим свойствам и применению во многих отраслях промышленности (фармацевтическая, пищевая, косметическая и др.) [7, 18]. Биосинтез летучих соединений осуществляется в определенных типах клеток – железистых трихомах, присутствующих на всех частях растения [19]. По наличию преобладающих компонентов в составе ЭМ базилик подразделяют на хемотипы, среди которых наиболее распространенные: метилхавикольный, линалоольный, метилэвгенольный, эвгенольный и гераниольный [20; 21]. Другие компоненты, часто встречающиеся в ЭМ *Ocimum* spp., 1,8-цинеол, гермакрин D, β -бергамотен и t-кадинол, реже можно обнаружить геранилацетат, β -кариофиллен, p-цимен, цитраль, β -бисаболен, метилэвгенол [6; 22].

Фенольные соединения (ФС) – обширная группа разнообразных водорастворимых вторичных соединений, которые часто представлены гликозидами [18]. Эти природные антиоксиданты локализуются в вакуолях растительных клеток и способны защищать клеточные мембраны от индуцированного окислительного стресса и повреждения свободными радикалами [7].

Антоцианы и другие флавоноиды, в том числе флавоны, флавонолы и проантоцианидины, представляют собой группу специализированных растительных метаболитов, отвечающих за множество функций, помимо окрашивания плодов, цветков, листьев [18; 23]. Они могут выступать симбиотическими азотфиксаторами, фильтрами ультрафиолета, аттрактантами, ингибиторами клеточного цикла, химическими посредниками и физиологическими регуляторами, а также участвовать в защите от фитопатогенов [7].

Содержание первичных и вторичных метаболитов в растениях определяется как генетическими факторами, так и факторами окружающей среды. Кроме того, на количество и качество активных компонентов влияют условия выращивания, фаза онтогенеза, отобранная часть растения, а также способ пробоподготовки и метод анализа [7].

Несмотря на существующий прогресс в применении светодиодных технологий при выращивании ароматических растений семейства Яснотковых (*Lamiaceae*) [24–28], малоизученными остаются вопросы, связанные с регулированием спектрального состава светодиодов для направленной стимуляции роста и биосинтеза ценных биологически активных соединений.

Цель нашего исследования состояла в изучении влияния светодиодного освещения с различным спектральным составом света на накопление пигментов и вторичных метаболитов в листьях базилика (*Ocimum basilicum* L. образец №232/21, Лучано и *O. × citriodorum* Vis. Каприз) в условиях интенсивной светокультуры.

Материалы и методы исследований

Работу проводили в условиях вертикальной сити-фермы с управляемым LED-освещением ФИЦ Биотехнологии РАН.

1. Растительный материал и условия выращивания

Для изучения были использованы сорта *O. × citriodorum* Vis. Каприз (ФГБНУ ФНЦО) и *Ocimum basilicum* L. образец №232/21 (из коллекции ФГБНУ ФНЦО), Лучано (компания «Гавриш»).

У О. × citriodorum Vis. Каприз – растения высотой 35–40 см, листья длиной 4,5–5,5 см, овальные, желтовато-зеленые, опушенные, с сильным лимонным запахом. Соцветие длинное, узкое, цветки белые. *У Ocimum basilicum* L. образец №232/21 – растения высотой 22–27 см, листья широко-яйцевидные, зеленые с сизым налетом, нежные, длиной 3,5–4,5 см. Соцветие длинное, узкое, цветки бледно-розовые. *У Ocimum basilicum* L. Лучано – растения высотой 35–40 см, листья выпуклые, слабопузырчатые, овальные, зеленые, длиной 6,0–7,0 см. Соцветие длинное, узкое, цветки белые.

В качестве субстрата использовали торфяной грунт «Агробалт-С». Семена растений высевали в 96-ячеечные рассадные кассеты. Сеянцы в возрасте 5 дней пикировали в горшки Р9. Выращивали по 30 растений (10 штук в каждой повторности) каждого сорта на стеллаже 50x100x50 см. Полив осуществляли регулярно из расчета 70% от полной влагоемкости почвы. В качестве некорневых подкормок применяли водорастворимое удобрение «FERTIKA-Люкс» (АО «Фертика», РФ).

В рамках исследований было изучено влияние комбинаций различных цветов спектра в соответствии со светодиодами фирмы Plant Lighting (Edison Opto Corporation Ltd., Нью-Тайбэй, Тайвань). Характеристики светодиодов: белый (Б) (White, 4000 К), красный (К) (Red, 650–670 нм), синий (С) (Blue, 450–460 нм) и розовый (Р) (DeepPink, 400–800 нм). Режим освещения – фотопериод 14/10 ч (свет/темнота). Параметры микроклимата: температура 22±2°C, относительная влажность 55±5%. Режимы освещения различались по интенсивности свечения светодиодов каждого цвета в процентах от максимальной. Использовались следующие экспериментальные режимы освещения, С/Б/К/Р (%): 1) 25/70/25/25, 2) 50/80/25/50, 3) 50/60/50/25, 4) 50/70/25/25.

Спектральные характеристики источников света измеряли с помощью спектрометра Uprtek MK350S Premium (UnitedPower Research Technology Corporation, Тайвань) на расстоянии 25 см от листовой поверхности в 9 точках. Плотность фотонного потока (PPFD) для каждого варианта составляла 128, 149, 126 и 148 мкмоль/0,5 м²/с соответственно, уровень освещенности – 5708, 6268, 5079, 6437 лм/0,5 м² соответственно. Энергетическая облученность (мВт/0,5 м²) светодиодов представлена в таблице 1.

2. Определение хлорофиллов и каротиноидов

Полностью развитые листья с растений в фазе бутонизации брали с главных побегов из 4–5 узла. Отбор образцов

Таблица 1. Энергетическая облученность (мВт/0,5 м²) в различных областях спектра при экспериментальном светодиодном освещении
Table 1. Energy irradiation (mW/0.5 m²) in various spectral regions under experimental LED lighting

Область спектра	Варианты LED-освещения (С:Б:К:Р)			
	25:70:25:25	50:80:25:50	50:60:50:25	50:70:25:25
380–780 нм	26336	30661	26220	30805
400–700 нм	25278	29290	25292	29779
Синяя (400–500 нм)	6104	7719	7563	8624
Зеленая+Желтая (500–600 нм)	6938	7431	5995	7834
Красная (600–700 нм)	12376	14294	11856	13476
Дальняя красная (700–780 нм)	1081	1408	952	1050

осуществляли с использованием механического перфоратора для обеспечения представительности аналитических навесок. На листовой поверхности, избегая крупных жилок, вырезали круглые диски диаметром 5 мм. Взвешивали 20 мг смешанной пробы с точностью до 0,001 г. Полученную навеску помещали в пробирку Эппендорф объемом 1,5 мл вместе с шариком из нержавеющей стали диаметром 3 мм. Для предотвращения феофитинизации добавляли ~50 мг MgO (ч., АО «ЛенРеактив», Россия). Далее вносили 1,0 мл охлажденного до 4°C ацетона (ч.д.а., АО «ЭККОС-1», Россия) и измельчали на гомогенизаторе TissueLyser II (QIAGEN, Германия). Встряхивание продолжали в течение 5 мин с частотой колебаний 20 Гц. Полученную суспензию осаждали в центрифуге ВКС-ТН24R (Biobase, Китай) при температуре 10°C со скоростью 500 x g (RCF) в течение 5 мин. Затем отбирали надосадочную жидкость и переносили в калиброванную пробирку объемом 15 мл. Снова вносили 1,0 мл охлажденного экстрагента в пробирку с осадком и повторяли цикл (~3 раза) до тех пор, пока надосадочная жидкость не станет прозрачной. Экстракт в пробирках доводили до метки (5 мл) охлажденным ацетоном (ч.д.а., АО «ЭККОС-1», Россия). Далее подготовленные растворы центрифугировали при температуре 10°C со скоростью 700 x g (RCF) в течение 10 мин [29; 30].

Данный способ пробоподготовки позволяет повысить сходимость результатов измерений, а также улучшить воспроизводимость и правильность анализа. Количественное определение следует проводить сразу после приготовления экстрактов с целью получения точных показателей содержания фотосинтетических пигментов [30].

Дальнейшую работу осуществляли на двухлучевом спектрофотометре UV-1900i (Shimadzu, Япония) в кварцевых кюветах, закрытых крышкой, с толщиной поглощающего слоя 10 мм.

Содержание хлорофиллов *a* и *b*, суммарных каротиноидов находили путем получения аналитического сигнала при длинах волн 662, 645, 470 нм. Мутность растворов проверяли при длинах волн 750, 520 нм. С целью соблюдения закона Бугера-Ламберта-Бера значения оптических плотностей должны находиться в диапазоне 0,3-0,85 [31].

Экстракты, при необходимости, разбавляли таким образом, чтобы полученные величины оптической плотности для каждого пигмента находились в оптимальном диапазоне. Стоит отметить, что пробоподготовку и измерение аналитического сигнала проводили при тусклом свете.

Для расчета количества (мг/г) хлорофиллов *a* (Chl*a*) и *b* (Chl*b*), общего содержания каротиноидов (*x+c*) использовали следующие уравнения [30; 32]:

$$\begin{aligned} \text{Chl}_a &= \frac{(11,75A_{662} - 2,35A_{645}) \cdot V}{m}; \\ \text{Chl}_b &= \frac{(18,61A_{645} - 3,96A_{662}) \cdot V}{m}; \\ x+c &= \frac{(1000A_{470} - 2,27C_a - 81,4 C_b) \cdot V}{227 \cdot m}, \end{aligned}$$

где *A* – оптическая плотность экстракта; *V* – общий объем экстракта с учетом разбавления, л; *m* – масса навески, г.

Измерение проводилось в четырехкратной биологической и двукратной аналитической повторностях. Результат пересчитывали на сырое вещество (мг/г).

Исследование выполнено на базе ИНО ФЦК УН ЦКП «Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева).

3. Определение суммы флавонолов и фенольных соединений (ФС)

Для исследования использовали верхние листья главных побегов с растений в фазе бутонизации. Отбор образцов осуществляли точно с использованием механического перфоратора, избегая крупных жилок, с целью получения представительной пробы. Экстракцию измельченного свежего растительного сырья проводили трижды с помощью ультразвуковой ванны Elmasonic Select 100 (Elma, Германия), работающей на частоте 37 кГц с мощностью 40 Вт/л, при температуре 60°C в течение 30 минут раствором 70% этанола (х.ч., «Экрос», Россия) при соотношении сырье : экстрагент = 1 : 20 г/мл [33]. Экстракты осаждали в центрифуге ВКС-ТН24R (Biobase, Китай) при температуре 4°C со скоростью 7000 x g в течение 10 мин [34]. Полученные супернатанты отбирали в калиброванные пробирки объемом 15 мл, доводили до метки экстрагентом и хранили при температуре 4°C [33].

Общее содержание ФС определяли спектрофотометрическим методом [35] в модификации [36] с использованием реактива Фолина-Чокальтеу (Alpha Chemika, Индия). Измерение проводилось в трехкратной биологической и двукратной аналитической повторностях. Аналитический сигнал получали с помощью двухлучевого спектрофотометра UV-1900i (Shimadzu, Япония). Концентрацию вычисляли по калибровочной кривой галловой кислоты (CAS 149-91-7, ООО «Геофарма», Россия) в диапазоне измерений от 10 до 45 мг/л при $\lambda_{\text{max}} = 765$ нм. Результаты выражали в мг-экв. галловой кислоты / г сырой массы.

Общее содержание флавонолов [37] определяли спектрофотометрически по модифицированному [38] методу Харборна [18] с использованием алюминия хлористого 6-водного (ч.д.а., АО «ЛенРеактив»). Измерение проводилось в трехкратной биологической и двукратной аналитической повторностях. Оптическую плотность определяли с помощью двухлучевого спектрофотометра UV-1900i (Shimadzu, Япония). Концентрацию вычисляли по калибровочной кривой кверцетина (CAS 117-39-5, ООО «Геофарма», Россия) в диапазоне измерений от 4 до 14 мг/л при $\lambda_{\text{max}} = 425$ нм. Результаты выражали в мг-экв. кверцетина / г сырой массы.

Исследование выполнено с использованием оборудования ИНО ФЦК УН ЦКП «Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений» (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева).

4. Выделение эфирного масла и определение его компонентного состава

Растения срезали в фазе цветения, раскладывали и сушили при температуре 23...25°C на лабораторных столах до состояния ломкости листьев. Для определения ЭМ использовали метод гидродистилляции с приемником Гинзберга. Навеску листьев помещали в круглодонную колбу объемом 1000 мл и добавляли дистиллированную воду в соотношении 1:2. Смесь перегоняли с водяным паром в течение 60 мин. Выход ЭМ (г/100 г) определяли в пересчете на воздушно-сухое вещество. Анализ проводили

на кафедре химии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Состав компонентов ЭМ исследовали на хроматографе GC 2010 Plus с квадрупольным масс детектором GCMSQP2010 Ultra (Shimadzu, Япония). Хроматографическое разделение проводили на капиллярной колонке MDN-5 (Supelco, США) (30 м × 0.25 мм × 0.25 мкм). В качестве газа-носителя использовали гелий со скоростью потока 1 мл/мин (линейная скорость 36,5 см/с) и отношением деления 1:10. Рабочие параметры: температура инжектора 180°C, интерфейса 205°C, детектора 200°C. Температурный режим термостата: 60°C в течение 2 мин, 5°C/мин до 120°C, 10°C/мин до 150°C, 30°C/мин до 300°C, 300°C в течение 2 минут. Диапазон регистрации масс составлял от 29 до 400 m/z. Идентификацию пиков осуществляли с использованием библиотеки масс спектров NIST 11 (США). Результат выражали в % на воздушно-сухое вещество. Анализ проводился в аналитической лаборатории ФИЦ Биотехнологии РАН.

5. Обработка результатов

Статистическую обработку полученных данных проводили при помощи языка программирования R 4.5.1 с

интегрированной средой разработки RStudio 1.4.1717 (RStudio PBC, США). Для оценки статистической значимости наблюдаемых различий показателей применяли двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с поправкой Тьюки на множественные сравнения. Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Фотосинтетические пигменты

Результаты исследований содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) в листьях базилика, выращенного при различных вариантах LED-освещения, представлены на рисунках 1-3.

Концентрация хлорофилла *a* в сортах *O. × citriodorum* Vis. Каприз, *Ocimum basilicum* L. образец №232/21 и *Ocimum basilicum* L. Лучано находилась в следующих диапазонах: 0,87-1,12, 0,51-1,03 и 0,75-1,38; хлорофилла *b* – 0,30-0,36, 0,14-0,34 и 0,24-0,41; каротиноидов – 0,23-0,32, 0,13-0,25 и 0,20-0,29 соответственно. Режим 50:60:50:25 (с высоким соотношением энергетической облученности С:К=0,6 и С:З-Ж=1,3 длин волн), характеризующийся низкой освещенностью – 5079 лм/0,5 м², способствовал наибольшему накоплению пигментов практически во всех

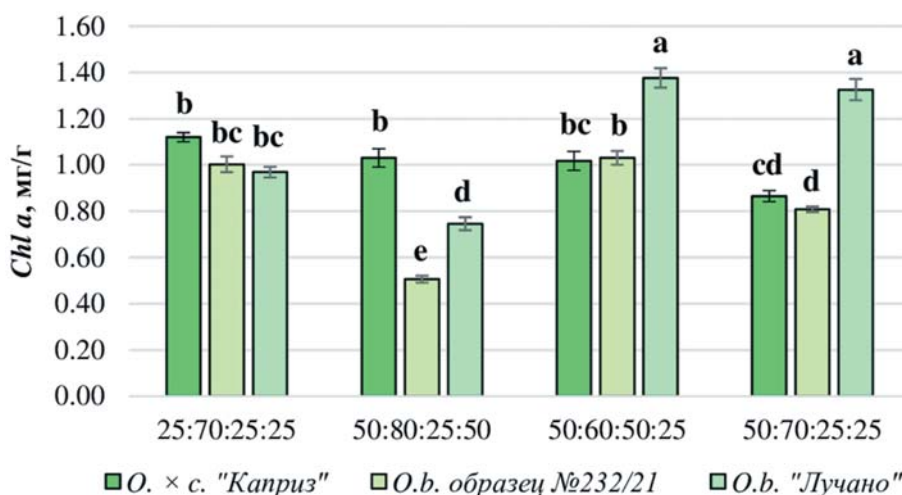


Рис. 1. Содержание Chl *a* (мг/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 1. Content of Chl *a* (mg/g of raw weight) in basil leaves using variable LED lighting modes (B:W:R:DP). Different letters (a, b, c, d, e) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$) between the variants (Tukey test)

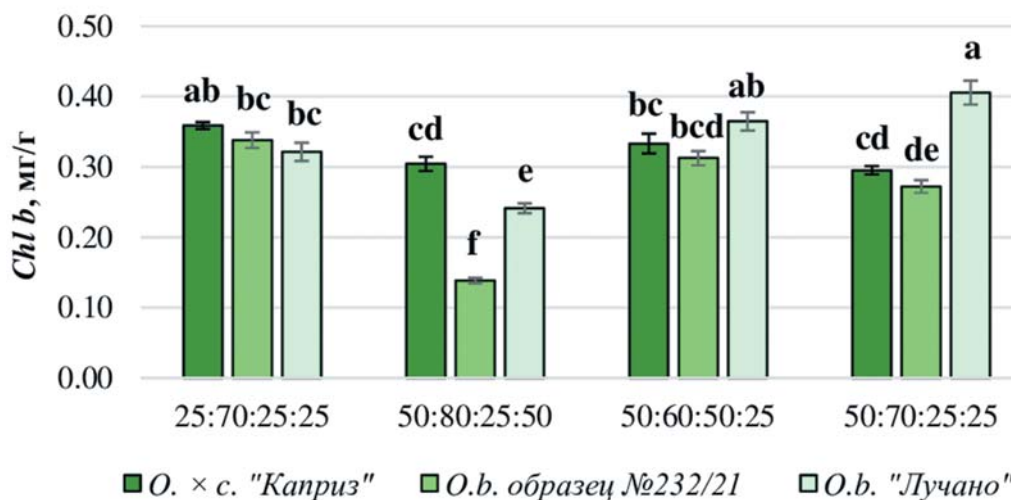


Рис. 2. Содержание Chl *b* (мг/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 2. Content of Chl *b* (mg/g of raw weight) in basil leaves using variable LED lighting modes (B:W:R:DP). Different letters (a, b, c, d, e, f) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$) between the variants (Tukey test)

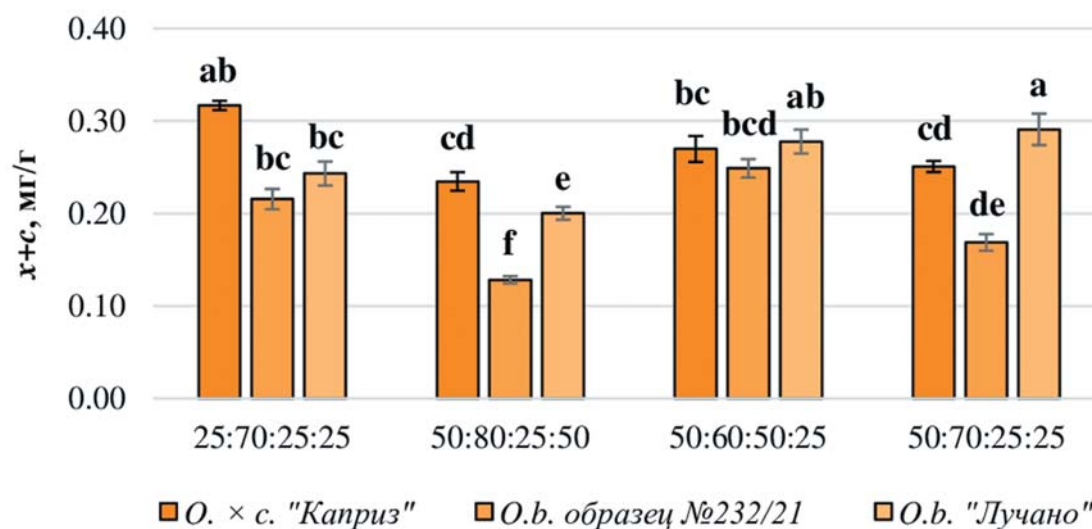


Рис. 3. Содержание х+с (мг/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
 Fig. 3. Content of carotenoids (mg/g of raw weight) in basil leaves using variable LED lighting modes (B:W:R:DP). Different letters (a, b, c, d, e, f) indicate statistically significant differences ($p < 0,05$) between the variants (Tukey test)

образцах растений, напротив, режим 50:80:25:50 (с низким соотношением энергетической облученности К:ДК = 10 длин волн), характеризующийся высокой освещенностью = 6268 лм/0,5 м², приводил к снижению концентраций хлорофиллов и каротиноидов. При этом значительные изменения содержания фотосинтетических пигментов по экспериментальным вариантам были у *O. basilicum* в отличие от *O. citriodorum*. Учитывая содержание влаги (~85%) в листьях, полученные данные можно сопоставить с литературными [39-42] (в пересчете на мг/г сухого вещества).

При выращивании растений *O. basilicum* L. сорта Dolly (возраст 56 дней) в условиях 12-часового режима фотопериода с фотонной облученностью 300 мкмоль/м²/с на расстоянии 100 см количество хлорофилла а варьировало в диапазоне 9,3-10,7; хлорофилла b – 2,1-2,3; каротиноидов – 2,7-3,6 [39], что значительно превышало (~в 2 раза) полученные нами данные в связи с сортовыми особенностями и расстоянием до фитолампы. При этом в варианте LED-освещения, отличающегося самой высокой долей красной и дальней красной длин волн, самой низкой долей синей и зеленой + желтой длин волн, а также низким отношением красного света к дальнему красному, наблюдалось снижение концентрации фотосинтетических пигментов, что аналогично полученным нами результатам.

При выращивании микрозелени *O. basilicum* L. сорта Sweet Genovese (возраст 17 дней) в условиях 12-часового режима фотопериода с использованием фитоламп, характеризующихся фотонной облученностью 120-180 мкмоль/м²/с содержание хлорофилла а колебалось в районе 4,8-6,8; хлорофилла b – 2,1-3,3; каротиноидов – 1,0-1,5 [40]. При выращивании микрозелени *O. basilicum* L. сорта Sweet Genovese (возраст 25 дней) в условиях 24-часового фотопериода с использованием фитоламп, характеризующихся фотонной облученностью 300 мкмоль/м²/с концентрация хлорофилла а находилась в диапазоне 5,3-7,3; хлорофилла b – 1,8-2,3; каротиноидов – 2,7-3,8 [41]. Снижение содержания хлорофиллов наблюдалось при обработке светом с высокой долей красной длины волны. И значения, и найденная зависимость сов-

падали с достигнутыми нами данными.

Стоит отметить, что в растениях *Lactuca sativa* L. var. longifolia при высокой плотности фотосинтетического фотонного потока (194,54 мкмоль/м²/с) содержание хлорофиллов и каротиноидов было наименьшим, тогда как обратное наблюдалось для самой низкой фотонной облученности (151,41 мкмоль/м²/с) [42], что соотносилось с нашими результатами. Авторы [42] предположили, что при высокой интенсивности освещения количества азота было недостаточным для поддержания фотосинтеза.

Так, сочетание высокоэнергетического синего света с низкоэнергетическим дальним красным светом может увеличить как вегетативный рост, так и уровень фотосинтетических пигментов. Однако, использование высоких уровней дальнего красного света может привести к антагонизму с красным или синим светом, что способствует снижению хлорофиллов и каротиноидов [4; 43]. Вышесказанное подтверждается нашими результатами.

2. Вторичные метаболиты

Сортовые особенности растений базилика определяют отклик ФС на преобладание конкретной области в спектральном составе LED-освещения. В исследуемых образцах по процентному соотношению вычисляли преобладающие компоненты ЭМ (табл. 2).

В ЭМ изученных образцов базилика было выявлено до 30 различных компонентов, среди которых преобладали фенилпропаноидные (estragole, eugenyl acetate, methyl cinnamate), монотерпеновые (1,8-cineole, β -ocimene, linalool, cis-citral, trans-citral) и сесквитерпеновые (germacrene D, trans- α -bergamotene, α -bergamotene) соединения.

В таблице 2 представлены объединенные образцы каждого сорта из-за низкого выхода ЭМ. Судя по преобладающим компонентам, сорт Каприз относится к цитральному хемотипу, Лучано – линалоольному, а образец №232/21 – метилциннаматному.

Результаты исследований содержания фенольных соединений, в том числе флавонолов, в листьях базилика, выращенного при различных вариантах LED-освещения, представлены на рис. 4-5.

Таблица 2. Доля основных компонентов эфирного масла (ЭМ) в листьях базилика, %
Tab. 2. The proportion of the main components of essential oil (EO) in basil leaves, %

Компоненты ЭМ	<i>O. × citriodorum</i> Каприз	Компоненты ЭМ	<i>O. basilicum</i> Лучано	Компоненты ЭМ	<i>O. basilicum</i> образец №232/21
Estragole	12,25	1,8-Cineole	3,37	β-Ocimene	2,92
cis-Citral	29,10	Linalool	44,76	Methyl cinnamate	86,58
trans-Citral	42,41	Eugenyl acetate	16,31	α-Bergamotene	1,05
Germacrene D	2,99	trans-α-Bergamotene	7,51	Germacrene D	1,46

Концентрация ФС в сортах *O. × citriodorum* Vis. Каприз, *Ocimum basilicum* L. образец №232/21 и *Ocimum basilicum* L. Лучано находилась в следующих диапазонах: 6,17-10,66, 4,05-5,38 и 5,19-7,90; флавонолов – 0,29-0,47, 0,18-0,25 и 0,21-0,31 соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что экспериментальные режимы LED-освещения влияют на состав вторичных метаболитов в зависимости от сортовых особенностей растений. Для линалоольного хемотипа базилика (сорт Лучано) накопление ФС происходило при режимах

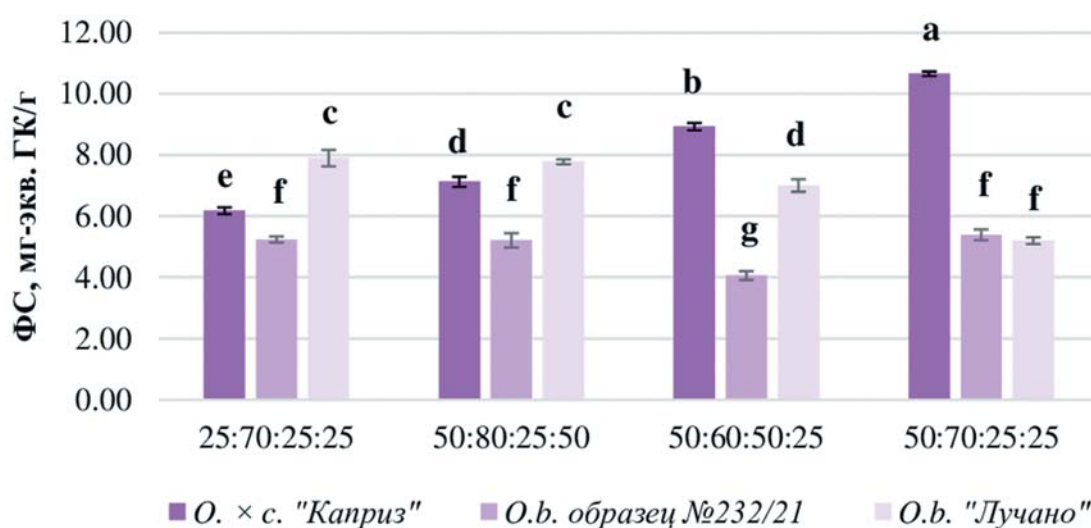


Рис. 4. Содержание ФС (мг-экв. ГК/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f, g) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 4. Content of phenolic compounds (mg-eq. GA/g of raw weight) in basil leaves using variable LED-lighting modes (B:W:R:DP). Different letters (a, b, c, d, e, f, g) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$) between the variants (Tukey test)

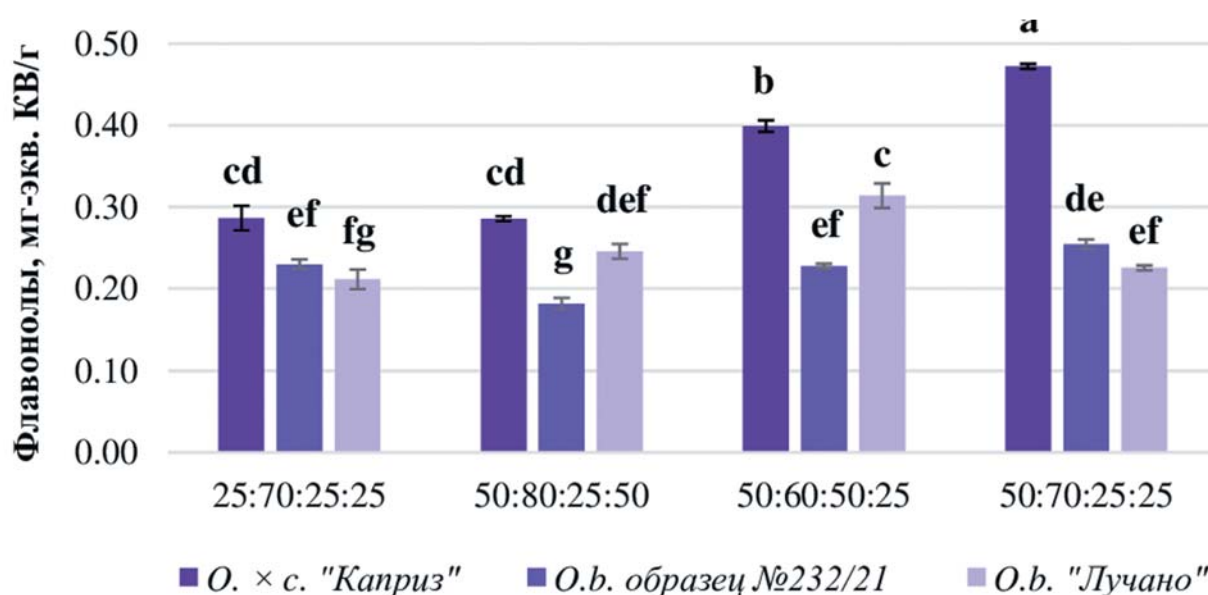


Рис. 5. Содержание флавонолов (мг-экв. КВ/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f, g) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 5. Content of flavonols (mg-eq. GA/g of raw weight) in basil leaves using variable LED-lighting modes (B:W:R:DP). Different letters (a, b, c, d, e, f, g) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$) between the variants (Tukey test)

освещения 25:70:25:25 и 50:80:25:50, характеризующихся высокой долей красного света по сравнению с другими вариантами. Напротив, при режиме с низкой освещенностью (50:60:50:25) содержание флавонолов возрастало. Цитральный хемотип базилика (сорт Каприз) отличался самыми высокими концентрациями ФС и флавонолов, преобладающих в варианте LED-освещения, характеризующегося максимальной освещенностью (50:70:25:25). Однако, наименее заметны были изменения в накоплении ФС у метилциннаматного хемотипа базилика (образец №232/21). При этом флавонолы преобладали в варианте с максимальной освещенностью (50:70:25:25). Учитывая содержание влаги (~85%) в листьях, полученные данные можно сопоставить с литературными [38; 40; 41; 44] (в пересчете на мг/г сухого вещества).

В ранее упомянутых исследованиях при выращивании микрозелени базилика сорта Sweet Genovese (основной компонент – линалоол) с использованием вариативного светодиодного освещения общее содержание ФС варьировало от 24 до 43 мг-экв. ГК/г [40], накопление наблюдалось при высокой доле красного света, что совпадало с полученными данными для растения в фазе бутонизации сорта Лучано. При выращивании микрозелени базилика сорта Кароог (основной компонент – метилциннамат) количество ФС находилось в диапазоне от 92 до 162 мг-экв. ГК/г [41], накопление наблюдалось при монохромном синем излучении, аналогичная тенденция прослеживалась в результатах растений в фазе бутонизации образца №232/21. При выращивании *O. basilicum* × *O. americanum* (основной компонент – цитраль) в условиях 12-часового режима фотопериода с использованием белого светодиодного освещения, характеризующегося плотностью фотонного потока 300, 550 и 1350 мкмоль/м²/с, общее содержание ФС в листьях лимонного базилика (возраст 42 дня) возрастало от 86 до 129 мг-экв. ГК/г [44] с увеличением интенсивности облучения, что соответствовало полученным данным для растений в фазе бутонизации сорта Каприз.

В листьях *O. basilicum* L. (образец №8234), произрастающего в естественных условиях, содержание флавонолов было на уровне 0,71 [38], что значительно меньше (~в 2-3 раза) полученных нами данных в связи с условиями выращивания. Преобладание флавонолов в конкретных режимах LED-освещения, а также появление тенденции с ФС, может быть связано с высоким уровнем УФ-излучения и сортовыми особенностями растений базилика [45].

Синтез ФС происходит из фенилаланина с участием ферментов, регулируемых на различных уровнях, в том числе активными формами кислорода (АФК), образующимися в результате избытка света, и активностью светочувствительных транскрипционных факторов [16].

Преобладание фенилпропаноидных компонентов в ЭМ – признак качества пряно-ароматических культур. Однако выход эфирных масел может демонстрировать низкую корреляцию с антиоксидантной активностью, обусловленной, как правило, повышенным содержанием ФС [46].

Заключение

Целенаправленное манипулирование спектральным составом LED-освещения позволяет эффективно регулировать биосинтез первичных и вторичных метаболитов в

листьях базилика (*O. basilicum* L. и *O. × citriodorum*) в условиях интенсивной светокультуры. Комбинируя светодиоды синего (С, 450–460 нм), белого (Б, 4000 К), красного (К, 650–670 нм) и розового (Р, 400–800 нм) спектра, удалось подобрать режим освещения с «полезным» соотношением длин волн в видимом диапазоне, что подтверждает универсальность LED-технологий для управления метаболизмом растений.

Режим 50:60:50:25 с высоким соотношением энергетической облученности С:К (0,6) и С:З-Ж (1,3) длин волн при низкой освещенности (5079 лм/0,5 м²) и плотности фотонного потока (126 мкмоль/0,5 м²/с) обеспечивал увеличение хлорофилла а (до 1,38 мг/г), хлорофилла b (до 0,36 мг/г) и каротиноидов (до 0,28 мг/г). Тогда как режим 50:80:25:50 с низким соотношением энергетической облученности К:ДК (10) длин волн при высокой освещенности (6268 лм/0,5 м²) и плотности фотонного потока (149 мкмоль/0,5 м²/с) приводил к снижению фотосинтетических пигментов. По-видимому, синий свет активирует экспрессию генов биосинтеза хлорофилла, а избыточная энергия красного/дальнего красного света индуцирует фотопротекцию и деградацию пигментов.

Сортовые различия в стресс-ответе возникали из-за природы преобладающих соединений в ЭМ растений. Цитральный хемотип (*O. × citriodorum* Каприз) проявлял наибольшую чувствительность: максимум ФС (10,66 мг-экв. ГК/г) и флавонолов (0,47 мг-экв. КВ/г) наблюдался при режиме 50:70:25:25 с высокой освещенностью (6437 лм/0,5 м²), что указывает на активацию фенилпропаноидного пути как защитной реакции на фотоокислительный стресс. Линалоольный хемотип (*O. basilicum* Лучано) накапливал ФС при режимах с высокой долей красного света (25:70:25:25; 50:80:25:50), тогда как метилциннаматный хемотип (образец №232/21) демонстрировал минимальные колебания содержания, подтверждая генетическую устойчивость.

Растения испытывают меньший стресс при режиме 50:80:25:50, где накапливается небольшое количество каротиноидов и ФС, что минимизирует избыточное образование АФК и предотвращает активацию стресс-индуцированных транскрипционных факторов. Различия между сортами обусловлены генотип-специфичной регуляцией фоторецепторов и антиоксидантных систем.

Однако направленная стимуляция биосинтеза ценных биологически активных соединений, в том числе вторичных метаболитов, улучшает качество пряно-ароматических культур. Под воздействием стресса углеродный поток перенаправляется от биосинтеза терпеноидов к производству фенольных соединений, что вероятно приведет к увеличению антиоксидантной активности и снижению выхода ЭМ. Можно предположить, что оптимальным LED-режимом для получения высокого выхода ЭМ будет 25:70:25:25.

Таким образом, предложенные LED-режимы позволяют направленно модулировать биохимический профиль базилика, обеспечивая либо высокую антиоксидантную активность (ФС↑), либо максимальный выход эфирного масла (ЭМ↑). Полученные данные имеют прикладное значение для промышленного производства функциональной растительной продукции с заданными свойствами.

• Литература / References

1. Appolloni E., Pennisi G., Zauli I., Carotti L., Paucek I., Quaini S., et al. Beyond Vegetables: Effects of Indoor LED Light on Specialized Metabolite Biosynthesis in Medicinal and Aromatic Plants, Edible Flowers, and Microgreens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022;102(2):472–487. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11513>
2. Livadariu O., Maximilian C., Rahmanifar B., Cornea C.P. LED Technology Applied to Plant Development for Promoting the Accumulation of Bioactive Compounds: A Review *Plants*. 2023;12(5):1075. <https://doi.org/10.3390/plants12051075>
3. Yan Z., Li X., Li Z., Song J., Dou H., Yang Y., et al. How to Utilize Far-Red Photons Effectively: Substitution or Supplementation with Photosynthetically Active Radiation? A Case Study of Greenhouse Lettuce. *BMC Plant Biology*. 2025;25(1):228. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06205-6>
4. Kim D., Son J.E. Adding Far-Red to Red, Blue Supplemental Light-Emitting Diode Interlighting Improved Sweet Pepper Yield but Attenuated Carotenoid Content. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:938199. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.938199>
5. Hereman S. Paxton's Botanical Dictionary. London: Bradbury, Evans & Co.; 1868.
6. Dudai N., Nitzan N., Gonda I. *Ocimum basilicum* L. (Basil). In: Novak J., Blüthner W.-D., editors. Medicinal, Aromatic and Stimulant Plants. Cham: Springer, 2020;377–406. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38792-1>
7. Jakovljević D., Skrzypek E., Stanković M., Warchol M. Phytochemical Diversity and Biological Activity of Basil (*Ocimum* L.) Secondary Metabolites Produced In Vitro. In: Kumar N., Singh R.S. Biosynthesis of Bioactive Compounds in Medicinal and Aromatic Plants. Cham: Springer, 2023;369–398. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-35221-8>
8. Ivanova T., Bosseva Y., Chervenkov M., Dimitrova D. Sweet Basil between the Soul and the Table – Transformation of Traditional Knowledge on *Ocimum basilicum* L. in Bulgaria. *Plants*. 2023;12(15):2771. DOI: 10.3390/plants12152771.
9. Gajula D., Verghese M., Boateng J., Walker L.T., Shackelford L., Mentreddy S.R., et al. Determination of Total Phenolics, Flavonoids and Antioxidant and Chemopreventive Potential of Basil (*Ocimum basilicum* L. and *Ocimum tenuiflorum* L.). *International Journal of Cancer Research*. 2009;5(4):130–143. <https://doi.org/10.3923/ijcr.2009.130.143>
10. Romano R., de Luca L., Aiello A., Pagano R., di Pierro P., Pizzolongo F., et al. Basil (*Ocimum basilicum* L.) Leaves as a Source of Bioactive Compounds. *Foods*. 2022;11(20):3212. <https://doi.org/10.3390/foods11203212>
11. da Silva W.M.F., Kringel D.H., de Souza E.J.D., da Rosa Z.E., Dias A.R.G. Basil Essential Oil: Methods of Extraction, Chemical Composition, Biological Activities, and Food Applications. *Food and Bioprocess Technology*. 2022;15(10):1–27. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02690-3>
12. Kuldeep D., Sharun K., Gugjoo M.B., Tiwari R., Alagawany M., Yatoo M.I., et al. A Comprehensive Review on Chemical Profile and Pharmacological Activities of *Ocimum Basilicum*. *Food Reviews International*. 2021;39(1):119–147. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1900230>
13. Salam U., Ullah S., Tang Z.-H., Elateeq A.A., Khan Y., Khan J., et al. Plant Metabolomics: An Overview of the Role of Primary and Secondary Metabolites against Different Environmental Stress Factors. *Life*. 2023;13(3):706. <https://doi.org/10.3390/life13030706>
14. Nguyen T.N.P., Sung J. Light Spectral-Ranged Specific Metabolisms of Plant Pigments. *Metabolites*. 2025;15(1):1. <https://doi.org/10.3390/metabo15010001>
15. Lichtenthaler H.K., Babani F. Light Adaptation and Senescence of the Photosynthetic Apparatus. Changes in Pigment Composition, Chlorophyll Fluorescence Parameters and Photosynthetic Activity. In: Papageorgiou G.C., Govindjee, editors. Chlorophyll a Fluorescence. Advances in Photosynthesis and Respiration. Dordrecht: Springer, 2004;19:713–736. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_28
16. Loi M., Villani A., Paciolla F., Mulè G., Paciolla C. Challenges and Opportunities of Light-Emitting Diode (LED) as Key to Modulate Antioxidant Compounds in Plants. A Review. *Antioxidants*. 2021;10(1):42. <https://doi.org/10.3390/antiox10010042>
17. Shirokova A.V., Dzhadoeva S.A., Ruzhitskiy A.O., Belopukhov S.L., Dmitrieva V.L., Luneva V.E., et al. Treasures Induced by Narrow-Spectrum: Volatile Phenylpropanoid and Terpene Compounds in Leaves of Lemon Basil (*Ocimum × citriodorum* Vis.), Sweet Basil (*O. basilicum* L.) and Bush Basil (*O. minimum* L.) Under Artificial Light City Farm Conditions. *Plants*. 2025;14(3):403. <https://doi.org/10.3390/plants14030403>
18. Harborne J.B. Phytochemical Methods: A Guide to Modern Techniques of Plant Analysis. 2nd ed. London: Chapman and Hall; 1984.
19. Fokou J.B.H., Dongmo P.M.J., Boyom F.F. Essential Oil's Chemical Composition and Pharmacological Properties. In: El-Shemy H.A., editor. Essential Oils – Oils of Nature. IntechOpen; 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86573>
20. Grayer R.G., Kite G.C., Goldstone F.J., Bryan S.E., Paton A., Putievsky E. Infraspecific Taxonomy and Essential Oil Chemotypes in Basil, *Ocimum basilicum*. *Phytochemistry*. 1996;43(5):1033–1039. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(96\)00429-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(96)00429-3)
21. Carovic-Stanko K., Orlić S., Politeo O., Strikić F., Kolak I., Milos M., et al. Composition and Antibacterial Activities of Essential Oils of Seven *Ocimum* Taxa. *Food Chemistry*. 2010;119(1):196–201. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.010>
22. Muráriková A., Ťažký A., Neugebauerová J., Planková A., Jampilek J., Mučaji P., et al. Characterization of Essential Oil Composition in Different Basil Species and Pot Cultures by a GC-MS Method. *Molecules*. 2017;22(7):1221. <https://doi.org/10.3390/molecules22071221>
23. Marin-Recinos M.F., Pucker B. Genetic Factors Explaining Anthocyanin Pigmentation Differences. *BMC Plant Biology*. 2024;24(1):627. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05316-w>
24. Tabbert J.M., Riewe D., Schulz H., Krähmer A. Facing Energy Limitations – Approaches to Increase Basil (*Ocimum basilicum* L.) Growth and Quality by Different Increasing Light Intensities Emitted by a Broadband LED Light Spectrum (400–780 nm). *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:1055352. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055352>
25. Rihan H.Z., Aljafer N., Jbara M., McCallum L., Lengger S., Fuller M.P. The Impact of LED Lighting Spectra in a Plant Factory on the Growth, Physiological Traits and Essential Oil Content of Lemon Balm (*Melissa officinalis*). *Plants*. 2022;11(3):342. <https://doi.org/10.3390/plants11030342>
26. Kelly N., Oehler M.A., O'Brien R., Park E., Bai J., Fonseca J.M., et al. Supplemental Light Differentially Regulates Indoor-Grown Basil (*Ocimum basilicum*) Growth, Volatile Compounds, and Sensory Attributes]. *Horticulturae*. 2025;11(8):963. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11080963>
27. Chu H.T.T., Vu T.N., Dinh T.T.T., Do P.T., Tien T.Q., Tong Q.C., et al. Optimization of Supplemental LED Spectral Quality and Light Dose for Enhancing Biomass and Essential Oil Yield of *Ocimum gratissimum* L. Under Net House Condition. *Molecules*. 2025;30(18):3753. <https://doi.org/10.3390/molecules30183753>
28. Tabbert J.M., Schulz H., Krähmer A. Investigation of LED Light Qualities for Peppermint (*Mentha x piperita* L.) Cultivation Focusing on Plant Quality and Consumer Safety Aspects. *Frontiers in Food Science and Technology*. 2022;2:852155. <https://doi.org/10.3389/frfst.2022.852155>
29. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Extraction of Photosynthetic Tissues: Chlorophylls and carotenoids. In: Current Protocols in Food Analytical Chemistry. Suppl. 1. Unit F4.2.1-F4.2.6. New York: John Wiley; 2001. <https://doi.org/10.1002/0471142913.FAF0402S01>
30. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987;148:350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
31. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS. In: Current Protocols in

Food Analytical Chemistry. Suppl. 1. Unit F4.3.1-F 4.3.8. New York: John Wiley; 2001.
<https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
 32. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of Total Carotenoids and Chlorophylls a and b of Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochemical Society Transactions*. 1983;11:591–592.
<https://doi.org/10.1042/bst0110591>
 33. Zeković, Z., Pintać, D., Majkić, T., Vidović, S., Mimica-Dukić, N., Teslić, N., et al. Utilization of Sage by-Products as Raw Material for Antioxidants recovery – Ultrasound Versus Microwave-Assisted Extraction. *Industrial Crops and Products*. 2017;99:49–59.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.028>
 34. Larsen D.H., Li H., Shrestha S., Verdonk J.C., Nicole C.C.S., Marcelis L.F.M., et al. Lack of Blue Light Regulation of Antioxidants and Chilling Tolerance in Basil. *Frontiers in plant science*. 2022;13:852654.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.852654>
 35. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventós R.M. Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in Enzymology*. 1999;299:152–178.
[https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)90017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)90017-1)
 36. Bernatoniene J., Cizauskaite U., Ivanauskas L., Jakstas V., Kalveniene Z., Kopustinskiene D.M. Novel Approaches to Optimize Extraction Processes of Ursolic, Oleanolic and Rosmarinic Acids from *Rosmarinus officinalis* Leaves. *Industrial Crops and Products*. 2016;84:72–79.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.031>
 37. Pękal A., Pyrzyńska K. Evaluation of Aluminium Complexation Reaction for Flavonoid Content Assay. *Food Analytical Methods*. 2014;7:1776–1782. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x>
 38. da Silva L.A., Pezzini B.R., Soares L. Spectrophotometric Determination of the Total Flavonoid Content in *Ocimum basilicum* L. (*Lamiaceae*) Leaves. *Pharmacognosy Magazine*. 2015;11(41):96–101.
<https://doi.org/10.4103/0973-1296.149721>
 39. Kivimäenpää M., Mofikoya A., Abd El-Raheem A.M., Riikonen J., Julkunen-Tiitto R., Holopainen J.K. Alteration in Light Spectra Causes Opposite Responses in Volatile Phenylpropanoids and Terpenoids

Compared with Phenolic Acids in Sweet Basil (*Ocimum basilicum*) Leaves. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022;70(39):12287–12296.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c03309>
 40. Lobiuc A., Vasilache V., Oroian M., Stoleru T., Burducea M., Pintilie O., et al. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acanthaceae and Cyanic *Ocimum basilicum* L. Microgreens. *Molecules*. 2017;22(12):2111.
<https://doi.org/10.3390/molecules22122111>
 41. Fayeziadeh M.R., Ansari N.A., Sourestani M.M., Fujita M., Hasanuzzaman M. Management of Secondary Metabolite Synthesis and Biomass in Basil (*Ocimum basilicum* L.) Microgreens Using Different Continuous-Spectrum LED Lights. *Plants*. 2024;13(10):1394.
<https://doi.org/10.3390/plants13101394>
 42. Loconsole D., Cocetta G., Santoro P., Ferrante A. Optimization of LED Lighting and Quality Evaluation of Romaine Lettuce Grown in An Innovative Indoor Cultivation System. *Sustainability*. 2019;11(3):841.
<https://doi.org/10.3390/su11030841>
 43. Kong Y., Nemali K. Blue and Far-Red Light Affect Area and Number of Individual Leaves to Influence Vegetative Growth and Pigment Synthesis in Lettuce. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:667407.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.667407>
 44. Stetsenko L.A., Pashkovsky P.P., Voloshin R.A., Kreslavski V.D., Kuznetsov V.V., Allakhverdiev S.I. Role of Anthocyanin and Carotenoids in the Adaptation of the Photosynthetic Apparatus of Purple- and Green-Leaved Cultivars of Sweet Basil (*Ocimum basilicum*) to High-Intensity Light. *Photosynthetica*. 2020;58(4):890–901.
<https://doi.org/10.32615/ps.2020.048>
 45. Ali A., Santoro P., Mori J., Ferrante A., Cocetta G. Intermittent UV-B Irradiation Optimizes Secondary Metabolite Production and Growth in Red Rubin Basil. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*. 2025;37:23.
<https://doi.org/10.1007/s40626-025-00365-4>
 46. Ahmed A.F., Attia F.A., Liu Z., Li C., Wei J., Kang W. Antioxidant Activity and Total Phenolic Content of Essential Oils and Extracts of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) Plants. *Food Science and Human Wellness*. 2019;8(3):299–305. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.07.004>

Об авторах:

Дарья Сергеевна Аникина – аспирант кафедры химии ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, м.н.с. группы агробиотехнологии ФИЦ Биотехнологии РАН, <https://orcid.org/0000-0002-1357-7365>, Scopus ID: 59217774700, Researcher ID: OMM-0876-2025, SPIN-код: 2939-1720, black-cat99@inbox.ru
Анна Владимировна Широкова – кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории генетики и цитологии ФГБНУ «ФНЦО», <https://orcid.org/0000-0002-2903-6643>, Scopus ID: 57205044017, Researcher ID: JNR-8828-2023, SPIN-код: 3659-6398
Андрей Борисович Шевкунов – младший научный сотрудник группы агробиотехнологии ФИЦ Биотехнологии РАН, <https://orcid.org/0009-0005-4953-3240>, SPIN-код: 4773-6730
Валерия Львовна Дмитриева – заведующий лабораторией кафедры химии ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, <https://orcid.org/0009-0002-9126-5751>, Scopus ID: 58671853300, ResearcherID: OVY-0447-2025, SPIN-код: 5089-2559
Александр Олегович Ружикский – ведущий специалист ФИЦ Биотехнологии РАН, <https://orcid.org/0000-0003-1195-4566>, Scopus ID: 57216808650, Researcher ID: HOC-5362-2023
Лев Борисович Дмитриев – к.х.н., профессор кафедры химии ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, <https://orcid.org/0009-0009-0149-7251>, Scopus ID: 57219278823, SPIN-код: 7104-6440, ResearcherID: OXA-7967-2025
Алексей Валерьевич Жевнеров – кандидат хим. наук, доцент кафедры химии ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, <https://orcid.org/0000-0003-1658-762X>, Scopus ID: 15081849000, Researcher ID: J-4346-2013, SPIN-код: 2395-1929
Валерия Евгеньевна Радина – инженер группы агробиотехнологии ФИЦ Биотехнологии РАН, <https://orcid.org/0009-0007-0839-498X>
Софья Арсеновна Джатдоева – кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, руководитель группы агробиотехнологии ФИЦ Биотехнологии РАН, <https://orcid.org/0000-0002-6900-8399>, Scopus ID: 56049088200, Researcher ID: H-9438-2014, SPIN-код: 2456-8389

About the Authors:

Daria S. Anikina – PhD student at the Department of Chemistry (RSAU–MTAA), Junior Researcher in the Agrobiotechnology Group (Research Centre of Biotechnology RAS), <https://orcid.org/0000-0002-1357-7365>, Scopus ID: 59217774700, Researcher ID: OMM-0876-2025, SPIN-code: 2939-1720, black-cat99@inbox.ru
Anna V. Shirokova – Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Genetics and Cytology (FSBSI FSVC), <https://orcid.org/0000-0002-2903-6643>, Scopus ID: 57205044017, Researcher ID: JNR-8828-2023, SPIN-code: 3659-6398
Andrey B. Shevkunov – Junior Researcher in the Agrobiotechnology Group (Research Centre of Biotechnology RAS), <https://orcid.org/0009-0005-4953-3240>, SPIN-code: 4773-6730
Valeria L. Dmitrieva – Head of the Laboratory at the Department of Chemistry (RSAU–MTAA), <https://orcid.org/0009-0002-9126-5751>, Scopus ID: 58671853300, ResearcherID: OVY-0447-2025, SPIN-code: 5089-2559
Alexander O. Ruzhitskiy – Leading Specialist (Research Centre of Biotechnology RAS), <https://orcid.org/0000-0003-1195-4566>, Scopus ID: 57216808650, Researcher ID: HOC-5362-2023
Lev B. Dmitriev – Cand. Sci. (Chemistry), Professor at the Department of Chemistry (RSAU–MTAA), <https://orcid.org/0009-0009-0149-7251>, Scopus ID: 57219278823, SPIN-code: 7104-6440, ResearcherID: OXA-7967-2025
Alexey V. Zhevnerov – Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor at the Department of Chemistry (RSAU–MTAA), <https://orcid.org/0000-0003-1658-762X>, Scopus ID: 15081849000, Researcher ID: J-4346-2013, SPIN-code: 2395-1929
Valeriya E. Radina – Engineer in the Agrobiotechnology Group (Research Centre of Biotechnology RAS), <https://orcid.org/0009-0007-0839-498X>
Sofya A. Dzhatdоеva – Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Head of the Agrobiotechnology Group (Research Centre of Biotechnology RAS), <https://orcid.org/0000-0002-6900-8399>, Scopus ID: 56049088200, Researcher ID: H-9438-2014, SPIN-code: 2456-8389

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-169-175>
УДК: (635.5+633.11):581.1.046

М.М. Годяева^{1,2}, Т.А. Парамонова¹,
А.А. Дорохов², М.С. Широкова²

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет Почвоведения 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.12

²ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» 109428, Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5

*Автор для переписки: airrune@yandex.ru

Финансирование. Данное исследование выполнено в рамках государственного задания FGUN-2025-0003 и FGUN-2025-0008.

Вклад авторов: Годяева М.М.: концептуализация, методология, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование, визуализация. Парамонова Т.А.: проведение исследований, верификация данных, формальный анализ. Дорохов А.А.: администрирование данных, верификация данных. Широкова М.С.: проведение исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Годяева М.М., Парамонова Т.А., Дорохов А.А., Широкова М.С. Особенности стрессовых реакций однодольных и двудольных растений в присутствии биодоступных соединений свинца на примере салата посевного (*Lactuca sativa* L.) и пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.). *Овощи России*. 2025;(6):169-175.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-169-175>

Поступила в редакцию: 29.10.2025

Принята к печати: 05.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Maria M. Godyaeva^{1,2}, Tatyana A. Paramonova¹,
Artem A. Dorokhov², Maria S. Shirokova²

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science 1/12, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

²Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM" 5, 1st Institutsky passage, Moscow, 109428, Russia

*Corresponding Author: airrune@yandex.ru

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment FGUN-2025-0003 and FGUN-2025-0008.

Authors' Contribution: Godyaeva M.M.: conceptualization, methodology, investigation, writing – original draft, visualization. Paramonova T.A.: investigation, data curation, formal analysis. Dorokhov A.A.: data curation, data verification. Shirokova M.S.: investigation.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citations: Godyaeva M.M., Paramonova T.A., Dorokhov A.A., Shirokova M.S. Assessment of stress reactions of monocotyledonous and dicotyledonous plants in the presence of bioavailable lead compounds by the example of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):169-175. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-169-175>

Received: 29.10.2025

Accepted for publication: 05.12.2025

Published: 18.12.2025

Особенности стрессовых реакций однодольных и двудольных растений в присутствии биодоступных соединений свинца на примере салата посевного (*Lactuca sativa* L.) и пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.)

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Возрастающий спрос на овощные культуры стимулирует развитие круглогодичного производства сельскохозяйственных культур, – в системах открытого и закрытого грунта. Однако техногенное загрязнение тяжелыми металлами, в частности свинцом, представляет серьезную угрозу для безопасности растениеводческой продукции. Свинец относится к приоритетным загрязнителям сельскохозяйственных почв и субстратов, поскольку даже при концентрациях до 50 мг/кг способен вызывать фитотоксичность и накапливаться в товарной части урожая.

Материалы и методы. В качестве модельных объектов исследования использовались салат посевной (*Lactuca sativa* L.) сорта Азарт и пшеница яровая (*Triticum aestivum* L.) сорта Иволга. Растения культивировали в гидропонной системе с использованием стерилизованного торфа в качестве субстрата. Ацетат свинца ($Pb(CH_3COO)_2$) вносили в трех вариантах концентраций: 0 (контроль), 25 и 50 мг/кг. Эксперимент проводили в трех повторностях. На 7-й и 45-й дни культивирования определяли биометрические параметры (сырую и сухую массу растений), содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов), концентрацию свинца в корнях и надземных органах методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-AES), а также активность ключевых антиоксидантных ферментов – каталазы (CAT) и супероксиддисмутазы (SOD).

Результаты. На начальном этапе эксперимента (7-й день) существенных различий по биометрическим показателям между однодольными и двудольными культурами не обнаружено. К 45-му дню при средней концентрации свинца снижение сырой массы пшеницы было на 4,9% меньше по сравнению с салатом, при максимальной концентрации (50 мг/кг) депрессия роста салата достигла 29,7%, тогда как у пшеницы показатели были значительно ниже. Анализ аккумуляции показал, что пшеница преимущественно локализует свинец в корневой системе, демонстрируя выраженную барьерную функцию, в то время как у салата распределение металла между корнями и побегами более равномерно. Исследование антиоксидантных ферментов выявило, что при усилении стресса активность CAT возрастает, а SOD снижается у обеих культур, при этом у салата преобладает активность CAT, а у пшеницы – SOD, что свидетельствует о сохранении ферментативного баланса и адаптивной регуляции уровня активных форм кислорода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

тяжелые металлы, свинец, каталаза, фитотоксичность, гидропоника, *Lactuca sativa*, *Triticum aestivum*

Assessment of stress reactions of monocotyledonous and dicotyledonous plants in the presence of bioavailable lead compounds by the example of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and spring wheat (*Triticum aestivum* L.)

ABSTRACT

Relevance. The increasing demand for vegetable crops stimulates the development of their year-round production, including both open and protected ground systems. However, man-made pollution with heavy metals, in particular lead, poses a serious threat to the safety of crop production. Lead is one of the priority pollutants of agricultural soils and substrates, since even at concentrations up to 50 mg/kg it can cause phytotoxicity and accumulate in the commercial part of the crop.

Materials and Methods. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) of the Azart variety and wheat (*Triticum aestivum* L.) of the Ivolga variety were used as model objects of research. The plants were cultivated in a hydroponic system using sterilized peat as a substrate. Lead Acetate ($Pb(CH_3COO)_2$) was applied in three concentrations: 0 (control), 25 and 50 mg/kg. The experiment was carried out in three repetitions. On the 7th and 45th days of cultivation, biometric parameters (wet and dry plant mass), the content of photosynthetic pigments (chlorophylls *a*, *b* and carotenoids), the concentration of lead in roots and above-ground organs were determined by atomic emission spectroscopy (ICP-AES), as well as the activity of key antioxidant enzymes, catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD).

Results. At the initial stage of the experiment (day 7), no significant differences in biometric parameters were found between the cultures. By day 45, with an average concentration of lead, the decrease in the crude weight of wheat was 4.9% less than in lettuce, with a maximum concentration (50 mg/kg), the lettuce growth depression reached 29.7%, while in wheat the indicators were significantly lower. Accumulation analysis showed that wheat mainly localizes lead in the root system, demonstrating a pronounced barrier function, while lettuce has a more uniform distribution of metal between roots and shoots. The study of antioxidant enzymes revealed that, with increased stress, catalase activity increases and superoxide dismutase decreases in both crops, while lettuce is dominated by CAT activity and wheat by SOD, which indicates the preservation of enzymatic balance and adaptive regulation of the level of reactive oxygen species.

KEYWORDS:

heavy metals, lead, catalase, phytotoxicity, hydroponics, *Lactuca sativa*, *Triticum aestivum*

Введение

Поступление тяжелых металлов, в частности свинца, в пищевую продукцию, является одной из наиболее острых проблем, обусловленных интенсивной антропогенной деятельностью, актуальных для современной продовольственной безопасности. Свинец поступает в окружающую среду из многочисленных источников: металлургического производства, сжигания топлива, применения пестицидов и удобрений, производства аккумуляторов, однако в гидропонные растворы соединения свинца чаще попадают из комплексов микроэлементов, водопроводной воды и из материала фиттингов и труб. По классификации Агентства по охране окружающей среды, свинец занимает второе место среди наиболее опасных для здоровья человека химических веществ, уступая только мышьяку [1, 2].

В отличие от эссенциальных микроэлементов, свинец не является необходимым для метаболизма растений и проявляет выраженную фитотоксичность даже при небольших концентрациях в растворе, однако в почве его биодоступность для растений значительно ограничена, в связи с низкой мобильностью [3]. Биодоступность свинца для растений определяется комплексом физико-химических свойств почвы. pH является одним из ключевых факторов: в кислой среде ($pH < 6.5$) повышается подвижность ионов свинца за счет протонирования поверхностных функциональных групп почвенных коллоидов [4]. Содержание органического вещества (ОВ) оказывает двойственное влияние: с одной стороны, гумусовые соединения (фульво- и гуминовые кислоты) способны образовывать прочные комплексы со свинцом, снижая его мобильность, однако низкомолекулярные органические кислоты, понижая pH, могут способствовать мобилизации свинца [5, 6, 7]. Емкость катионного обмена (ЕКО) почвы демонстрирует сильную отрицательную корреляцию с аккумуляцией свинца в растениях. Почвы с высокой ЕКО обладают большей способностью адсорбировать катионы тяжелых металлов, что снижает концентрацию свинца в почвенном растворе. Гранулометрический состав также играет существенную роль: глинистые почвы демонстрируют более высокую сорбционную способность по отношению к свинцу по сравнению с почвами более легкого гранулометрического состава [8].

Биодоступность свинца в гидропонных системах существенно выше, чем в почве и зависит от формы химического соединения, используемого в эксперименте. В гидропонике весь свинец находится в водорастворимой и коллоидной формах и непосредственно контактирует с корневой системой, что значительно увеличивает его биодоступность для растений [9, 10, 11]. Форма соединения свинца играет критическую роль в его биодоступности. Ацетат свинца $Pb(CH_3COO)_2$ является одной из наиболее биодоступных форм из-за высокой растворимости в воде. При использовании в эксперименте сульфата свинца $PbSO_4$, биодоступность металла для растений значительно снижается вследствие низкой растворимости этого соединения в воде и чувствительности к pH, что приводит к депривации аккумуляции в корнях [12, 13, 14].

Органические кислоты, особенно лимонная, образуют комплексы со свинцом в растворе, усиливая его поглощение корнями и транслокацию в надземные части растения из прикорневых эксудатов. В эксперименте с добавлением различных концентраций ацетата свинца (0–50 мг/л) к гидропонному раствору, содержащему 50 мг/л Pb, аккумуля-

ция свинца в побегах индийской горчицы увеличилась в 3 раза с 2,05 до 6,42 мг/кг [15].

В связи с высокой фитотоксичностью существует ряд особенностей поглощения и транслокации данного тяжелого металла. Имобилизация в клеточных стенках корней является первичной линией защиты: до 90% поглощенного свинца может быть связано с пектинами и гемицеллюлозами клеточных стенок – таким образом проявляется корневая барьерная функция. Компартментация в вакуолях с участием фитохелатов и металлотионеинов представляет вторую линию защиты, позволяющую изолировать ионы свинца от чувствительных метаболических процессов в цитоплазме [16, 17, 18].

Салат посевной (*L. sativa*) и пшеница яровая (*T. aestivum*) представляют собой важные сельскохозяйственные культуры, широко возделываемые в различных климатических зонах и почвенно-климатических условиях. Салат посевной является типичным представителем двудольных растений, а также распространенной культурой для модельных опытов и самой распространенной гидропонной культурой [19]. Обладая относительно недолгим (45–55 дней) вегетационным циклом, салат является важным диетическим продуктом, содержащим полифенолы, каротиноиды, хлорофилл, а также большое количество витамина С [20, 21]. Яровая пшеница – важнейшая продовольственная сельскохозяйственная культура, почти не выращивается в условиях гидропоники как пищевой продукт, однако этот способ культивирования используют для селекционной работы над получением новых сортов. Пшеница высокопродуктивна, неприхотлива и обладает средним по продолжительности вегетационным циклом (90–120 дней). Она обеспечивает от 10 до 50% мирового населения как основной источник калорий и белка, занимая лидирующее место среди всех зерновых. Ее уникальный аминокислотный состав, высокое содержание белка (особенно глютена), минеральных веществ и пищевых волокон делает этот продукт универсальным для производства широкого спектра пищевых продуктов (хлеб, макароны, крупы и др.) [22]. Являясь одной из наиболее изученных и технически сопровождаемых (моделирование, подбор сортов, адаптационные практики) сельскохозяйственных культур, этот злак используется для прогнозирования рисков, связанных с экологическими проблемами. Тем актуальнее становятся селекционные исследования, способные предотвратить развитие этого сценария, в том числе гидропонные модельные опыты.

Однодольные и двудольные растения различаются по целому ряду анатомо-морфологических и биохимических характеристик, которые потенциально могут влиять на устойчивость к воздействию фитотоксичных элементов [23, 24]. К таким различиям относятся структура корневой и организация проводящей систем, биохимические реакции и другие факторы. Однако сравнительные исследования стрессовых реакций представителей этих двух классов покрытосеменных растений в условиях присутствия в растворе биодоступных форм свинца остаются малочисленными. Имеющиеся данные указывают на существование видоспецифичных механизмов ответа, однако систематические исследования различий между однодольными и двудольными видами в контексте Pb-стресса практически отсутствуют.

Накопление избыточных количеств АФК при Pb-стрессе нарушает прооксидантно-антиоксидантный гомеостаз и

приводит к каскаду деструктивных процессов: перекисно-му окислению липидов мембран, окислительной модификации белков, повреждению ДНК, утечке электролитов, редокс-дисбалансу и, в конечном итоге, к активации программируемой клеточной смерти. В ответ на окислительный стресс растения активируют многокомпонентную антиоксидантную систему защиты, включающую как ферментативные компоненты – супероксиддисмутазу (SOD), каталазу (CAT), аскорбатпероксидазу (APX), глутатионредуктазу (GR), глутатионпероксидазу (GPX), пероксидазу (POD) и другие ферменты, так и неферментативные антиоксиданты – аскорбиновую кислоту, глутатион, токоферолы, каротиноиды, фенольные соединения и флавоноиды [25, 26, 27, 28].

Среди ферментативных компонентов антиоксидантной защиты SOD и CAT играют ключевые роли в детоксификации первичных АФК, функционируя как первая линия защиты клетки от окислительных повреждений. SOD осуществляет дисмутацию высокореактивного супероксидного анион-радикала в менее токсичный пероксид водорода и молекулярный кислород, тогда как CAT катализирует разложение образовавшегося H_2O_2 на воду и кислород. Скоординированное функционирование этих двух ферментов обеспечивает последовательную нейтрализацию АФК и поддержание редокс-гомеостаза клетки. Эффективность работы системы SOD-CAT во многом определяет устойчивость растений к Pb-индуцированному окислительному стрессу и является важным критерием отбора толерантных генотипов для выращивания на загрязнённых почвах [29], [30].

Целью данной работы является определение морфофизиологических и биохимических реакций растений салата посевного (*L. sativa*) и пшеницы яровой (*T. aestivum*) в условиях интоксикации в присутствии разных концентраций биодоступных соединений свинца.

Материалы и методы

Эксперимент был проведен в Федеральном Агротехническом Научном Центре ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2025 году.

Объекты исследований

Салат сорта Азарт (Гавриш, Россия) – полукочанный сорт универсального назначения, предназначенный для использования как в открытом, так и в защищённом грунте. Сорт относится к среднеспелым разновидностям. Вегетационный период от полных всходов до технической спелости составляет 45 дней (в диапазоне 40–50 дней). Растения отличаются мощным строением: высота куста составляет 23–27 см, диаметр розетки листьев – 21–25 см. Масса одного растения варьируется от 150 до 200 г. Розетка листьев приподнятая, с крупными листьями веерообразной формы, окрашенными в зелёный оттенок. Урожайность составляет 4,3–4,5 кг/м².

Пшеница сорта Иволга была выведена методом индивидуального отбора из гибридной популяции (Яра Ч Лютесценс 39). Это сорт мягкой яровой пшеницы (*T. aestivum*), разновидность 'lutescens'. Оригинатором является ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. «Иволга» относится к среднерослым и среднеспелым сортам, высота растений составляет 90–100 см. Вегетационный период составляет 80–90 дней. Масса 1000 семян варьируется в широком диапазоне: 27–38 г, средняя урожайность достигает 2,68 т/га.

Семена высевали в емкости объемом 500 мл, заполненные субстратом. В качестве субстрата использовали верховой нейтральный торф (pH 6,0–6,5) фракции 5–20 мм для улучшения дренажных свойств. Торф предварительно автоклавировали при 121°C в течение 60 минут для стерилизации и исключения микробной активности, которая могла бы повлиять на биодоступность свинца. Растения выращивали в условиях контролируемой среды при фотопериоде 16/8 часов (день/ночь), температуре 24°C, относительной влажности 60–70% и освещенности 250 мкмоль м⁻² с⁻¹. В качестве питательного раствора использовали модифицированный раствор Хогланда с pH 6,2±0,5. На третий день после появления всходов в субстрат вносили раствор ацетата свинца ($Pb(CH_3COO)_2$) как наиболее биодоступную форму этого металла в концентрациях: 0 (контроль), 25 и 50 мг/л. Каждый вариант опыта включал 3 статистические повторности (рис. 1).

Полив проводили модифицированным раствором Хогланда 2 раза в неделю до полного насыщения субстрата. Объем вносимого раствора: 75 мл на сосуд. Сырую (свежую) массу определяли непосредственно после отбора проб взвешиванием на аналитических весах Sartorius CPA225D (Германия) с точностью до 0,001 г. Для определения сухой массы растительный материал высушивали в сушильном шкафу Binder FD 115 (Германия) при температуре 70°C.

Анализ содержания свинца в растительных образцах

Количественное определение Pb в подземной и надземной биомассе растений проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, выполненное на ИСП ОЭС iCap6300duo (Thermo



Рис. 1. Растения салата на 45 день опыта
Fig. 1. Photograph of the experiment conducted using the example of lettuce plants

S с., США) по методу Литвинского [31]. Для пробоподготовки использовали систему микроволнового разложения Berghof Speedware Entry (Бергхоф, Германия).

Определение хлорофилла в растительных образцах

Общее содержание хлорофилла в 100% ацетоновом экстракте определяли спектрофотометрически. Ацетон является одним из наиболее часто используемых растворителей для определения хлорофилла, поскольку выраженность пиков поглощения в красной области спектра наиболее велика именно в ацетоне. Для анализа брали 0,1 г свежей листовой массы и гомогенизировали с растворителем. Полученную смесь фильтровали через стеклянный

фильтр с диаметром пор 40–100 мкм. Оптическую плотность определяли UV-VIS спектрофотометре модели MT-M (VV300/2) (Китай) при длинах волн 662 нм и 644 нм, используя в качестве контрольного образца 100%-ный ацетон и толщину поглощающего слоя в кюветах 10 мм. Количественную концентрацию пигментов рассчитывали по методу Хольма–Веттштейна (для 100%-ного ацетона) [32, 33].

Оценка активности каталазы (CAT)

Активность каталазы определяли по методу Айби (Aebi). Для этого 1 г свежей листовой массы гомогенизировали в 10 мл калий-фосфатного буфера (pH 7,0). Гомогенат фильтровали и центрифугировали при 8000 g в течение 10 мин для получения прозрачного супернатанта. Для анализа 2,9 мл фосфатного буфера (pH 7,0) смешивали с 25 мкл ферментного экстракта. Для иницирования реакции в раствор добавляли 90 мкл 3%-ного раствора перекиси водорода (H_2O_2). С помощью спектрофотометра измеряли уменьшение оптической плотности при 240 нм в минуту. Активность фермента рассчитывали в ммоль·г⁻¹·мин⁻¹·г с использованием молярного коэффициента экстинкции (ϵ), равного 39,4 мм²·г⁻¹·см⁻¹ [34].

Оценка активности супероксиддисмутазы (SOD)

Для определения SOD было отобрано 0,5 г свежей листовой массы, промыто дистиллированной водой и заморожено жидким азотом. Был подготовлен экстракционный буфер включающий калий-фосфатный буфер 50 mM, pH 7,5, EDTA-Na 1 mM, 1%. поливинилпирролидон (PVP) Замороженные образцы гомогенизировались в фарфоровой ступке с 3 холодного экстракционного буфера. Гомогенат был перенесён в пробирку и отцентрифугирован при 15000 оборотов. Сразу перед засветкой в супернатант добавлялся ферментный экстракт, состоящий из метионина (0,3 мл, 13 mM), калий-фосфатного буфера (1,5 мл, 50 mM, pH 7,8), EDTA-Na (0,3 мл, 0,1 mM), NBT (0,3 мл, 75 мкМ), дистиллированной воды (0,3 мл). В последнюю очередь добавлялось 0,3 мл 2 ммоль рибофлавина.

Экспериментальные образцы помещали под 15-ваттную флуоресцентную лампу на 15 минут, затем их анализировали на спектрофотометре модели MT-M (VV300/2) (Китай) при длине волны 560 нм [35].

Статистический анализ данных. Для проведения статистического анализа использовался MS Excel 2016 и пакет программ StatSoft Statistica. Эксперимент проводили в трёхкратной повторности.

Результаты

Исходя из полученных данных, мы можем утверждать, что присутствует статистически достоверная разница между фитотоксическим влиянием свинца на сырую и сухую массу однодольных и двудольных растений (рис. 2). В созданных нами оптимальных условиях растения салата фактически достигли товарной спелости - в среднем растения контроля весили более 85 г, а пшеница достигла фазы кущения, некоторые растения соответствовали фазе выхода в трубку и весили в среднем 66,4 г. Эти данные согласуются с Ikkonen E. и Kaznina N. (2022) и подтверждают правильность постановки эксперимента [36].

Растения пшеницы в среднем более толерантны к присутствию в субстрате соединений свинца, понижение сырой массы на 45 день при добавлении средних концентраций на 4,9% ниже, чем аналогичное значение у растений салата, которые в целом более радикально реагируют на присутствие токсиканта – снижение сырой массы у салата на 45 день в присутствии максимальной концентрации свинца составило 29,7%. При этом на 7 день культивирования уменьшение массы при больших концентрациях Pb у однодольных и двудольных культур было мало выражено либо близко к погрешности и у показателя сухой, и у сырой массы.

Оценивая аккумуляцию свинца в растения однодольных и двудольных культур, необходимо отметить, что в целом пшеница накапливает большее количество экотоксиканта, с преобладанием его в корнях, что демонстрирует их барьер

Влияние концентрации свинца на биомассу растений

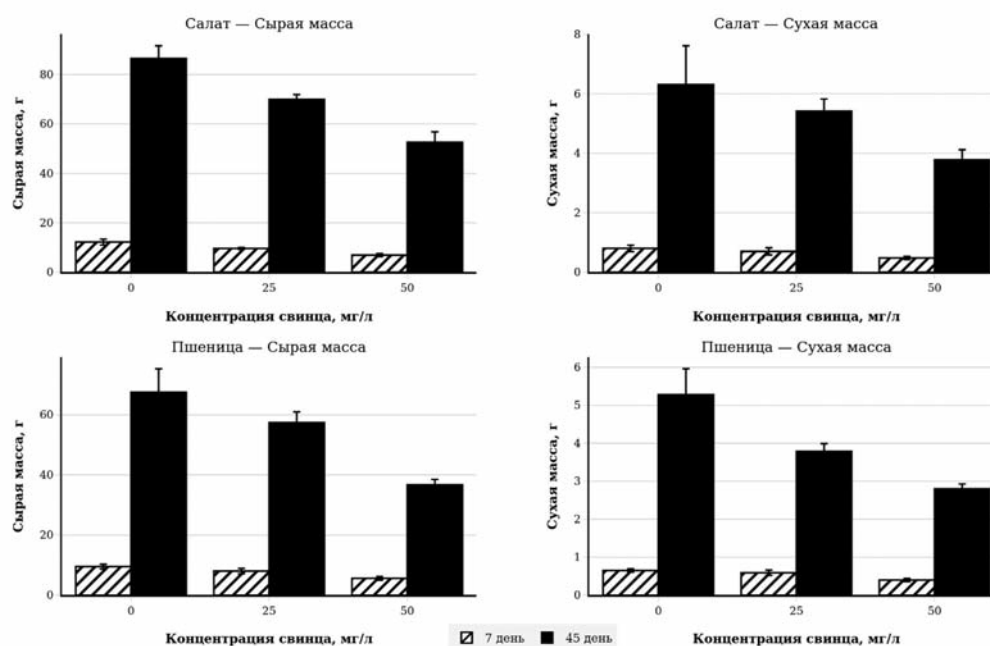


Рис. 2. Вариация свежей и сухой массы экспериментальных растений в присутствии разных концентраций Pb
Fig. 2. Variation of fresh and dry weight of experimental plants in the presence of different concentrations of Pb

ерную функцию. Это утверждение справедливо как для максимальной представленной в опыте концентрации (50 мг/кг), так и для 25 мг/кг. Растения салата аккумулируют данный тяжёлый металл относительно равномерно, с увеличением концентрации Pb доля его аккумуляции в побегах растёт.

Фотосинтетические системы достаточно чувствительны к биохимическим процессам внутри растения. Изменения, происходящие внутри комплексов тесно связаны с количественным изменением соотношения пигментов и их концентрации в фотосинтезирующих тканях растений. Измерения проводились на 45 день, оценивалась концентрация общего хлорофилла, хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов (рис. 3). В целом, с увеличением концентрации экотоксиканта в виде свинца, фотосинтетическая активность и концентрация общего хлорофилла падает. Это утверждение верно как для однодольных, так и для двудольных растений, однако у двудольных растений

депривация фотосинтетических процессов в присутствии экотоксиканта происходит более активно, о чём свидетельствует понижение концентрации общего хлорофилла у растений салата на 0,69 мг/кг, тогда как у пшеницы этот показатель составит 0,5 мг/кг.

В присутствии 25 мг/кг свинца у растений пшеницы не наблюдалось существенных различий в концентрации фотосинтетических пигментов, в отличие от салата, для которого незначительным является только изменение концентрации каротиноидов в листьях.

Салат наименее подвержен изменению концентрации хлорофилла *b*.

Анализ активности стрессовых ферментов, таких как каталаза и супероксиддисмутаза, является наиболее точным методом оценки каталитического стресса и накопления пероксида водорода в тканях растений. Так как согласно [37, 38], добавленная нами концентрация Pb не приближается к порогу летальности и фитотоксичность при ней выражена умеренно, значения каталитических ферментов стабильны и ненамного превышают норму (от 3 до 7 для CAT, от 14 до 16 для SOD). Стоит отметить, что при повышении стресса CAT растёт, а SOD падает, что создаёт определённый ферментативный баланс, помогающий растению справиться с фитотоксическим действием контаминанта. В нашем эксперименте у представителей однодольных двудольных культур сохранён ферментативный баланс и несколько повышены значения каталазы для максимальной концентрации Pb, причём кажущееся преобладание активности каталазы у растений салата минимизируется изначальными значениями стрессовых ферментов. В целом, CAT у растений салата выше, тогда как у пшеницы выше значение SOD.

Обобщая вышеизложенные данные, необходимо отметить, что несмотря на слабую выраженность фитотоксичности соединений свинца в концентрациях 25 мг/кг и 50 мг/кг, растения однодольных и двудольных культур аккумулируют данный тяжёлый металл из субстратов и про-

Рис. 3. Аккумуляция Pb в надземных и подземных органах экспериментальных растений на 45 день эксперимента
Fig. 3. Accumulation of Pb in aboveground and underground organs of experimental plants on the 45th day of the experiment

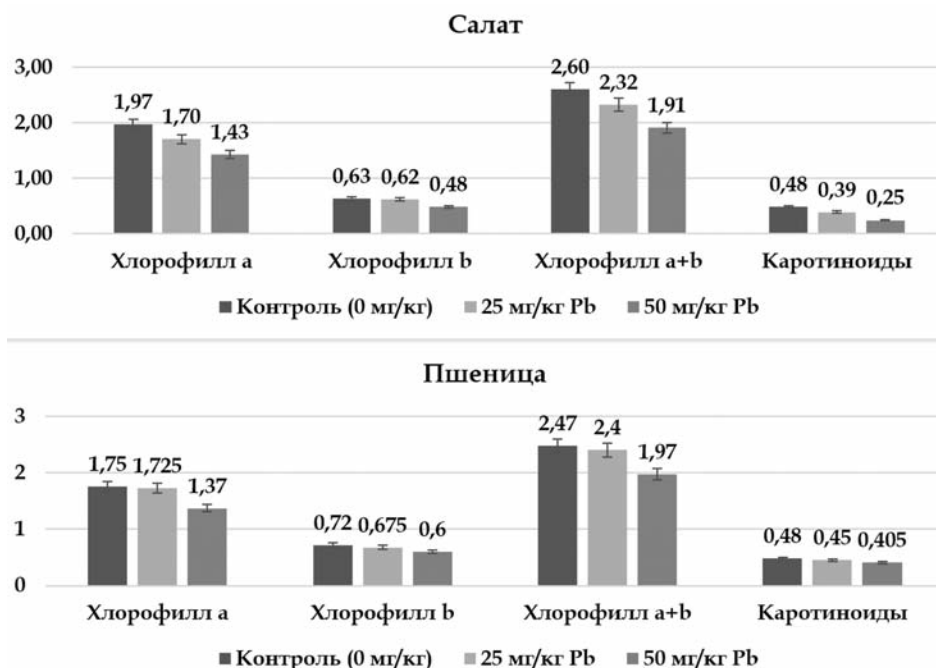
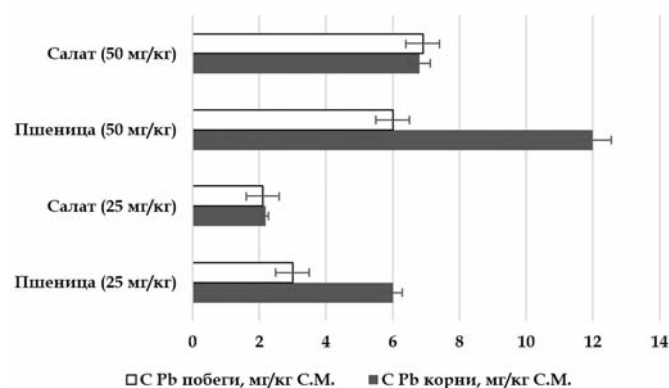


Рис. 4. Концентрации пигментов в надземной биомассе растений салата посевного сорта Азарт и пшеницы яровой сорта Иволга на 45 день эксперимента
Fig. 4. Pigments concentrations in the aboveground biomass of lettuce plants of the Azart seed variety and wheat of the Ivolga variety on the 45th day of the experiment

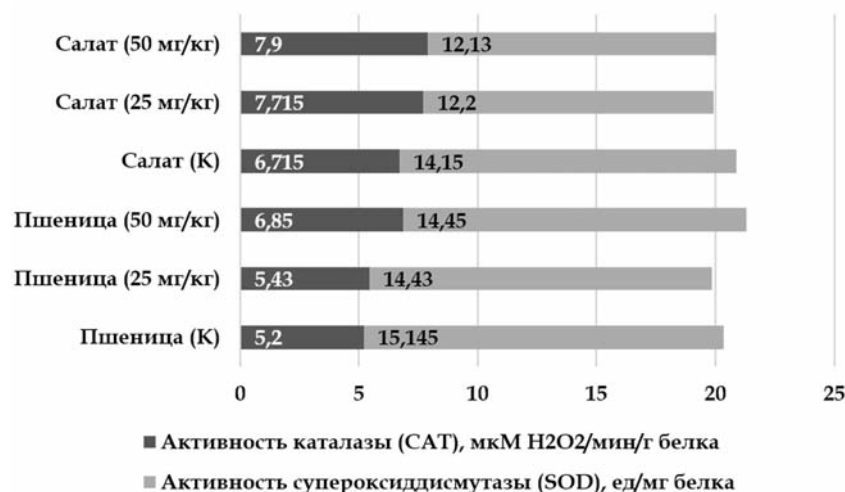


Рис. 5. Оценка активности каталазы (CAT) и супероксиддисмутазы (SOD) для растений салата посеянного сорта Азарт и пшеницы яровой сорта Ивола на 45 день эксперимента

Fig. 5. Evaluation of catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) activity for Azart lettuce and Ivola wheat on day 45 of the experiment

являют биохимические и физиологические реакции, в ответ на стрессовое воздействие.

Заключение

Данное исследование выявило, что в присутствии нелетальных концентраций биодоступного свинца, стратегии защитных реакций однодольных и двудольных культур различались. Пшеница, как представитель однодольных, оказалась более устойчива к каталитическому стрессу, как и другие представители злаков [39]. На начальном этапе культивирования (7-й день) существенных различий между однодольными и двудольными культурами по биометрическим параметрам не выявлено. При этом аккумуляция свинца у пшеницы происходила более активно, в особенности в подземных органах, выявляя барьерную функцию корней, не свойственную двудольным растениям, в частности, салату. На 45-й день эксперимента снижение сырой массы пшеницы при средней концентрации свинца было на 4,9% меньше, чем у салата. Салат, напротив, демонстрирует относительно равномерное распределение свинца между корнями и побегами, причем с увеличением концентрации контаминанта доля металла в надземной части возрастает. Это указывает на менее эффективную барьерную функцию корней у двудольных растений и повышает риски накопления свинца в товарной продукции. Анализ

содержания фотосинтетических пигментов на 45-й день эксперимента выявил общую тенденцию к снижению концентрации хлорофилла при возрастании содержания свинца в субстрате. Однако у салата депривация фотосинтеза выражена более значительно: снижение общего хлорофилла составило 0,69 мг/кг, тогда как у пшеницы – 0,5 мг/кг. При концентрации 25 мг/кг свинца у пшеницы фотосинтетические нарушения практически не обнаружены, в отличие от салата, у которого уже проявились изменения.

Исследование активности ключевых антиоксидантных ферментов – CAT и SOD показало, что при использованных свинца в обеих концентрациях фитотоксичность выражена умеренно, и у обеих культур сохраняется ферментативный баланс. С усилением стресса активность каталазы возрастает, а супероксиддисмутазы снижается, что обеспечивает адаптивную регуляцию уровня активных форм кислорода. У салата активность каталазы выше, тогда как у пшеницы преобладает активность супероксиддисмутазы.

Выявленные различия в стратегиях адаптации однодольных и двудольных культур к свинцовой интоксикации имеют важное значение для оценки рисков загрязнения пищевой продукции и разработки агротехнических приемов минимизации накопления тяжелых металлов в товарной части урожая.

Литература / References

- Kumar A., Prasad M.N.V. Lead-induced toxicity and interference in chlorophyll fluorescence in *Talinum triangulare* grown hydroponically. *Photosynthetica*. 2015;53(1):66–71. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0091-8>
- Sandadevani K.S., Sooriyaarachchi S.K.M., Weerakkody W.A.P., Gunarathna R.M.K.D. Effect of Grow Medium and Hydroponics Fertilizer on Iceberg Lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata*) Cultivation. *Journal of Agricultural Production*. 2025;6(1):61–69. <https://doi.org/10.56430/japro.1599979>
- Zheljaskov V.D., Craker L.E., Xing B. Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil. *Environ Exp Bot*. 2006;58(1–3):9–16. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.06.008>
- Whitacre D.M. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 213, vol. 213. in *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. New York, NY: Springer New York, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6>
- Greger M. 6 Trace Elements and Radionuclides in Edible Plants.
- X. Wang et al. Heavy Metal Accumulation in Maize and Wheat in Acidic Soil: A Comparative Study. *Sustainability (Switzerland)*. 2025;17(5). <https://doi.org/10.3390/su17052084>
- Wang L. et al. Reducing Cd and Pb Accumulation in Potatoes: The Role of Soil Passivators in Contaminated Mining Soils. *Life*. 2024;14(12). <https://doi.org/10.3390/life14121615>
- Ahmad K. et al. Evaluation of Potential Toxic Metals Accumulation in Wheat Irrigated with Wastewater. *Bull Environ Contam Toxicoll*. 2019;102(6):822–828. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02605-1>
- Jafarova M., Vannini A., Monaci F., Loppi S. Influence of Moderate Cd and Pb Soil Pollution on Seed Development, Photosynthetic Performance and Foliar Accumulation in the Medicinal Plant *Hypericum perforatum*. *Pollutants*. 2021;1(1):1–9. <https://doi.org/10.3390/pollutants1010001>
- Prasad M.N.V., Kiran B.R. Responses of *Ricinus communis* L. (castor bean, phytoremediation crop) seedlings to lead (Pb) toxicity in hydroponics. *Selcuk Journal of Agricultural and Food Sciences*. 2017;31(1):73–80. <https://doi.org/10.15316/sjafs.2017.9>

11. Barce J., Poschenrieder C. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. 1990. <https://doi.org/10.1080/01904169009364057>
12. Ingente A.G., Anselmo C.T. Phytoremediation Potential of Kangkong (*Ipomoea Reptans* Poir) in Lead-Induced Hydroponic System. *International Journal of Research and Scientific Innovation*. 2024;XI(VII):909–921. <https://doi.org/10.51244/ijrsi.2024.1107072>
13. Khodijah N.S., Santi R., Kusmiadi R., Rismunandar I. Water Spinach (*Ipomoea reptans* Poir) Hydroponic Kratky System at Various Levels of PbSO₄ Contamination. *agriTECH*. 2024;44(4):322, Nov., <https://doi.org/10.22146/agritech.86841>
14. Bosiacki M., Kleiber T., Kaczmarek J. Evaluation of suitability of *Amaranthus caudatus* L. and *Ricinus communis* L. in phytoextraction of cadmium and lead from contaminated substrates. *Archives of Environmental Protection*. 2013;39(3):47–59. <https://doi.org/10.2478/aep-2013-0022>
15. Kim K.-R., Owens G., Naidu R., Kwon S.-I., Kim K.-H. Lead Induced Organic Acid Exudation and Citrate Enhanced Pb Uptake in Hydroponic System. *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 2009;28(2):146–157. <https://doi.org/10.5338/kjea.2009.28.2.146>
16. Sharma P., Dubey R.S. Lead toxicity in plants. *Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 2005. <https://doi.org/10.1590/s1677-04202005000100004>
17. Velikova V., Yordanov I., Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants Protective role of exogenous polyamines. 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/plantsci
18. White M.C., Chaney R.L., Decker A.M. Metal Complexation in Xylem Fluid' III. ELECTROPHORETIC EVIDENCE', 1981. [Online]. Available: www.plantphysiol.org
19. Banboukian A., Chen Y., Thomas V.M. The challenges of controlled environment hydroponic farming: a life cycle assessment of lettuce. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2025;30(7):1691–1704. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02463-6>
20. Shi M. et al. Phytochemicals, Nutrition, Metabolism, Bioavailability, and Health Benefits in Lettuce—A Comprehensive Review. *Antioxidants*. 2022;11(6). <https://doi.org/10.3390/antiox11061158>
21. Veronica B., Arshad A., Elena D., Elena Maria D. A Comprehensive Review of Lettuce Cultivation in Unconventional Systems: Pioneering Sustainable Food Production. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*. 2025;5(4):592–598. <https://doi.org/10.62225/2583049x.2025.5.4.4650>
22. Gooding M.J., Shewry P.R. Wheat Environment, Food and Health. 2022. [Online]. Available: <https://lcn.loc.gov/2021046095>
23. Lamhamdi M. et al. Effect of lead stress on mineral content and growth of wheat (*Triticum aestivum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) seedlings. *Saudi J Biol Sci*. 2013;20(1):29–36. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.09.001>
24. Sękara A., Jędraszczuk S.E. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: Implications for phytoremediation. 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/279623631>
25. Nirmal D., Teraiya S., Patel H., Joshi P. Studies on effect of exogenous application of ascorbic acid on growth, photosynthetic pigment and oxidative defence in "groundnut" (*Arachis hypogaea* L.) under lead (Pb) stress. *Discover Plants*. 2025;2(1). <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00265-6>
26. Sofo A., Scopa A., Nuzzaci M., Vitti A. Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. Jun. 12, 2015, MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms160613561>
27. Malecka A., Piechalak A., Mensinger A., Hanć A., Baralkiewicz D., Tomaszewska B. Introduction Antioxidative Defense System in *Pisum sativum* Roots Exposed to Heavy Metals (Pb, Cu, Cd, Zn). 2012.
28. Nirmal D., Teraiya S., Patel H., Joshi P. Studies on effect of exogenous application of ascorbic acid on growth, photosynthetic pigment and oxidative defence in "groundnut" (*Arachis hypogaea* L.) under lead (Pb) stress. *Discover Plants*. 2025;2(1). <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00265-6>
29. Kerchev P.I., Van Breusegem F. Improving oxidative stress resilience in plants'. *Plant Journal*. 2022;109(2):359–372. <https://doi.org/10.1111/tj.15493>
30. Khan M. et al., 'Lead (Pb)-induced oxidative stress alters the morphological and physio-biochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.). *Agronomy*. 2021;11(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy11030409>
31. Litvinskiy V.A., Grishina E.A., Nosikov V.V., Sushkova L.O. Litvinskiy V.A., Grishina E.A., Nosikov V.V., Sushkova L.O. Atomic-emission spectroscopy and microwave digestion as an integrated tool approach for determination of lead content in plants and crop production. *Plodородie*. 2018;6(105):58–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2018.105.19> <https://elibrary.ru/ypool>
32. Holm G. Studies on chlorophyll mutations in barley: i. methods of measuring linkage by single and combined maximum-likelihood formulas, solved by use of an automatic computer and the programming language algol 60. *Hereditas*. 1966;55(1):79–120. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1966.tb02038.x>
33. Van Wettstein D., Forschungsanstalt F. Chlorophyll-letale und der submikroskopische formwechsel der plastidenl, 1957.
34. Hans-Ulrich Bergmeyer, Methods of Enzymatic Analysis, vol. 1. Academic Press, 2012.
35. Jiang and Zhang. Kant and Turan. Abedi and Pakniyat, 2002.
36. Ikkonen E., Kaznina N. Physiological Responses of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) to Soil Contamination with Pb. *Horticulturae*. 2022;8(10). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100951>
37. Kabata-Pendias A. Agricultural Problems Related to Excessive Trace Metal Contents of Soils.
38. Popa C., Bratu A.M., Petrus M., Bacalum M. The analysis of lead phytotoxicity in seeds using CO₂ laser photoacoustic spectroscopy. *Molecules*. 2020;25(7). <https://doi.org/10.3390/molecules25071637>
39. Khan J., Elsharkawy E., Fu Y., Jan R., Kim K.M. Melatonin alleviates lead-induced stress in rice through physiological regulation and molecular defense mechanisms. *Sci Rep*. 2025;15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18514-9>

Об авторах:

Мария Михайловна Годяева – аспирант, младший научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и географического факультета МГУ им. Ломоносова, <https://orcid.org/0000-0002-2235-450X>, IRID: 262604511, Scopus Author ID: 57208135257, S PIN-код: 9080-6677, автор-корреспондент, airune@yandex.ru

Татьяна Александровна Парамонова – кандидат биол. наук, старший преподаватель МГУ имени М.В. Ломоносова, Кафедра радиоэкологии и экотоксикологии (Факультет почвоведения), IRID: 1970010, ResearcherID: P-4569-2014, Scopus Author ID: 55337680800, <https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>, SPIN-код: 5610-3800, tapara@yandex.ru

Артём Александрович Дорохов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, <https://orcid.org/0000-0002-7946-5729>, Scopus Author ID: 57964553900; SPIN-код: 1125-7140, dorokhov-91@yandex.ru

Мария Сергеевна Широкова – аспирант, младший научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, <https://orcid.org/0000-0002-9049-1039>, SPIN-код: 1973-9717, m_shirokova98@mail.ru

About the Authors:

Maria M. Godyaeva – Postgraduate, Junior Researcher at the Federal State Budgetary Scientific Center FNAC VIM and the Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University, <https://orcid.org/0000-0002-2235-450X>, IRID: 262604511, Scopus Author ID: 57208135257, SPIN-code: 9080-6677, Corresponding Author, airune@yandex.ru

Tatyana A. Paramonova – Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer at Lomonosov Moscow State University, Department of Radioecology and Ecotoxicology (Faculty of Soil Science), IRID: 1970010, ResearcherID: P-4569-2014, Scopus Author ID: 55337680800, <https://orcid.org/0000-0001-8179-8074>, SPIN-code: 5610-3800, tapara@yandex.ru

Artem A. Dorokhov – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher at FSBI FNATS VIM, <https://orcid.org/0000-0002-7946-5729>, Scopus Author ID: 57964553900; SPIN-code: 1125-7140, dorokhov-91@yandex.ru

Maria S. Shirokova – Postgraduate, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9049-1039>, SPIN-code: 1973-9717; m_shirokova98@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-176-184>
УДК: 635.713:631.559:628.9

Н.А. Семенова*, Д.А. Захаров,
Е.В. Степанова, С.Р. Саримова

Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской
академии наук (ИОФ РАН)
119991, Россия, ГСП-1,
г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

*Автор для переписки: natalia.86@inbox.ru

Финансирование. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-26-00361.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам Баймлеру Илье Владимировичу и Симакину Александру Владимировичу за предоставленные наночастицы и их характеристику.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Захаров Д.А., Саримова С.Р.: проведение исследований, создание черновика рукописи. Степанова Е.В.: проведение исследований, верификация данных, формальный анализ. Семенова Н.А., Степанова Е.В.: методология, концептуализация. Семенова Н.А.: создание рукописи и её редактирование, администрирование данных.

Для цитирования: Семенова Н.А., Захаров Д.А., Степанова Е.В., Саримова С.Р. Применение наночастиц оксида магния для улучшения продуктивности базилика (*Ocimum basilicum* L.) в условиях полной светокультуры. *Овощи России*. 2025;(6):176-184. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-176-184>

Поступила в редакцию: 29.10.2025

Принята к печати: 05.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Natalia A. Semenova*, Dmitriy A. Zakharov,
Eugenia V. Stepanova, Sofia R. Sarimova

Prokhorov General Physics Institute
of the Russian Academy of Sciences,
38, Vavilova str., Moscow, GSP-1, Russia, 119991

*Corresponding Author: natalia.86@inbox.ru

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation (No. 25-26-00361).

Acknowledgments. The authors are grateful to their colleagues Ilya Vladimirovich Baimler and Alexander Vladimirovich Simakin for providing the nanoparticles and their characterization.

Authors' Contribution: Zakharov D.A., Sarimova S.R.: investigation, writing – original draft. Stepanova E.V.: investigation, validation, formal analysis. Semenova N.A., Stepanova E.V.: methodology, conceptualization. Semenova N.A.: writing – review & editing, data curation.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citations: Semenova N.A., Zakharov D.A., Stepanova E.V., Sarimova S.R. Application of magnesium oxide nanoparticles to improve sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) productivity in total control environment agriculture. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):176-184. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-176-184>

Received: 29.10.2025

Accepted for publication: 05.12.2025

Published: 18.12.2025

Применение наночастиц оксида магния для улучшения продуктивности базилика (*Ocimum basilicum* L.) в условиях полной светокультуры

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Рост спроса на пряные ароматические культуры способствует развитию их всесезонного производства в условиях полной светокультуры. При выращивании зеленных культур в контролируемых условиях наночастицы оксида магния (MgO-НЧ) имеют большой потенциал применения благодаря своей экологичности и способности стимулировать рост и накопление вторичных метаболитов. Данная работа посвящена определению эффективных концентраций MgO-НЧ для стимулирования роста, фотосинтеза и накопления эфирных масел базилика душистого.

Материал и методы. Наночастицы оксида Mg размером 6–7 нм, полученные методом лазерной абляции, применялись в виде 3-х внекорневых обработок, проведенных с интервалом 10 дней, начиная с фазы появления первых настоящих листьев у растений базилика душистого сорта Жиголо. Наночастицы использовали в концентрациях 25, 50, 75, 100, 150, 200 и 500 мг/л. Контрольные растения опрыскивали дистиллированной водой. На 60-й день культивирования измеряли: высоту растений, количество листьев, сырую и сухую массу, общее содержание хлорофилла, антоцианов, эфирных масел.

Результаты. Обработка базилика растворами наночастиц MgO в концентрациях 100 и 150 мг/л способствовала увеличению количества листьев на 65 и 60%, сырой массы растений на 55,7 и 83,4% соответственно. Обработки в концентрации 150 мг/л привели к увеличению высоты растений на 51,6%. Увеличение сухой массы растений наблюдали во всех вариантах обработок при использовании концентраций 150, 200 и 500 мг/л зафиксировано наибольшее достоверное увеличение сухой массы (на 43, 56 и 37%) и содержания общего хлорофилла (на 38, 77 и 33%). Наибольшее накопление эфирных масел (прирост более чем в 2 раза) происходило при обработке 50 мг/л. Изменялся также компонентный состав эфирных масел: наибольшее содержание линалоола отмечалось при 25 мг/л, эвгенола – при 50 мг/л, а эвкалиптола при 75 мг/л.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

внекорневая обработка, эфирные масла, антоцианы, хлорофилл, агрегатирование наночастиц

Application of magnesium oxide nanoparticles to improve sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) productivity in total control environment agriculture

ABSTRACT

Relevance. The rising demand for spicy crops is driving the development of their year-round production at urban farms. Magnesium oxide nanoparticles (MgO-NPs) have great potential for use in total control environment agriculture of green crops due to their eco-friendliness and ability to stimulate growth and secondary metabolite accumulation. This study aims to determine effective MgO-NPs concentrations for stimulating growth, photosynthesis, and essential oil accumulation in sweet basil.

Materials and Methods. MgO-NPs (6–7 nm in size), produced by laser ablation, were applied in three foliar applications, 10 days apart, beginning with the emergence of the first true leaves of sweet basil cultivar Zhigolo. Nanoparticles were used at concentrations of 25, 50, 75, 100, 150, 200, and 500 mg/l. Control plants were sprayed with distilled water. On the 60th day of cultivation, the following parameters were measured: plant height, leaf count, fresh and dry weight, total chlorophyll, anthocyanins, and essential oil content.

Results. MgO nanoparticle treatments at concentrations of 100 and 150 mg/l increased the number of leaves by 65 and 60%, and the fresh weight of basil plants by 55.7 and 83.4%, respectively. Treatment at concentration of 150 mg/l contributed to an increase in plant height by 51.6%. An increase in dry weight was observed in all treatment variants with MgO-NP concentrations 75 mg/l and above. When using treatments of 150, 200, and 500 mg/l, the greatest reliable increase in dry mass (by 43, 56, and 37%) and total chlorophyll content (by 38, 77, and 33%) was observed. Maximum accumulation of essential oils (more than 2 times) was observed at concentration of 50 mg/l. The composition of essential oils also altered: the highest content of linalool was observed at 25 mg/l, eugenol – at 50 mg/l, and eucalyptol – at 75 mg/l.

KEYWORDS:

foliar treatment, essential oils, anthocyanins, chlorophyll, nanoparticle aggregation

Введение

Последние десятилетия растет интерес потребителей к «натуральным» или «чистым» продуктам и натуральной медицине. В этом контексте особое место занимает свежая зелень, способная восполнить круглогодичную потребность человека в витаминах и минералах, благодаря развитию вертикального фермерства в полной светокультуре с применением светодиодных ламп. Объем мирового рынка вертикального фермерства в 2023 году оценивался в 7 млрд долларов [1]. Весомая доля рынка принадлежит листовым овощам и лекарственным культурам. Экстракты растений, содержащие эфирные масла, стали альтернативой синтетическим препаратам благодаря высокой антиоксидантной активности, а также антибактериальным, противогрибковым, противораковым, и другим полезным свойствам и, как правило, отсутствию резких побочных эффектов [2].

В частности, растения базилика (род *Ocimum* L.) приобрели огромную популярность для потребления в свежем виде, приготовления приправ, соусов, паст, чая, получения эфирных масел, вытяжек и пищевых добавок [3 – 5]. Листья базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) богаты флавоноидами, а также содержат в среднем до 20 компонентов эфирного масла [6], в том числе эвгенол и розмариновую кислоту, которые обеспечивают им антиоксидантные, противовоспалительные антибактериальные свойства. В зависимости от видовых и сортовых особенностей, а также от условий культивирования, компонентный состав эфирного масла базилика может существенно изменяться, однако обычно преобладающими компонентами являются эвгенол, линалоол, метилхавикол, метилциннамат, бергамотен [7]. Высокий спрос на листья базилика, обусловленный расширением направлений их использования, сделал эту культуру одной из самых перспективных в мировом сегменте свежих и сушеных трав: мировой рынок листьев в 2024 г. оценивался в 1,8 миллиарда долларов и увеличивается в среднем на 3,7% в год [8].

Основной проблемой выращивания базилика в вертикальных фермах в условиях полной светокультуры является более низкое накопление эфирных масел (в 10 раз и менее), чем в открытом грунте [8], и, соответственно, снижение качества получаемой продукции. Поэтому, для улучшения вкусовых свойств растений и накопления эфирных масел подбирают спектральный состав света, в том числе используют дополнительные световые обработки ультрафиолетовым излучением, внесение дополнительных питательных или стресс-провоцирующих веществ, способных стимулировать выработку вторичных метаболитов, к которым относятся в том числе эфирные масла. Установлено, что такие элементы как Mg, Ca, S, Fe, стимулируют выработку эфирных масел различных эфиромасличных культур. Эти элементы детектируются при анализе эфирных масел и клеток эпидермы – трихом, в которых накапливаются масла [10–12].

Как известно, магний играет ключевую роль в фотосинтезе, стимулирует накопление биомассы, регулирует синтез

аминокислот и клеточных белков, поглощение и миграцию фосфора, а также является стресс-протектором за счет стимуляции синтеза защитных веществ и укрепления клеточных стенок [13]. Роль магния для стимулирования выработки эфирных масел изучалась на разных культурах. Например, при подкормках мяты перечной в одних опытах, обработанные растения имели более высокий выход эфирного масла с изменением его компонентного состава (повышение содержания ментола и понижение ментона), наблюдалось также удлинение побегов, увеличение сухой массы листьев [14], в других опытах общее количество масел на единицу массы снижалось, но это компенсировалось повышением урожайности (увеличение количества листьев на 25–27%) [15].

Наночастицы магния (Mg-НЧ), являются перспективными в отношении стимулирования синтеза эфирных масел, так как провоцируют небольшой стресс за счет образования активных форм кислорода, которые активируют ферментативные и не ферментативные механизмы антиоксидантной защиты, в том числе повышают синтез вторичных метаболитов [16]. Применение подкормок в виде наночастиц, размер которых находится в диапазоне от 1 до 100 нм, улучшает такие их свойства, как адсорбция ионов, диффузия, ионообмен и комплексообразование [17]. Наиболее эффективными для сельскохозяйственных культур считаются сферические Mg-НЧ размером 3,5–2000 нм в концентрациях 0,15–20 000 мг/л [18]. Однако распространено мнение, что использование наночастиц оксидов металлов опасно для окружающей среды и здоровья человека [19], в том числе высокие концентрации наночастиц оксида магния MgO-НЧ (более 500 мг/л) могут вызывать повреждение ДНК различных тканей млекопитающих [20], а меньшие концентрации (до 100 мг/л) оказывают антиоксидантное, антиапоптотическое и антидиабетическое действие [21]. Считается, что в пределах допустимых концентраций MgO-НЧ обладают широкими перспективами применения благодаря своей экологичности [22]. Так, для стимулирования роста растений *Moringa oleifera* Lam., применяли MgO-НЧ (5–16 нм), полученные с помощью биосинтеза с использованием филтратов *Trichoderma viride*, количество листьев растений возрастало в 2 и более раз при применении всех концентраций (40, 50 и 60 мг/л), сырая масса растений возрастала на 18–62% [23]. Mg-НЧ применяются в различных отраслях промышленности, проведены единичные исследования на тему их применения в сельском хозяйстве открытого грунта [23–25], а для выращивания пряно-ароматических культур в условиях полной светокультуры проводятся впервые.

Целью исследования было выявление перспектив использования MgO-НЧ в безопасном диапазоне концентраций для внекорневой обработки растений базилика сорта Жиголо для повышения вкусовых качеств и стимулирования выработки эфирных масел в условиях гидропонного выращивания в полной светокультуре.

Материалы и методы

Опыты проводили в центре Биофотоники института общей

физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) в 2025 году.

Объекты исследований

Изучали влияние наночастиц оксида магния ($MgO-NH$) на показатели роста и продуктивности базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) сорта Жиголо (Гавриш, Россия).

Сорт Жиголо имеет гвоздично-перечный аромат, фиолетовые яйцевидные листья без опушения, соцветия, 15–19 см длиной, и розовые цветки. Высота растений составляет в среднем 31–42 см, от полных всходов до уборки на зелень проходит 47–51 день, до цветения – 65–72 дня. Урожайность 1,0–1,1 кг/м². Подходит для культивирования в гидропонных условиях.

Растения базилика Жиголо выращивали в фитокомнате при контролируемых условиях полной светокультуры с использованием светодиодных ламп СФ60БК-1000 (Светолуб, Россия) с плотностью фотосинтетического потока фотонов 240 ± 10 мкмоль м⁻²·с⁻¹ при 16-часовом фотопериоде. Температура поддерживалась в режиме день/ночь – 24/20 $\pm$ 1°C и относительной влажности воздуха 65 $\pm$ 5%. В качестве субстрата для выращивания использовали кубики минеральной ваты (Grodan, Польша), которые погружали в лотки для питания и орошения способом подтопления. Для приготовления питательного раствора использовался трехкомпонентный гидропонный состав Terra Aquatica (Франция) для базилика.

Наночастицы оксида магния ($MgO-NH$) были получены в центре Биофотоники ИОФ РАН методом лазерной абляции в жидкости твердой металлической мишени Mg. В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду. В качестве источника лазерного излучения использовали Nd:YAG лазер NL300 (Ekspla, Вильнюс, Литва). Общая продолжительность лазерной абляции составляла 2 ч. ζ -потенциал полученного коллоида $MgO-NH$ составлял -9 мВ (меньше 10 мВ), что говорит о нестабильности полученных НЧ [26] и присутствии в коллоиде крупных агрегатов. С помощью атомно-силового микроскопа NPX200 (Seiko, Япония) было установлено, что большая часть $MgO-NH$ имела размер 6–7 нм, присутствовали отдельные наночастицы с размерами до 20 нм. Поэтому непосредственно перед каждой обработкой раствор $MgO-NH$ помещали на 30 минут в ультразвуковую ванну (RS, Англия) для устранения агрегатирования.

Проведение обработок и измерений

Для определения эффективных концентраций применения внекорневых обработок растений базилика коллоидным раствором $MgO-NH$ в диапазоне концентраций: 25, 50, 75, 100, 150, 200 и 500 мг/л. Контрольные растения опрыскивали дистиллированной водой. Обработку проводили в фазу появления 2-х настоящих листьев, а затем повторяли еще 2 раза с интервалом 10 дней.

Измерения проводились на 60-й день культивирования в фазу начала цветения, когда накопление эфирных масел в

растении увеличивалось [27]. Учитывали такие показатели как высота растений, количество листьев, сырая и сухая массы, содержание пигментов и эфирных масел.

Измерение биометрических показателей, пигментов, количественный и компонентный анализ эфирных масел, микроскопия листьев

Высоту растений измеряли с помощью линейки. Значения показателя свежей и сухой массы растений получали путем взвешивания с использованием весов АРТВ 457В (Amput, КНР). Для получения сухой навески растения высушивали в сушильном шкафу ШС-40-02 (Мир оборудования, Россия) до постоянной массы в течение 6 часов при температуре 70°C. Затем определяли процент сухого вещества в общей массе, для чего сухую массу делили на сырую массу и умножали на 100%. Оценка биометрических показателей необходима в том числе и для расчета выхода эфирных масел на единицу собранной свежей массы и на 1 растение.

Общий хлорофилл измеряли неинвазивным методом с помощью хлорофиллометра Hansatech CL-01 (Hansatech Instruments, Великобритания).

Для получения вытяжки антоцианов отбирали навеску листьев 0,3 г, затем также растирали с добавлением 1%-ной соляной кислоты, после чего экстракт помещали на 15 мин в водяную баню (44–45°C) и фильтровали. Содержание антоцианов измеряли на спектрофотометре Cintra 4040 (GBC Scientific Equipment Pty Ltd, Австралия), при длине волны 510 нм, итоговые значения (в мг на 100 г сырой массы) рассчитывали по показателю поглощения цианидин-3,5-дигликозида в 1%-ном растворе соляной кислоты [28].

Микроскопия листьев контрольных растений и при концентрациях 75 и 200 мг/л с целью обнаружения скопления наночастиц на их поверхности проводили после последней обработки растений с использованием универсального оптического микроскопа A13 0901NRT (ООО "Эрствак", Россия).

Экстракцию эфирных масел проводили гексаном (99,8%), по ранее описанной методике [29]. Общее количество эфирных масел определяли с помощью газового хроматографа с пламенно-ионизационным детектором "Хроматэк-Кристалл 5000" (Хроматэк, Россия). Объем экстракта, равный 1 мкл, вводили в режиме без разделения потока в хроматограф с капиллярной колонкой ВР-1 (60 м × 0,25 мм) и программным обеспечением Хроматэк Аналитик v3.0.0.2. В качестве газ-носителя использовали азот. Температура инжектора составляла 200°C, температура линии передачи и детектора – 250°C. Температурный градиент увеличивался со скоростью 2°C в минуту от 70°C до 220°C. Общее время анализа одной пробы составляло 85 минут. После получения данных производили пересчет на 1 г свежей массы.

Статистический анализ данных

Для оценки статистической достоверности результатов ($p < 0,05$) использовали F-критерий. Статистическую обработку данных и построение графиков проводили в MS Excel 2022

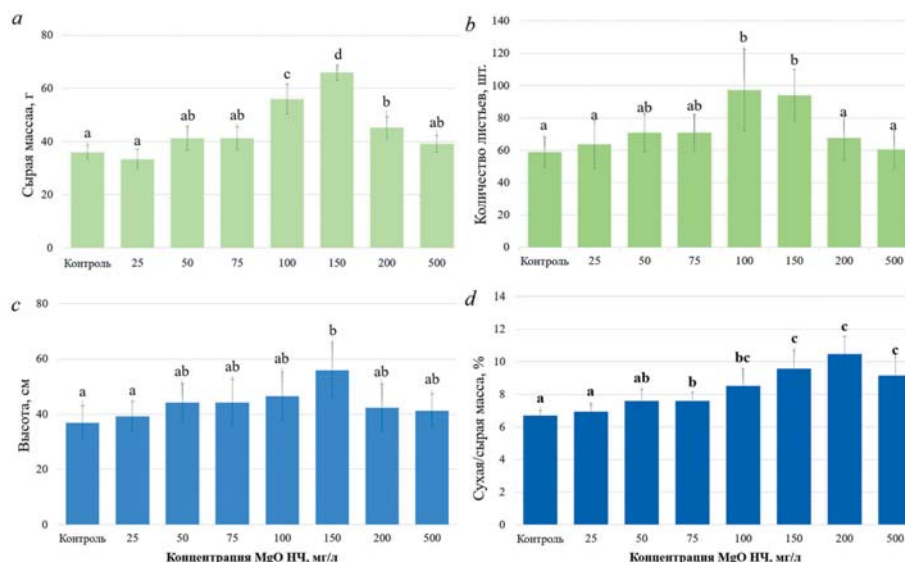


Рис. 1. Показатели роста растений базилика сорта Жиголо при внекорневой обработке MgO-НЧ:

а – сырая масса (г); б – количество листьев на одном растении (шт); в – высота растений (см);

г – отношение сухой массы к сырой (% в одном растении); представленные столбцы отображают средние значения, а вертикальные планки указывают на стандартные погрешности ($n=10$) с значимыми различиями $p \leq 0,05$; проставленные буквенные индексы у столбцов характеризуют значимые различия между группами, начиная с минимального значения а

Fig. 1. Growth parameters of Zhigolo basil plants after foliar treatment with MgO-NPs: а – fresh weight (g);

б – number of leaves per plant (pcs); в – plant height (cm); г – ratio of dry weight to fresh weight (% per plant);

the presented columns show the mean values, and the vertical bars indicate the standard errors ($n=10$) with significant differences $p \leq 0.05$; the letter indices next to the columns characterize significant differences between the groups, starting from the minimum value а

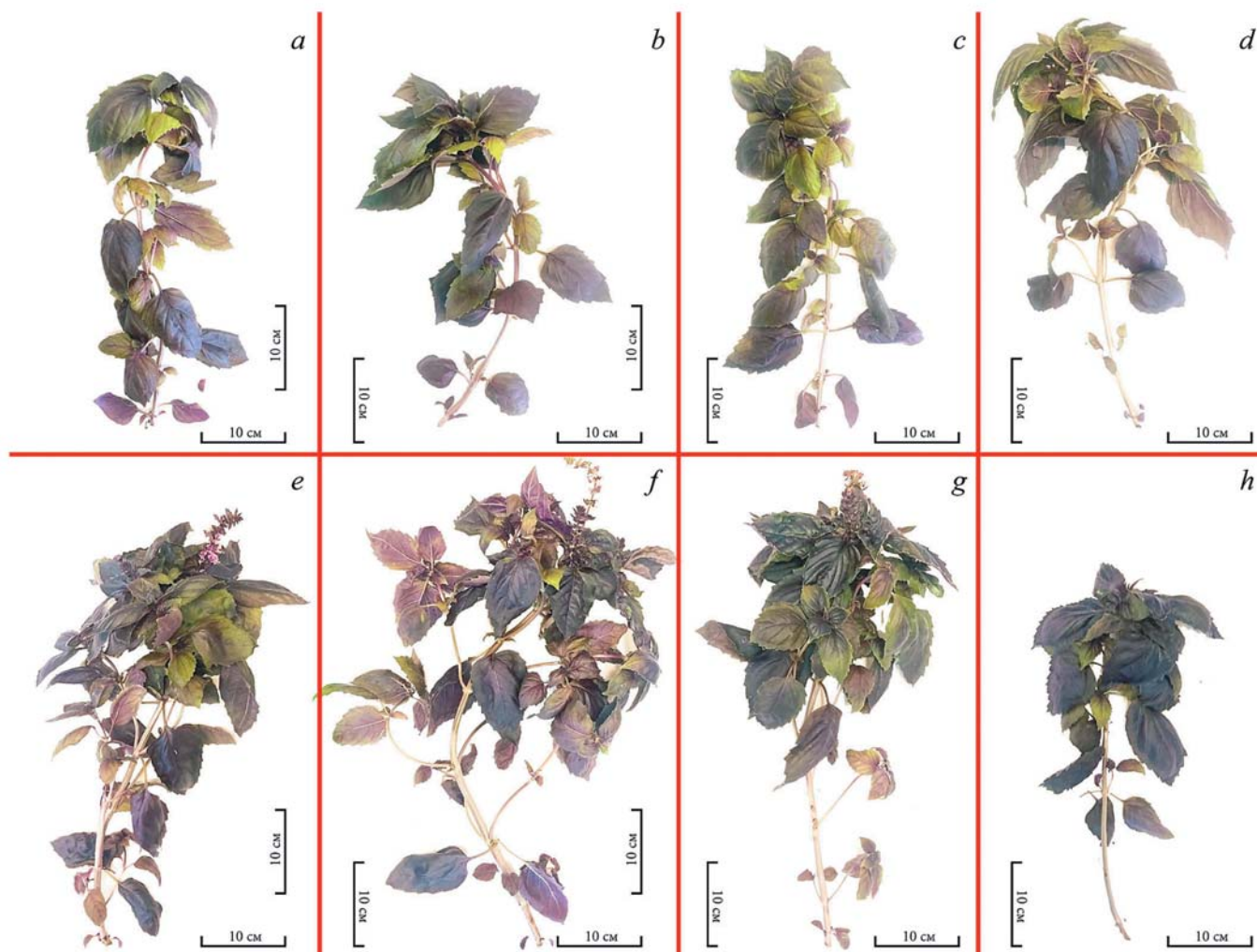


Рис. 2. Внешний вид растений на 60-й день культивирования по вариантам опыта:

(а) контроль без обработки; остальные варианты – с обработкой растворами MgO-НЧ в

следующих концентрациях: (б) 25 мг/л, (в) 50 мг/л, (г) 75 мг/л, (е) 100 мг/л, (ф) 150 мг/л, (г) 200 мг/л и (h) 500 мг/л

Fig. 2. Appearance of plants on the 60th day of cultivation according to the experimental variants: (a) control without treatment; and with MgO-NP treatment solutions at concentrations of (b) 25 mg/l, (c) 50 mg/l, (d) 75 mg/l, (e) 100 mg/l, (f) 150 mg/l, (g) 200 mg/l and (h) 500 mg/l

и OriginLab 2022. Эксперимент проводили в трёхкратной повторности.

Результаты и обсуждение

Биометрические показатели

Для определения интенсивности роста и накопления питательных веществ при различных концентрациях MgO-НЧ на 60-й день вегетации измеряли биометрические показатели (см. рис. 1). Результаты исследований, полученные на 60 сутки культивирования опытных растений базилика сорта Живого, показали преимущество обработок растворами MgO-НЧ в вариантах концентрацией 100 и 150 мг/л. Обработка растворами MgO-НЧ в концентрации 150 мг/л оказывала достоверное стимулирующее действие, увеличивая высоту растений на 51,6% по сравнению с контрольной группой растений, высота которых составляла $36,8 \pm 2,6$ см (рис. 1, с и 2 а). Концентрации 100 и 150 мг/л способствовали увеличению количества листьев на 65 и 60%, сырой массы растений на 55,7 и 83,4% соответственно (рис. 1 б, а) и стимулировали переход растений в генеративную фазу. Визуально растения вариантов были более развиты (рис. 2). У растений *Moringa oleifera* Lam., для стимулирования роста которых также применяли биосинтезированные MgO-НЧ (5–16 нм), также возрастало количество листьев растений в 2 и более раз при применении всех концентраций (40, 50 и 60 мг/л), сырая масса растений возрастала на 18–62%, однако другие концентрации в работе не рассматривались [23].

Схожие результаты были получены на культуре *P. vulgaris* в диапазоне концентраций от 50 до 100 мг/л [30]. Более высокие концентрации вызывали угнетение роста: при 200 и 500 мг/л высота снижалась более чем на 20%.

Существенные изменения сухой массы растений наблюдали во всех вариантах обработок при использовании концентраций MgO-НЧ от 75 мг/л (рис. 1д). Наибольшее накопление сухого вещества наблюдалось в вариантах с обработками 150, 200 и 500 мг/л, увеличение на 42,9, 56,3 и 36,5% соот-

ветственно. Увеличение сухой массы растений наблюдалось при применении MgO-НЧ у растений *M. oleifera* в работе Suliman A.A. и соавторов [23].

Содержание пигментов

Известно, что в условиях стресса, наночастицы имеют способность защищать фотосинтетический аппарат растений, повышать эффективность фотосинтеза, а также накапливать соответствующие гормоны и антиоксиданты, повышая их устойчивость [31]. На рисунке 3 представлена информация о содержании пигментов в опытных растениях базилика после проведенных обработок растворами MgO-НЧ в базилике сорта Жиголо в различных концентрациях на 60 день культивирования. В экспериментах Moynier F. и Fujii T. (2017) было достоверно установлено, что обработка листьев как обычным, так и наномагнием влияет на содержание хлорофилла [32]. Это подтверждено в наших исследованиях, где применение растворов MgO-НЧ в концентрациях 150, 200 и 500 мг/л приводило к увеличению его концентрации на 38, 77 и 33% соответственно. Однако применение концентраций до 100 мг/л практически не влияло на содержание общего хлорофилла.

Если сравнивать полученные нами результаты опытов с проведенными Delfani M. и соавторами (2017) на растениях *Vigna unguiculata* (L.) Walp. [25], процент повышения хлорофилла в нашем опыте был более значительным (на 100–150% против 4%). Эта разница, очевидно, зависела от выбранной концентрации, которая изначально была субтоксичной (500 мг/л) для растений *V. unguiculata*. Также это может быть связано с особенностями биохимической реакции изучаемого вида растений. Опыты, проведенные Gautam A. с соавторами (2023) на культуре горчицы (*Brassica juncea* L.), также подтверждают повышение концентраций пигментов при использовании высоких концентраций – 100–150 мг/л MgO-НЧ [24]. Более высокая концентрация MgO-НЧ (300 мг/л) при листовой обработке кориандра (*Coriandrum sativum* L.) повысило содержание общего хлорофилла на 31% [33].

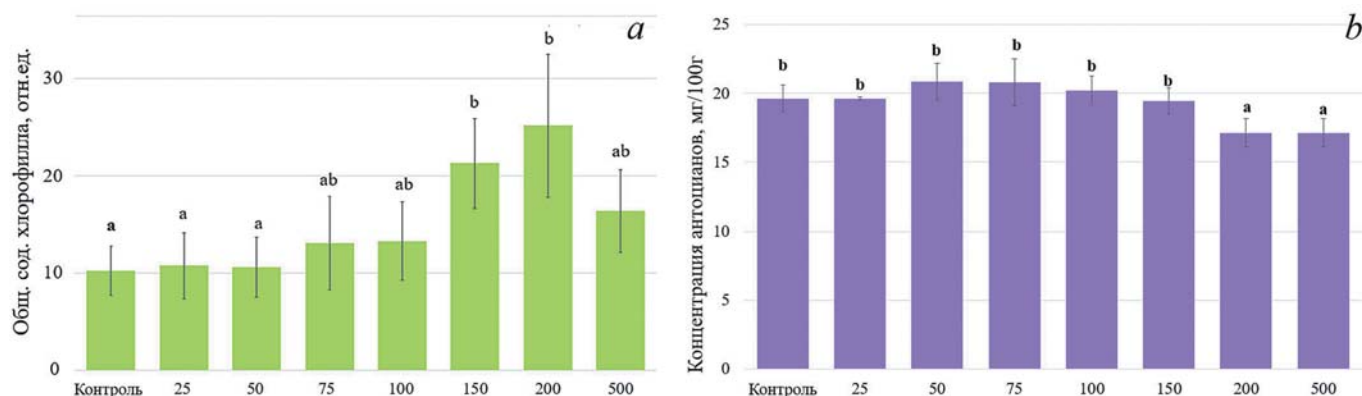


Рис. 3. Содержание пигментов растений базилика сорта Жиголо при внекорневой обработке MgO-НЧ: а – общий хлорофилл (условные единицы); б – содержание антоцианов (мг в 100 г сырого веса); представленные столбцы отображают средние значения, а вертикальные планки указывают на стандартные погрешности ($n=10$) с значимыми различиями $p \leq 0,05$; проставленные буквенные индексы у столбцов характеризуют значимые различия между группами, начиная с минимального значения а

Fig. 3. Pigment content of basil Zhigolo plants after foliar treatment with MgO-NPs: a – total chlorophyll (arbitrary units); b – anthocyanin content (mg per 100 g of fresh weight); the presented columns show the mean values, and the vertical bars indicate the standard deviations ($n=10$) with significant differences $p \leq 0,05$; the letter indices next to the columns characterize significant differences between the groups, starting from the minimum value а

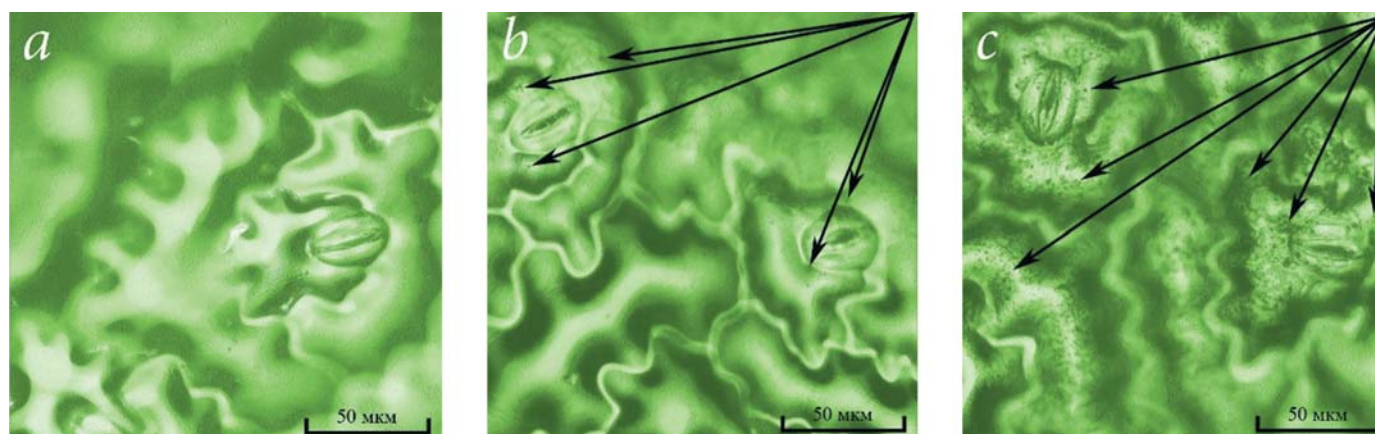


Рис. 4. Изображения поверхности листьев базилика сорта Жиголо (увеличение $\times 50$) после третьей обработки листьев MgO-НЧ: а – контроль (вода), б – опрыскивание 75 мг/л, с – обработка 200 мг/л (стрелками показаны агрегаты наночастиц)
 Fig. 4. Images of the basil leaf surface of the Zhigolo variety (magnification $\times 50$) after third treatment of leaves with MgO-NPs: a – control (water), b – treatment 75 mg/l, c – treatment 200 mg/l

Как известно, флавоноиды в растениях отвечают за снижение стресса, вызванного различными факторами [34-35]. В отличие от ранее проведенных исследований на культуре *S. Sativum*, где на 27% увеличилось количество флавоноидов при обработке 300 мг/л MgO-НЧ, в наших исследованиях не наблюдалось существенных изменений концентраций антоцианов, кроме вариантов с применением обработок 200 и 500 мг/л. Предположительно, данный эффект может быть связан со снижением стрессовой нагрузки на растения, что можно объяснить агрегатированием НЧ из-за их неустойчивости. При использовании концентраций более 200 мг/л количество крупных агрегатов возрастает в разы, что подтверждается и результатами микроскопии листа (рис. 4). Поэтому для снижения агрегатирования лучше использовать растворы наночастиц в концентрациях до 200 мг/л.

Общее содержание эфирных масел

В контрольной группе в 1 грамме листы базилика сорта

Жиголо содержалось около 0,19 мг эфирных масел (ЭМ), что при пересчете на целое растение соответствует 6,65 мг или 0,27% ЭМ на сырую массу, что согласуется с другими исследованиями [36].

Опрыскивание MgO-НЧ в концентрации 25 мг/л статистически незначимо увеличило выход эфирных масел на 25% – до 0,231 мг/г, что составляет в среднем 7,7 мг с растения (см. табл. 1). Повышение концентрации до 50 мг/л увеличило выход ЭМ на 110% – до 0,389 мг/г и 16,02 мг с растения. Значительный прирост выхода ЭМ с растения связан со стимуляцией роста и накоплением биомассы в данном варианте (с 35,9 до 42,8 г).

Концентрация 75 мг/л повысила количество ЭМ на 27% – с 0,19 мг/г (6,65 мг с растения) до 0,24 мг/г (10,09 мг с растения). Повышение содержания эфирных масел статистически значимо, но меньше, чем при 50 мг/л, что указывает на превышение минимальной ингибирующей концентрации.

Таблица 1. Количественное содержание эфирных масел в базилике сорта Жиголо при внекорневой подкормке наночастицами магния
 Table 1. Essential oil content of basil cultivar Zhigolo after foliar application of Mg-NPs. Statistically significant differences are marked with different letters. Data are presented as mean $\pm$ standard deviation

Концентрация MgO-НЧ, мг/л	Содержание ЭМ в листьях, мг/г	Суммарное содержание ЭМ в 1 растении, мг
0	0,185 $\pm$ 0,030 ab	6,65 $\pm$ 0,30a
25	0,231 $\pm$ 0,033b	7,70 $\pm$ 0,22b
50	0,389 $\pm$ 0,020c	16,02 $\pm$ 1,20d
75	0,235 $\pm$ 0,031b	10,09 $\pm$ 1,30c
100	0,160 $\pm$ 0,020a	8,94 $\pm$ 0,90c
150	0,138 $\pm$ 0,035a	9,08 $\pm$ 0,90c
200	0,214 $\pm$ 0,050ab	9,69 $\pm$ 0,80c
500	0,171 $\pm$ 0,010a	6,70 $\pm$ 0,40a

Статистически значимые различия отмечены буквами. Данные представлены в виде среднее $\pm$ стандартное отклонение

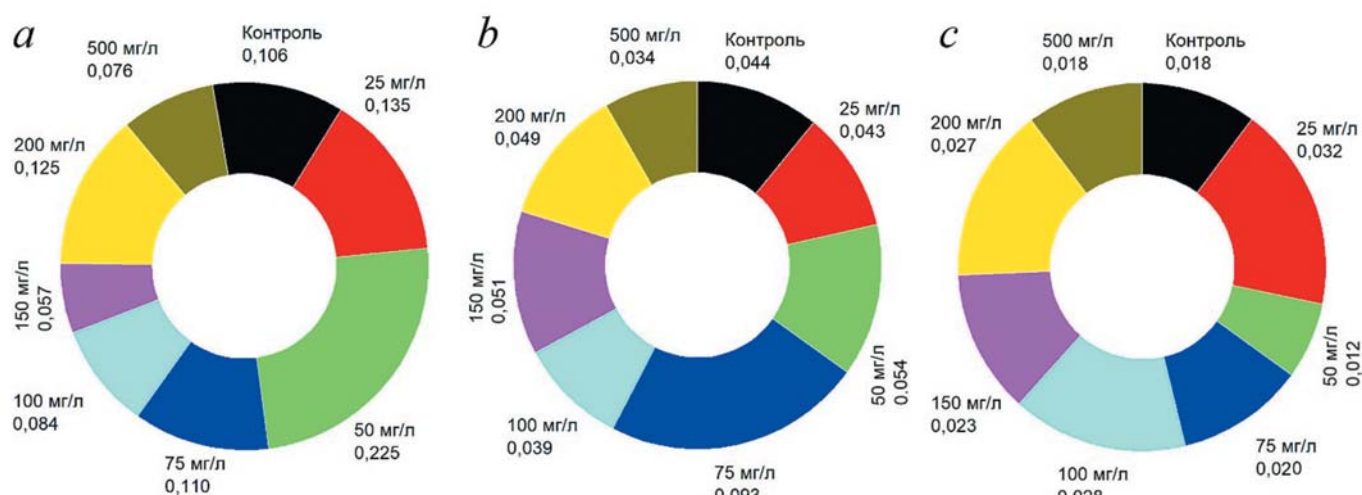


Рис. 5. Содержание основных компонентов ЭМ (эвгенола – а, эвкалиптола – б, линалоола – с) мг/г сырой массы в базилике сорта Жиголо при опрыскивании MgO-НЧ в различных концентрациях
Fig. 5. Content of the essential oil main components (eugenol – а, eucalyptol – б, linalool – с) in basil of the Zhigolo variety when sprayed with MgO-NPs in various concentrations

Подтверждением этого служит тот факт, что дальнейшее повышение концентрации до 100, 150 и 200 мг/л не увеличивало содержание ЭМ в листьях (0,130–0,214 мг/г), хотя их общее количество на растение продолжало расти за счёт увеличения сырой массы.

При максимальной концентрации наночастиц MgO (500 мг/л) содержание масел в листьях не отличалось от контроля и составляло 0,171 мг/г (6,7 мг на растение).

Таким образом, эффективными концентрациями для накопления эфирных масел являлись 25–75 мг/л. Обработки MgO-НЧ изменяли и компонентный состав эфирных масел. По составу основных компонентов данный сорт отличается преобладанием эвгенола. В контрольной группе в 1 грамме листьев содержание эвгенола составило 0,106 мг, эвкалиптола – 0,044 мг, линалоола – 0,018 мг. При обработке наночастицами MgO в концентрации 25 мг/л наблюдалось значительное повышение содержания: эвгенола – до 0,135 мг и линалоола – до 0,032 мг, тогда как содержание эвкалиптола оставалось на уровне контроля (0,043 мг). При концентрации 50 мг/л стимулирующий эффект усиливался: содержание эвгенола увеличивалось до 0,225 мг, эвкалиптола – до 0,054 мг, а линалоола, напротив, снижалось до 0,012 мг (рис. 5).

Повышение концентрации наночастицами MgO до 75 мг/л сопровождалось перераспределением состава: содержание эвгенола и линалоола снижалось до 0,11 и 0,02 мг соответственно, приближаясь к контрольным значениям, тогда как содержание эвкалиптола возрастало до 0,093 мг. В диапазоне 100–150 мг/л наблюдалась тенденция к снижению выработки масел, содержание эвгенола колебалось от 0,084 до 0,057 мг, эвкалиптол и линалоол демонстрировали увеличение 0,039–0,051 мг и 0,023–0,028 мг соответственно. При обработке MgO-НЧ в концентрации 200 мг/л зафиксировано увеличение содержания эвгенола до 0,125 мг и линалоола до 0,027 мг, тогда как содержание эвкалиптола сохранялось на уровне контрольной группы растений. При максимальной концентрации 500 мг/л содержание эвгенола и эвкалиптола

уменьшалось до 0,076 и 0,049 мг соответственно, линалоола – продолжало соответствовать уровню контрольных значений. Так как MgO-НЧ применялись на культуре базилика впервые, закономерностей их влияния на компонентный состав пока сложно выявить. Можно лишь утверждать, что, как и другие наночастицы [37–38], они вызывают изменение содержания отдельных компонентов масла базилика.

Заключение

Проведенные исследования демонстрируют, что пока для культуры базилика не существует идеального решения применения MgO-НЧ, так как одни концентрации (100–150 мг/л) способствуют активному росту растений, другие – активному фотосинтезу (150–200 мг/л), третьи – накоплению эфирных масел (25–75 мг/л), что пока не дает возможности растениям максимально раскрыть свой потенциал. Применение MgO-НЧ в качестве некорневых подкормок в концентрации 150 мг/л позволило значительно улучшить показатели роста растений, однако общее содержание эфирных масел существенно не изменилась по сравнению с контрольным вариантом. Наибольшее накопление эфирных масел в пересчете на одно растение наблюдалось при обработках концентрациями 50 и 75 мг/л. Использование MgO-НЧ способствует не только увеличению выработки эфирного масла, но и вызывает изменения содержания его отдельных компонентов, что отражает перераспределение метаболических потоков в растении, что дает возможность целенаправленно изменять ароматический профиль масла. Так, наибольшее количество эвгенола в листьях выявлено при варианте с обработкой MgO-НЧ в концентрации 50 мг/л (0,225 мг против 0,106 мг в контроле); эвкалиптола в варианте с обработкой в концентрации 75 мг/л (0,093 мг против 0,044 мг в контроле), линалоола – при 25 мг/л (0,032 мг против 0,018 мг в контроле).

Целесообразно в следующих экспериментах рассмотреть применение различных концентраций MgO-НЧ при измене-

нии их размеров, разнонаправлено влияющих на выработку эфирных масел. Провести исследования, направленные на увеличение стабильности MgO-НЧ. Комплексные многофакторные исследования необходимы для получения информации об эффективных способах стимулирования выработки продуктов вторичного метаболизма (масел, антиоксидантов и

тп.) под влиянием различных стрессоров и регулирования условий выращивания, в том числе освещения, для наиболее полной реализации потенциала продуктивности, а также изучения физиологических и биохимических откликов для наиболее глубокого понимания и прогнозирования требуемых характеристик готовой растительной продукции.

• Литература / References

1. Vertical Farming Market Outlook, 2029 [researchandmarkets.com] Research and Markets, 2025 [updated October 2024, cited September 30, 2025]. Available <https://www.researchandmarkets.com/reports/6061690/vertical-farming-market-outlook#src-pos-7>
2. Anwar F., Alkharfy K.M., Mehmood T., Bakht M.A., Najeib-ur-Rehman. Variation in Chemical Composition and Effective Antibacterial Potential of *Ocimum basilicum* L. Essential Oil Harvested from Different Regions of Saudi Arabia. *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2021;55:187–193. <https://doi.org/10.1007/s11094-021-02384-2>
3. Karomatov I.D., Pulatov S.S. The medicinal properties of basil. *Biology and integrative medicine*. 2016;1:142-155. (In Russ.) <https://elibrary.ru/wjavrf>
4. Bakhmet M.P., Kas'yanov G.I. Prospects for producing food additives from the leaves and inflorescences of eugenol basil and common basil. *Izvestiya vuzov. Food technology*. 2021;5-6(383-384):67-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.5-6.13> <https://elibrary.ru/thpxpg>
5. Tkacheva T.A., Savchenko O.M. Morpho-biological features of holy basil in greenhouse conditions. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(4):108-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-4-108-113> <https://elibrary.ru/xhudra>
6. Sachyuka T.V., Kovalenko N.A., Supichenko G.N., Bosak V.N. Using indicators of the essential oils composition to identify the variety. *Vegetable crops of Russia*. 2019;(3):68-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-3-68-73> <https://elibrary.ru/dbsuao>
7. Zheljaskov V.D., Callahan A., Cantrell C.L. Yield and oil composition of 38 basil (*Ocimum basilicum* L.) accessions grown in Mississippi. *J Agric Food Chem*. 2008;56(1):241-5. <https://doi.org/10.1021/jf072447y>
8. Basil Leaves – Global Strategic Business Report [researchandmarkets.com] Research and Markets, 2025 [updated October 2025, cited September 30, 2025]. Available <https://www.researchandmarkets.com/reports/6094789/basil-leaves-global-strategic-business-report#tag-pos-2>
9. Semenova N.A., Chilingaryan N.O., Ivaniitskikh A.S., Dorokhov A.A., Pavlova E.V., Uytova N.I. Influence of the spectral composition of light and silicon-containing fertilizer siliplant on the morphological parameters of basil in closed Artificial agroecosystems. *Bulletin of the Central Botanical Garden*. 2021;3:25-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.25791/BBGRAN.03.2021.1097> <https://elibrary.ru/nvfoid>
10. Buyisile M. Morphological and chemical composition of the essential oil of the leaf of *Schistostephium heptalobium*. *African journal of biotechnology*. 2009;8(8):1509-1519.
11. Paul B.K., Saleh-e-In M.M., Hassan S.M.M., Rahman M.Z., Saha G.C., Roy S.K. Chemical composition and biological activities of *Carum roxburghianum* Benth. (Radhuni) seeds of three Bangladeshi ecotypes. *Journal of essential oil bearing plants*. 2013;16(2):201-211. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2013.793983>
12. Er M., Tugay O., Ozcan M.M., Ulukus D., AL-Juhaimi F. Biochemical properties of some *Salvia* L. species. *Environmental monitoring and assessment*. 2013;185(6):5193-5198. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2935-z>
13. Ahmed N., Zhang B., Bozdar B., Chachar S., Rai M., Li J., Li Y., Hayat F., Chachar Z., Tu P. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1285512>
14. David E., Ortiz M., Marques M., Boaro C. Physiological indexes macro- and micronutrients in plant tissue and essential oil of *Mentha piperita* L. grown in nutrient solution with variation in N, P, K and Mg levels. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*. 2014;16(1):97-106. <https://doi.org/10.1590/S1516-05722014000100014>
15. Nemeth-Zambrone E., Szabo K., Rajhart P., Lelik L., Bernath J., Popp T. Effect of Nutrients on Drug Production and Essential Oil Content of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 2015;18(6):1508-1515. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.935040>
16. Lala S. Nanoparticles as elicitors and harvesters of economically important secondary metabolites in higher plants: A review. *IET nanobiotechnology*. 2021;15(1):28-57. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12005> PMID 34694730 PMCID PMC8675826
17. Currall S.C., King E.B., Lane N., Madera J., Turner S. What drives public acceptance of nanotechnology? *Nature Nanotechnology*. 2006;1:153-155. <https://doi.org/10.1038/nnano.2006.155>
18. Salas-Leiva J.S., Luna-Velasco A., Salas-Leiva, D.E. Use of magnesium nanomaterials in plants and crop pathogens. *Journal of Nanoparticle Research*. 2021;23: 267. DOI 10.1007/s11051-021-05337-8
19. Singh N., Manshian B., Jenkins G.J., Griffiths S.M., Williams P.M., Maffei T.G., Wright C.J., Doak S.H. NanoGenotoxicology: the DNA damaging potential of engineered nanomaterials. *Biomaterials*. 2009;30(23-24):3891-3914. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.04.009>
20. Mahmoud A., Ezgi Ö., Merve A., Özhan G. In Vitro Toxicological Assessment of Magnesium Oxide Nanoparticle Exposure in Several Mammalian Cell Types. *International Journal of Toxicology*. 2016;35(4):429-437. <https://doi.org/10.1177/1091581816648624>
21. Moeini-Nodeh S., Rahimifard M., Baeeri M., Abdollahi M. Functional improvement in rats' pancreatic islets using magnesium oxide nanoparticles through antiapoptotic and antioxidant pathways. *Biological Trace Element Research*. 2017;175(1):146-155. <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0754-8>
22. Hornak J. Synthesis, Properties, and Selected Technical Applications of Magnesium Oxide Nanoparticles: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(23). <https://doi.org/10.3390/ijms222312752>

23. Suliman A.A., El-Dewiny C.Y., Soliman M.K.Y., Salem S.S. Investigation of the Effects of Applying Bio-Magnesium Oxide Nanoparticle Fertilizer to *Moringa Oleifera* Plants on the Chemical and Vegetative Properties of the Plants' leaves. *Biotechnology journal*. 2025;20(3):e202400536. <https://doi.org/10.1002/biot.202400536>
24. Gautam A., Sharma P., Ashokhan, S., Yaacob J.S., Kumar V., Guleria P. Magnesium oxide nanoparticles improved vegetative growth and enhanced productivity, biochemical potency and storage stability of harvested mustard seeds. *Environmental Research*. 2023;229:116023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116023>.
25. Delfani M., Firouzabadi M.B., Farrokhi N., Makarian H. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2014;45:530-540. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
26. Bhattacharjee S., DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of controlled release*. 2016;235:337-351. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
27. Karamatova G.B., Safarov A.K., Ikramova Sh.Sh., Safarov K.S. Biological features of common basil (*Ocimum basilicum* L.) under various conditions of cultivation. *International research journal*. 2020;2(97):43-45. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.97.7.041> <https://elibrary.ru/htijmt>
28. Maslennikov P., Chupakhina G., Skrypnick L., Fedurayev P., Poltavskaya R. Content of anthocyanin and carotenoid pigments in medicinal plants. *Bulletin of Moscow Region State University*. 2013;1:6. <https://elibrary.ru/qzovrl>
29. Semenova N.A., Smirnov A.A., Ivanitskikh A.S., Izmailov A.Y., Dorokhov A.S., Proshkin Y.A., Yanykin D.V., Sarimov R.R., Gudkov S.V., Chilingaryan N.O. Impact of Ultraviolet Radiation on the Pigment Content and Essential Oil Accumulation in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Applied Sciences*. 2022;12:7190. <https://doi.org/10.3390/app12147190>
30. Amaya-Olivas N. I., Sánchez E., Hernández-Ochoa L., Ojeda-Barrios D. L., Ávila-Quezada G. D., Flores-Córdova M. A., Chávez-Flores D., Ayala-Soto J. G., Salcido-Martínez A., Ramírez-Estrada C. A. Biofortification with magnesium nanofertilizer on bioactive compounds and antioxidant capacity in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2023;51(1):12830. <https://doi.org/10.15835/nbha51112830>
31. Rasheed A., Li H., Tahir M.M., Mahmood A., Nawaz M., Shah A.N., Aslam M.T., Negm S., Moustafa M., Hassan M.U., Wu Z. The role of nanoparticles in plant biochemical, physiological, and molecular responses under drought stress: A review. *Front Plant Sci*. 2022;13:976179. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.976179>
32. Moynier F., Fujii T. Theoretical isotopic fractionation of magnesium between chlorophylls. *Scientific Reports*. 2017;7:6973. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07305-6>
33. Kaleem M., Shah A.A., Usman S., Xu W., Alsahli A.A. Magnesium Oxide Nanoparticles Improved Drought Resilience in *Coriandrum sativum* L. through Lifting Antioxidant Level, Redox Balancing, and Improving Photosynthetic Efficiency. *ACS Omega*. 2025;10(30):32813-32828. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00986>
34. Delfani M., Firouzabadi M.B., Farrokhi N., Makarian H.. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2014;45:530-540. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
35. Pandey M., Srivastava A.K., Suprasanna P., D'Souza S.F. Thiourea mediates alleviation of UV-B stress-induced damage in the Indian mustard (*Brassica juncea* L.). *Journal of Plant Interactions*. 2012;7:143–150.
36. Jan R., Asif S., Asaf S., Lubna, Khan Z., Kim K.-M. Unveiling the protective role of anthocyanin in rice: insights into drought-induced oxidative stress and metabolic regulation. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1397817. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397817>
37. Zheljazkov V.D., Cantrell C.L., Evans W.B., Ebelhar M.W., Coker C.E. Yield and Composition of *Ocimum basilicum* L. and *Ocimum sanctum* L. Grown at Four Locations. *Hortscience*. 2008;43:737-741. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.737>
38. Gohari G., Panahirad S., Mohammadi A., Kulak M., Dadpour M.R., Lighvan Z.M., Sharifi S., Eftekhari-Sis B, Szafert S., Fotopoulos V., Akbari A. Characterization of Octa-aminopropyl polyhedral oligomeric silsesquioxanes (OA-POSS) nanoparticles and their effect on sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) response to salinity stress. *Plant Physiol Biochem*. 2023;196:89-102. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.01.019>
39. Nazir S., Jan H., Zaman G., Khan T., Ashraf H., Meer B., Zia M., Drouet S., Hano C., Abbasi B.H. Copper oxide (CuO) and manganese oxide (MnO) nanoparticles induced biomass accumulation, antioxidants biosynthesis and abiotic elicitation of bioactive compounds in callus cultures of *Ocimum basilicum* (Thai basil). *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. 2021;49(1):625-633. <https://doi.org/10.1080/21691401.2021.1984935>

Об авторах

Наталья Александровна Семенова – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, Центр «Биофотоника» ИОФ РАН <https://orcid.org/0000-0003-4132-7256>,

Scopus ID 57220058334, AAS-9393-2021, SPIN-код: 9573-9253, автор для переписки, natalia.86@inbox.ru

Дмитрий Алексеевич Захаров – младший научный сотрудник Центра «Биофотоника» ИОФ РАН,

<https://orcid.org/0009-0005-7584-0295>,

Scopus ID: 58672963900,

Researcher ID JNR-9098-2023,

SPIN-код: 1483-3842, zaharov121221@mail.ru

Евгения Вячеславовна Степанова – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Центр «Биофотоника» ИОФ РАН

<https://orcid.org/0000-0002-3508-8642>,

Scopus ID: 7101888840,

Researcher ID E-9553-2014, SPIN-код: 4264-1029, jacky-st@yandex.ru

Софья Руслановна Саримова – лаборант,

Центр «Биофотоника» ИОФ РАН

<https://orcid.org/0009-0003-7614-1803> sofyasarimova@gmail.com

About the Authors

Natalia A. Semenova – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences <https://orcid.org/0000-0003-4132-7256>,

Scopus ID 57220058334, AAS-9393-2021, SPIN-code: 9573-9253, Corresponding Author, natalia.86@inbox.ru

Dmitry A. Zakharov – Junior Researcher of Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<https://orcid.org/0009-0005-7584-0295>,

Scopus ID: 58672963900, Researcher ID JNR-9098-2023,

SPIN-code: 1483-3842, zaharov121221@mail.ru

Evgenia V. Stepanova – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher, Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<https://orcid.org/0000-0002-3508-8642>, Scopus ID: 7101888840,

Researcher ID E-9553-2014, SPIN-code: 4264-1029, jacky-st@yandex.ru

Sofya R. Sarimova – Laboratory Assistant, Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<https://orcid.org/0009-0003-7614-1803>, sofyasarimova@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-185-193>
УДК: 633.11:631.523.4(470.31)

И.Н. Ворончихина*, Д.А. Щелканов¹,
В.С. Рубец^{1,2}, В.В. Ворончихин¹

аментальные основы биотехнологии»
Российской академии наук»
119071, РФ, Москва

¹Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Главный ботанический сад
им. Н.В. Цицина Российской академии наук (ГБС РАН)
127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, д.4

²Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Всероссийский
научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной биотехнологии» (ВНИИСБ)
127550, Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 42

*Авторы для переписки:
voronchikhinayarinika@yandex.ru

Финансирование: Исследования выполнены
в рамках государственного задания ГBS РАН
(№123120600005-2)*.

Вклад авторов: Ворончихина И. Н.: концептуализация,
проведение исследования, создание черновика
рукописи. Щелканов Д.А.: методология, проведение
исследования. Рубец В.С.: руководство исследовани-
ем, создание рукописи и ее редактирование.
Ворончихин В.В.: программное обеспечение, верификация
данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют
об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ворончихина И.Н., Щелканов
Д.А., Рубец В.С., Ворончихин В.В. Оценка характера
наследования количественных признаков гибридами
F₁ пшеницы мягкой яровой в условиях ЦРНЗ. *Овощи
России*. 2025;(6):185-193.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-185-193>

Поступила в редакцию: 27.09.2025

Принята к печати: 11.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Irina N. Voronchikhina*, Danila A. Shchelkanov¹,
Valentina S. Rubets^{1,2}, Viktor V. Voronchikhin¹

¹Federal State Budgetary Institution of science Main
Botanical Garden named after N. Tsitsin of Russian
Academy of Sciences (GBS RAN)
4, Botanicheskaya st., Moscow, 127276, Russia

²Federal State Budgetary Scientific Institution
All-Russian Research Institute
of Agricultural Biotechnology (ARRIAB)
42 Timiryazevskaya st., Moscow, 127550, Russia

*Corresponding Authors:
voronchikhinayarinika@yandex.ru

Funding. The research was carried out within the state
assignment of the MBG RAS (№123120600005-2)*.

Authors' Contribution: Voronchikhina I.N.: conceptual-
ization, investigation, writing – original draft. Shchelkanov
D.A.: methodology, investigation. Rubets V.S.: supervi-
sion, writing – review & editing. Voronchikhin V.V.: soft-
ware, validation.

Conflict of interest. The authors declare
no conflict of interest.

For citations: Voronchikhina I.N., Shchelkanov D.A.,
Rubets V.S., Voronchikhin V.V. Assessment of the nature
of inheritance of quantitative traits by F₁ hybrids of soft
spring wheat in the conditions of the CRNZ. *Vegetable
crops of Russia*. 2025;(6):185-193. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-185-193>

Received: 27.09.2025

Accepted for publication: 11.11.2025

Published: 18.12.2025

Оценка характера наследования количественных признаков гибридами F₁ пшеницы мягкой яровой в условиях ЦРНЗ

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Подбор пар для скрещивания является основной задачей изучения коллекции любой культуры. При этом важно знать, какие родительские формы обладают высокой сорто-образующей способностью. Поэтому целью нашего исследования было изучение характера наследования количественных признаков продуктивности гибридами F₁ пшеницы мягкой яровой и выделение наиболее перспективных комбинаций для дальнейшей селекционной работы.

Материал и методы. В качестве материала для исследования использовали внутривидовые гибриды F₁ и их родительские формы пшеницы мягкой яровой. Исходные формы были всесторонне изучены (в том числе был применен метод индексов) в коллекционных питомниках в 2019-2021 гг., различающихся по метеорологическим условиям. В качестве материнских форм использовали наиболее урожайные сорта, в качестве отцовских – формы с высокой устойчивостью к болезням, полеганию, высоким качеством зерна. На основе каждой материнской формы были получены серии гибридов F₁ по типу топкроссов. У гибридов F₁ проведен анализ характера наследования количественных признаков колоса пшеницы мягкой яровой, связанных с урожайностью (число и масса зерен с колоса, число зерен в колоске, масса 1000 зерен) и рассчитаны показатели фенотипического доминирования (по Гриффину), где депрессия соответствует значению D<-1; рецессивное наследование – при -1<D<-0,5; аддитивное действие генов – при -0,5<D<0,5; доминирование – при 0,5<D<1; при D>1 наблюдается гетерозис. Коэффициент истинного гетерозиса рассчитывали по Омарову Д.С.

Результаты. Установлено, что примерно половина изученных гибридных комбинаций проявляют гетерозис по числу зерен в главном колосе (около 60%), около 30% комбинаций проявляют гетерозис по числу зерен в колоске, свыше 60% – по массе зерен с главного колоса и около 80% – по массе 1000 зерен. Это служит косвенным доказательством эффективности метода индексов для подбора пар для скрещиваний. Выделены перспективные комбинации с прогнозом отбора в последующих поколениях трансгрессивных по урожайности линий яровой пшеницы для ЦРНЗ. Для материнской формы Злата наилучшие комбинации получены с опылителями МК№41, Сударыня, Симбирцит и МК №153; для Экада 66 – Симбирцит, Злата; для Гранни – Лиза, Лада; для КВС Аквилон – AC Taber, Agata, AC Karma; для Иволга – Гранни.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

пшеница мягкая яровая, гибриды F₁, доминирование, гетерозис, аддитивное наследование, селекционная ценность

Assessment of the nature of inheritance of quantitative traits by F₁ hybrids of soft spring wheat in the conditions of the CRNZ

ABSTRACT

Relevance. The selection of pairs for crossing is the main task of studying a collection of any crop. It is important to know which parental forms have high variety-forming ability. Therefore, the aim of our study was to study the nature of the inheritance of quantitative productivity traits by F₁ hybrids of soft spring wheat and to identify the most promising combinations for further breeding work.

Material and Methods. Intraspecific F₁ hybrids and their parental forms of soft spring wheat were used as the material for the study. The original forms were comprehensively studied (including the index method) in collection nurseries in 2019-2021, differing in meteorological conditions. The most productive varieties were used as maternal forms, and forms with high resistance to diseases, lodging, and high grain quality were used as paternal forms. Based on each maternal form, a series of F₁ hybrids of the topcross type were obtained. In F₁ hybrids, the inheritance pattern of quantitative traits of the ear of soft spring wheat related to yield (number and weight of grains per ear, number of grains per ear, weight of 1000 grains) was analyzed and phenotypic dominance indices were calculated (according to Griffing), where depression corresponds to the value D<-1; recessive inheritance – at -1<D<-0.5; additive effect of genes – at -0.5<D<0.5; dominance – at 0.5<D<1; heterosis is observed at D>1. The coefficient of true heterosis was calculated according to Omarov D.S.

Results. It was found that approximately half of the studied hybrid combinations exhibit heterosis in the number of grains in the main spike (about 60%), about 30% of combinations exhibit heterosis in the number of grains in a spikelet, over 60% – in the weight of grains from the main spike and about 80% – in the weight of 1000 grains. This serves as indirect evidence of the effectiveness of the index method for selecting pairs for crossing. Promising combinations with a forecast of selection in subsequent generations of transgressive yield lines of spring wheat for CRNZ were identified. For the maternal form Zlata, the best combinations were obtained with pollinators MK No. 41, Sudarynya, Simbirsit and MK No. 153; for Ekada 66 – Simbirsit, Zlata; for Granni – Liza, Lada; for KVS Aquilon – AC Taber, Agata, AC Karma; for Ivolga – Granni.

KEYWORDS:

soft spring wheat, F₁ hybrids, dominance, heterosis, additive inheritance, breeding value

Введение

В Центральном районе Нечерноземной зоны яровая пшеница занимает 28 505,9 тыс. га. Она превосходит озимую по качеству зерна, хотя и уступает по урожайности и является прекрасной страховой культурой на случай плохой перезимовки озимых [1]. Поэтому селекция этой культуры активно ведется во всех профильных селекционных учреждениях зоны. Основой в селекции любой культуры является исходный материал, его разнообразие и степень селекционной проработки. И вопросы, связанные с подбором пар для скрещиваний и дальнейшей судьбой гибридных комбинаций, их перспективностью с точки зрения выделения высокопродуктивных и хорошо адаптированных к условиям среды линий, постоянно занимают исследователей [2 – 4]. Основные хозяйственно-полезные признаки пшеницы контролируются большим числом генов с малым индивидуальным эффектом, которые при взаимодействии с различными условиями среды могут проявляться в разной степени. Из-за малого влияния отдельных полигенов и модифицирующего влияния среды их невозможно идентифицировать при помощи гибридологического анализа. Кроме того, имеет место влияние генов-модификаторов и супрессоров, а также неаллельные взаимодействия. Это заставляет искать способы оценки селекционной ценности исходного материала, в частности через характер наследования количественных признаков гибридами F_1 . Такие данные могут служить для прогнозирования стратегии селекционной работы [5, 6].

Считается, что для самоопылителей, таких, как пшеница, важны аддитивные эффекты генов, которые позволяют в поколениях выделить генотипы с новыми сочетаниями генов и, соответственно, признаков [6-8]. Однако к настоящему времени накопилось достаточно много серьезных многолетних исследований комбинационной способности самоопыляющихся зерновых культур, позволяющих утверждать, что проявление у гибридов F_1 доминирования и гетерозиса количественного признака характеризует комбинацию как перспективную с точки зрения возможности отбора в последующих поколениях трансгрессивных форм по продуктивности и сопутствующим количественным признакам (высоте растений, длине и плотности колоса, числу и массе зерен с колоса и растения, массе 1000 зерен и др.). Кроме того, показана возможность выделять не только высокопродуктивные линии, но и характеризующиеся высокой адаптивностью в конкретных природно-климатических условиях [2, 5, 9-12]. Показано, что величина и частота проявления гетерозиса по различным признакам зависит от сложившихся в вегетационный период погодных условий. Так, в засуху сильно проявляется гетерозис по числу и массе зерен с колоса, а также по массе 1000 зерен [7]. Благоприятные условия вегетации позволяют проявиться гетерозису по другим элементам продуктивности [13].

Таким образом, изучение характера наследования количественных признаков гибридами F_1 пшеницы мягкой яровой позволяет получить важную информацию об исходном материале в конкретной природно-климатической зоне и более эффективно вести селекционную работу.

Цель исследования – изучить характер наследования количественных признаков продуктивности (плотности колоса, числа и массы зерен с колоса, числа зерен в колоске, массы 1000 зерен) гибридами F_1 пшеницы мягкой яровой, выделить наиболее перспективные комбинации для дальнейшей селекционной работы.

Материал и методы исследований

В качестве материала для исследования использовали внутривидовые гибриды F_1 и их родительские формы пшеницы мягкой яровой. Исходные формы были всесторонне изучены в коллекционных питомниках в 2019-2021 годах, различающихся по метеорологическим условиям. Для беспристрастного выделения наиболее подходящих для ЦРНЗ генотипов был применен метод индексов [14], позволивший выявить образцы с наименьшим числом неблагоприятных признаков. Они различались по месту создания (табл. 1). В качестве материнских форм использовали наиболее урожайные сорта, в качестве отцовских – формы с высокой устойчивостью к болезням, полеганию, высоким качеством зерна. На основе каждой материнской формы были получены серии гибридов F_1 по типу топкроссов.

Условия вегетации в 2022 году в Московской области можно охарактеризовать как благоприятные для роста и развития пшеницы мягкой яровой, поскольку метеорологические условия приближались к среднесезонным значениям. Агротехника общепринятая для зоны.

В 2022 г. гибриды F_1 и родительские формы (P_1 и P_2) высевали бесповторно вручную по схеме $P_1 : F_1 : P_2$. В рядке 20 семян, площадь питания 5 x 30 см. В течение вегетации проводили фенологические наблюдения, оценки устойчивости к полеганию и болезням. После созревания все образцы были убраны с корнями и подвергнуты биометрическому анализу структуры продуктивности по общепринятой методике. Характер наследования оценивали по степени фенотипического доминирования (D) количественных признаков продуктивности у межсортовых гибридов F_1 пшеницы мягкой яровой. Расчеты проводили по формуле [15], с использованием электронных таблиц программы «Microsoft Excel»:

$$D = \frac{F_1 - (P_1 + P_2) / 2}{P_1 - (P_1 + P_2) / 2}, \quad (1)$$

где D – степень фенотипического доминирования (показатель знака и относительной величины суммарного действия генов у гибрида F_1); F_1 – средняя величина признака у растений гибрида; F_1 – средняя величина признака у лучшего родителя; P_2 – средняя величина признака у худшего родителя. При этом понятие о лучшем или худшем родителе весьма относительно. В нашей работе лучший родитель – тот, у которого более высокие значения признака.

Если $D < -1$, то наблюдается депрессия; $-1 < D < -0,5$ – признаки лучшего родителя определяются рецессивными аллелями; $-0,5 < D < 0,5$ – промежуточное наследование признака, определяемое в основном аддитивным действием генов; $0,5 < D < 1$ – признак в основном определяется доминантным действием генов; при $D > 1$ наблюдается гетерозис, обусловленный доминированием, сверхдоминированием и неаллельными взаимодействиями.

Гетерозис истинный (Гист.) характеризует более сильное проявление признака в F_1 по сравнению с лучшей родительской формой [12]. Значения коэффициентов истинного гетерозиса рассчитывали по формуле [16].

$$\Gamma_{\text{ист}} = \frac{F_1 - P_{\text{лучш.}}}{P_{\text{лучш.}}}, \quad (2)$$

где $\Gamma_{\text{ист}}$ – коэффициент истинного гетерозиса; F_1 – средняя величина признака у растений гибрида; $P_{\text{лучш.}}$ – средняя величина признака у лучшего родителя.

Таблица 1. Родительские формы гибридов F₁ пшеницы мягкой яровой
Table 1. Parental forms of F₁ hybrids of soft spring wheat

Генотип	Разновидность	Происхождение
Злата	<i>lutescens</i>	ФИЦ «Немчиновка», Верхневолжский ФАНЦ
Экада 66	<i>lutescens</i>	ФГБУН Самарский ФИЦ РАН
Гранни	<i>erythrosperrum</i>	Австрия
КВС Аквилон	<i>lutescens</i>	Австрия
Иволга	<i>lutescens</i>	ФГБОУ ВО «РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева»
Агата	<i>lutescens</i>	ФИЦ «Немчиновка»
Лада	<i>lutescens</i>	ФИЦ «Немчиновка»
Лиза	<i>lutescens</i>	ФИЦ «Немчиновка»
Симбирцит	<i>lutescens</i>	ФГБУН Самарский ФИЦ РАН
Сударыня	<i>lutescens</i>	Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию, Верхневолжский ФАНЦ
Тризо	<i>lutescens</i>	Германия
Тюменская 25	<i>lutescens</i>	ФИЦ «Тюменский научный центр СО РАН»
АС Karma	<i>graecum</i>	Канада, Саскачеван
АС Taber	<i>erythrosperrum</i>	Канада, Саскачеван
BW 90	<i>lutescens</i>	Канада
МК №41 (линия синтетической пшеницы)	<i>erythrosperrum</i>	Комбинация (SD 3355 /4/ Milan/Kauz // Prinia /3/ Bav 92) из CIMMYT (Мексика)
МК №153 (линия синтетической пшеницы)	<i>lutescens</i> + <i>erythrosperrum</i>	Комбинация (Lutescens 1085/7/Tob/Era// Tob/Cno 67/3/Plu/4/Vee#5/5/ Kauz./6/Fret2) из CIMMYT (Мексика)

Высокую степень фенотипического доминирования ($D > 1$) и коэффициенты истинного гетерозиса ($G_{ist} > 1$) по количественным признакам, положительно связанным с урожайностью (число и масса зерен с колоса, озерненность одного колоска, масса 1000 зерен), у гибридов F₁ принимали за косвенный признак перспективности и высокой селекционной ценности гибридной комбинации [5].

Результаты и их обсуждение

Основными элементами структуры урожая у яровой пшеницы, тесно связанными с итоговой урожайностью агроценоза, являются число и масса зерна с колоса, озерненность одного колоска, масса 1000 зерен. Эти показатели рекомендуются селекционерами в качестве морфологических маркеров для отбора наиболее урожайных генотипов [3, 5, 10, 14]. Поэтому информация о типе их наследования и возможном гетерозисе у гибридов F₁ будет полезна для выделения перспективных комбинаций, в которых в последующих поколениях возможен отбор трансгрессивных форм.

Родительские формы гибридов значительно различались по среднему числу зерен с колоса (табл. 2). Наиболее озер-

ненными были сорта Гранни (68 шт.), КВС Аквилон (63 шт.), Иволга (67 шт.), Агата (59 шт.), Лиза (59 шт.), Лада (57 шт.).

Значения показателя для остальных сортов варьировали в пределах 35-55 шт. Гибриды F₁ содержали весь спектр наследования – от депрессии до гетерозиса. Похожие результаты получены коллегами из Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий [17]. По мнению ряда исследователей [18, 19] при наследовании числа зерен в колосе по типу доминирования низких показателей родителя идет резкое снижение вероятности отбора положительных трансгрессий в гибридных популяциях, поэтому такие комбинации необходимо выбраковывать в первом поколении.

В комбинациях на основе сорта Злата преобладающим характером наследования числа зерен в колосе были гетерозис и доминирование признака лучшего родителя (почти 80%). Наиболее высокий гетерозис проявился в комбинациях с опылителями МК№41, МК№153 и BW 90. Эти комбинации можно выделить как наиболее перспективные.

В комбинациях на базе сортов Экада 66, Гранни и КВС Аквилон промежуточный и рецессивный характер наследо-

Таблица 2. Характер наследования числа зерен в главном колосе и наличие истинного гетерозиса у гибридов F_1 пшеницы мягкой яровой
 Table 2. The nature of inheritance of the number of grains in the main spike and the presence of true heterosis in F_1 hybrids of soft spring wheat

Гибридная комбинация	♀	F_1	♂	D	Характер наследования	Г ист., %
♀ Злата × ♂ МК№41	42,2	63,0	48,1	6,1	гетерозис	31,0
♀ Злата × ♂ АС Карма	42,2	49,1	50,8	0,6	доминир.	-3,3
♀ Злата × ♂ КВС Аквилон	42,2	60,6	63,2	0,8	доминир.	-4,1
♀ Злата × ♂ Экада 66	42,2	47,4	49,3	0,5	промежут.	-3,9
♀ Злата × ♂ BW 90	42,2	46,1	35,2	2,1	гетерозис	9,2
♀ Злата × ♂ Тюменская 25	42,2	45,9	49,4	0,0	промежут.	-7,1
♀ Злата × ♂ Сударыня	42,2	55,7	53,6	1,4	гетерозис	3,9
♀ Злата × ♂ Симбирцит	42,2	52,4	49,5	1,8	гетерозис	5,9
♀ Злата × ♂ МК №153	42,2	65,3	47,5	7,7	гетерозис	37,5
♀ Экада 66 × ♂ Тризо	49,3	50,4	54,7	-0,6	рецессивное	-7,9
♀ Экада 66 × ♂ Тюменская 25	49,3	50,6	49,4	25,0	гетерозис	2,4
♀ Экада 66 × ♂ Лада	49,3	52,6	57,4	-0,2	промежут.	-8,4
♀ Экада 66 × ♂ Гранни	49,3	63,5	68,8	0,5	промежут.	-7,7
♀ Экада 66 × ♂ КВС Аквилон	49,3	60,3	63,2	0,6	доминир.	-4,6
♀ Экада 66 × ♂ Иволга	49,3	52,8	67,2	-0,6	рецессивное	-21,4
♀ Экада 66 × ♂ Агата	49,3	51,1	58,8	-0,6	рецессивное	-13,1
♀ Экада 66 × ♂ Симбирцит	49,3	55,2	49,5	58,0	гетерозис	11,5
♀ Экада 66 × ♂ Злата	49,3	51,6	42,2	1,6	гетерозис	4,7
♀ Гранни × ♂ Сударыня	68,8	41,4	53,6	-2,6	депрессия	-39,8
♀ Гранни × ♂ Лиза	68,8	80,5	58,9	3,4	гетерозис	17,0
♀ Гранни × ♂ Лада	68,8	79,3	57,4	2,8	гетерозис	15,3
♀ Гранни × ♂ Тризо	68,8	65,5	54,7	0,5	доминир.	-4,8
♀ Гранни × ♂ Симбирцит	68,8	63,0	49,5	0,4	промежут.	-8,4
♀ Гранни × ♂ Экада 66	68,8	69,7	49,3	1,1	гетерозис	1,3
♀ Гранни × ♂ Злата	68,8	60,5	42,2	0,4	промежут.	-12,1
♀ КВС Аквилон × ♂ Злата	63,2	57,4	42,2	0,4	промежут.	-9,2
♀ КВС Аквилон × ♂ Л. МК153	63,2	56,4	47,5	0,1	промежут.	-10,8
♀ КВС Аквилон × ♂ BW90	63,2	55,3	35,2	0,4	промежут.	-12,5
♀ КВС Аквилон × ♂ Иволга	63,2	64,1	67,2	-0,6	рецессивное	-4,6
♀ КВС Аквилон × ♂ АС Taber	63,2	76,5	46,3	2,6	гетерозис	21,0
♀ КВС Аквилон × ♂ Сударыня	63,2	60,2	53,6	0,4	промежут.	-4,7
♀ КВС Аквилон × ♂ Агата	63,2	70,4	58,8	4,3	гетерозис	11,4
♀ КВС Аквилон × ♂ Лада	63,2	66,5	57,4	2,1	гетерозис	5,2
♀ КВС Аквилон × ♂ Экада 66	63,2	66,1	49,3	1,4	гетерозис	4,6
♀ КВС Аквилон × ♂ Тюменская 25	63,2	55,2	49,4	-0,2	промежут.	-12,7
♀ КВС Аквилон × ♂ Симбирцит	63,2	62,3	49,5	0,9	доминир.	-1,4
♀ КВС Аквилон × ♂ АС Карма	63,2	65,8	50,8	1,4	гетерозис	4,1
♀ Иволга × ♂ Тюменская 25	67,2	54,5	49,4	-0,4	промежут.	-18,9
♀ Иволга × ♂ КВС Аквилон	67,2	64,8	63,2	-0,2	промежут.	-3,6
♀ Иволга × ♂ Линия МК №41	67,2	47,9	48,1	-1,0	рецессивное	-28,7
♀ Иволга × ♂ АС Taber	67,2	53,3	46,3	-0,3	промежут.	-20,7
♀ Иволга × ♂ АС Карма	67,2	63,7	50,8	0,6	доминир.	-5,2
♀ Иволга × ♂ BW90	67,2	49,7	35,2	-0,1	промежут.	-26,0
♀ Иволга × ♂ Экада 66	67,2	63,3	49,3	0,6	доминир.	-5,8
♀ Иволга × ♂ Гранни	67,2	71,5	68,8	4,4	гетерозис	3,9

Таблица 3. Характер наследования среднего числа зерен в колоске и наличие истинного гетерозиса у гибридов F₁ пшеницы мягкой яровой
 Table 3. The nature of inheritance of the average number of grains in a spikelet and the presence of true heterosis in F₁ hybrids of soft spring wheat

Гибридная комбинация	♀	F ₁	♂	D	Характер наследования	Г ист., %
♀Злата × ♂ МК№41	2,6	3,7	3,1	3,4	гетерозис	19,4
♀ Злата × ♂ АС Карма	2,6	3,0	3,2	0,3	промежут.	-6,3
♀ Злата × ♂ КВС Аквилон	2,6	3,2	3,6	0,2	промежут.	-11,1
♀ Злата × ♂ Экада 66	2,6	2,6	2,5	1,0	доминир.	0,0
♀ Злата × ♂ BW 90	2,6	2,6	2,6	0,0	промежут.	0,0
♀ Злата × ♂ Тюменская 25	2,6	2,6	2,8	-1,0	рецессивное	-7,1
♀ Злата × ♂ Сударыня	2,6	3,0	2,9	1,7	гетерозис	3,4
♀ Злата × ♂ Симбирцит	2,6	2,8	2,7	7,0	гетерозис	5,7
♀ Злата × ♂ МК №153	2,6	3,5	2,7	17,0	гетерозис	29,6
♀ Экада 66× ♂ Тризо	2,5	2,6	3,1	-0,7	рецессивное	-16,1
♀ Экада 66× ♂ Тюменская 25	2,5	2,7	2,8	0,3	промежут.	-3,6
♀ Экада 66× ♂ Лада	2,5	2,8	3,0	0,2	промежут.	-6,7
♀ Экада 66× ♂ Гранни	2,5	3,4	3,7	0,5	промежут.	-8,1
♀ Экада 66 × ♂ КВС Аквилон	2,5	3,2	3,6	0,3	промежут.	-11,1
♀ Экада 66× ♂ Иволга	2,5	2,8	3,7	-0,5	промежут.	-24,3
♀ Экада 66× ♂ Агата	2,5	2,8	3,3	-0,3	промежут.	-15,2
♀ Экада 66× ♂ Симбирцит	2,5	2,9	2,6	7,0	гетерозис	11,5
♀ Экада 66× ♂ Злата	2,5	2,8	2,6	5,0	гетерозис	7,7
♀Гранни × ♂ Сударыня	3,7	2,2	2,9	-2,8	депрессия	-40,5
♀ Гранни × ♂ Лиза	3,7	4,0	3,3	2,5	гетерозис	8,1
♀ Гранни × ♂ Лада	3,7	4,3	3,0	2,7	гетерозис	16,2
♀ Гранни × ♂ Тризо	3,7	3,4	3,1	0,0	промежут.	-8,1
♀ Гранни × ♂ Симбирцит	3,7	3,3	2,6	0,3	промежут.	-10,8
♀ Гранни × ♂ Экада 66	3,7	3,6	2,5	0,8	доминир.	-2,7
♀ Гранни × ♂ Злата	3,7	3,6	2,6	0,8	доминир.	-2,7
♀КВС Аквилон× ♂Злата	3,6	3,3	2,6	0,4	промежут.	-8,3
♀ КВС Аквилон × ♂ Л. МК153	3,6	3,1	2,7	-0,1	промежут.	-13,9
♀ КВС Аквилон × ♂ BW90	3,6	3,2	2,6	0,2	промежут.	-11,1
♀ КВС Аквилон × ♂ Иволга	3,6	3,6	3,7	-1,0	рецессивное	-2,7
♀ КВС Аквилон × ♂ АС Taber	3,6	4,3	2,9	3,0	гетерозис	19,4
♀ КВС Аквилон × ♂ Сударыня	3,6	3,4	2,9	0,4	промежут.	-5,6
♀ КВС Аквилон × ♂ Агата	3,6	3,8	3,3	2,3	гетерозис	5,6
♀ КВС Аквилон × ♂ Лада	3,6	3,4	3,0	0,3	промежут.	-5,6
♀ КВС Аквилон × ♂ Экада 66	3,6	3,5	2,5	0,8	доминир.	-2,8
♀ КВС Аквилон × ♂Тюменская 25	3,6	3,2	2,8	0,0	промежут.	-11,1
♀ КВС Аквилон × ♂ Симбирцит	3,6	3,3	2,6	0,4	промежут.	-8,3
♀ КВС Аквилон × ♂ АС Карма	3,6	4,0	3,2	3,0	гетерозис	11,1
♀Иволга × ♂ Тюменская 25	3,7	3,1	2,8	-0,3	промежут.	-16,2
♀Иволга× ♂КВС Аквилон	3,7	3,6	3,6	-1,0	рецессивное	-2,7
♀ Иволга × ♂ Линия МК №41	3,7	2,8	3,1	-2,0	депрессия	-24,3
♀ Иволга × ♂ АС Taber	3,7	3,3	2,9	0,0	промежут.	-10,8
♀ Иволга × ♂ АС Карма	3,7	3,8	3,2	1,4	гетерозис	2,7
♀ Иволга × ♂ BW90	3,7	2,8	2,6	-0,6	рецессивное	-24,3
♀ Иволга × ♂ Экада 66	3,7	3,4	2,5	0,5	промежут.	-8,1
♀ Иволга × ♂ Гранни	3,7	3,9	3,8	7,0	гетерозис	4,0

вания обнаружился примерно у половины комбинаций (56%). Остальные имели гетерозис или доминирование лучшего родителя (44%). Истинный гетерозис был отмечен в комбинациях на базе материнской формы Экада 66 с опылителями Тюменская 25, Симбирцит, Злата, на базе материнской формы Гранни с опылителями Лиза, Лада, Экада 66, на базе материнской формы КВС Аквилон с опылителями АС Taber, Агата, Лада, Экада 66, АС Карма. В случае с материн-

ской формой Иволга преобладающим характером наследования были промежуточное и рецессивное (63%). Это можно объяснить высокой озерненностью материнской формы, которую трудно превзойти. Только у гибрида F₁ с опылителем Гранни выявлен гетерозис.

Таким образом, из 45 изученных гибридов F₁ пшеницы мягкой яровой выявлено 17 комбинаций, имеющих степень фенотипического доминирования D выше 1 и положительные

значения истинного гетерозиса Гист. Эти комбинации нужно внимательно проработать на предмет выделения трансгрессивных форм в последующих гибридных поколениях.

Озерненность одного колоска показывает соответствие потенциальной продуктивности реальной. Чем выше данный показатель, тем лучше растение реализует свой потенциал, тем больше может быть зерен в колосе. Исходные сорта пшеницы различались по этому показателю. Колосья с наиболее озерненными колосками имели сорта Гранни, Иволга (3,7 шт.), КВС Аквилон (3,6 шт.). У остальных значе-

ния варьировали в пределах 2,5-3,4 шт. Характер наследования этого признака гибридами F_1 зависит от комбинации и варьирует от депрессии до гетерозиса (табл. 3). При этом прослеживается параллелизм характера наследования озерненности колоска с озерненностью колоса. В комбинациях на базе сорта Злата около половины гибридов F_1 имеют промежуточный характер наследования, и столько же – гетерозис (опылители МК№41, Сударыня, Симбирцит, МК №153). У комбинаций на базе сорта Экада 66 преобладает промежуточный характер наследования. Только с опы-

Таблица 4. Характер наследования массы зерен в главном колосе и наличие истинного гетерозиса у гибридов F_1 пшеницы мягкой яровой
Table 4. The nature of inheritance of grain weight in the main spike and the presence of true heterosis in F_1 hybrids of soft spring wheat

Гибридная комбинация	♀	F_1	♂	D	Характер наследования	Г ист., %
♀Злата × ♂ МК№41	1,8	3,0	2,1	7,0	гетерозис	42,9
♀ Злата × ♂ АС Карма	1,8	2,4	2,5	0,7	доминир.	-4,0
♀ Злата × ♂ КВС Аквилон	1,8	2,9	2,9	1,0	доминир.	0,0
♀ Злата × ♂ Экада 66	1,8	2,2	2,5	0,1	промежут.	-12,0
♀ Злата × ♂ BW 90	1,8	2,1	1,5	3,0	гетерозис	16,7
♀ Злата × ♂ Тюменская 25	1,8	2,1	2,0	2,0	гетерозис	5,0
♀ Злата × ♂ Сударыня	1,8	2,9	2,5	2,1	гетерозис	16,0
♀ Злата × ♂ Симбирцит	1,8	2,6	2,5	1,3	гетерозис	4,0
♀ Злата × ♂ МК №153	1,8	3,4	2,3	5,4	гетерозис	47,8
♀ Экада 66 × ♂ Тризо	2,5	2,6	2,6	3,0	гетерозис	2,0
♀ Экада 66 × ♂ Тюменская 25	2,5	2,5	2,0	1,0	доминир.	0,0
♀ Экада 66 × ♂ Лада	2,5	2,6	2,6	1,0	доминир.	0,0
♀ Экада 66 × ♂ Гранни	2,5	3,2	3,2	1,0	доминир.	0,0
♀ Экада 66 × ♂ КВС Аквилон	2,5	3,1	2,9	2,0	гетерозис	6,9
♀ Экада 66 × ♂ Иволга	2,5	2,7	2,8	0,3	промежут.	-3,6
♀ Экада 66 × ♂ Агата	2,5	2,5	2,4	1,0	доминир.	4,2
♀ Экада 66 × ♂ Симбирцит	2,5	3,1	2,6	23,0	гетерозис	21,6
♀ Экада 66 × ♂ Злата	2,5	2,6	1,8	1,3	гетерозис	4,0
♀ Гранни × ♂ Сударыня	3,2	2,2	2,5	-1,9	депрессия	-31,3
♀ Гранни × ♂ Лиза	3,2	3,7	2,5	2,4	гетерозис	15,6
♀ Гранни × ♂ Лада	3,2	3,9	2,6	3,3	гетерозис	21,9
♀ Гранни × ♂ Тризо	3,2	3,0	2,5	0,4	промежут.	-6,3
♀ Гранни × ♂ Симбирцит	3,2	3,0	2,5	0,4	промежут.	-6,3
♀ Гранни × ♂ Экада 66	3,2	3,5	2,5	1,9	гетерозис	9,4
♀ Гранни × ♂ Злата	3,2	2,9	1,8	0,6	доминир.	-9,4
♀ КВС Аквилон × ♂ Злата	2,9	2,6	1,8	0,5	промежут.	-10,3
♀ КВС Аквилон × ♂ Л. МК153	2,9	2,6	2,3	0,0	промежут.	-10,3
♀ КВС Аквилон × ♂ BW90	2,9	2,2	1,5	0,0	промежут.	-24,1
♀ КВС Аквилон × ♂ Иволга	2,9	2,8	2,8	-1,0	рецессивное	-3,4
♀ КВС Аквилон × ♂ АС Taber	2,9	3,6	2,4	3,8	гетерозис	24,1
♀ КВС Аквилон × ♂ Сударыня	2,9	3,0	2,5	1,5	гетерозис	3,4
♀ КВС Аквилон × ♂ Агата	2,9	3,4	2,4	3,0	гетерозис	17,2
♀ КВС Аквилон × ♂ Лада	2,9	3,3	2,6	3,7	гетерозис	13,8
♀ КВС Аквилон × ♂ Экада 66	2,9	3,4	2,5	3,5	гетерозис	17,2
♀ КВС Аквилон × ♂ Тюменская 25	2,9	2,5	2,0	0,1	промежут.	-13,8
♀ КВС Аквилон × ♂ Симбирцит	2,9	3,1	2,5	2,0	гетерозис	6,9
♀ КВС Аквилон × ♂ АС Карма	2,9	3,0	2,5	1,5	гетерозис	3,4
♀ Иволга × ♂ Тюменская 25	2,8	2,5	2,0	0,3	промежут.	-10,7
♀ Иволга × ♂ КВС Аквилон	2,8	2,8	2,9	-1,0	рецессивное	-3,4
♀ Иволга × ♂ Линия МК №41	2,8	2,4	2,1	-0,1	промежут.	-14,3
♀ Иволга × ♂ АС Taber	2,8	2,6	2,4	0,0	промежут.	-7,1
♀ Иволга × ♂ АС Карма	2,8	3,0	2,5	2,3	гетерозис	7,1
♀ Иволга × ♂ BW90	2,8	2,3	1,5	0,2	промежут.	-17,9
♀ Иволга × ♂ Экада 66	2,8	2,9	2,5	1,7	гетерозис	3,6
♀ Иволга × ♂ Гранни	2,8	3,3	3,2	1,5	гетерозис	3,1

лителями Симбирцит и Злата выявлен гетерозис. У комбинаций на базе сорта Гранни гетерозис отмечен с опылителями Лиза и Лада. У большинства гибридов F_1 на основе сорта КВС Аквилон выявлен промежуточный характер наследования, только в комбинациях с опылителями AC Taber, Агата и AC Карма наблюдался гетерозис. У гибридов на основе сорта Иволга гетерозис отмечен с опылителями AC Карма и Гранни. Эти комбинации могут представлять интерес для последующего выделения трансгрессивных форм с высокой озерненностью колоска.

Исходные сорта различались по массе зерен в главном колосе (табл. 4). Наиболее высокими значениями характеризовались сорта Гранни (3,2 г), КВС Аквилон (2,9 г), Иволга (2,8 г). Масса зерен остальных родительских форм варьировала в пределах 1,8-2,6 г. У гибридов F_1 преобладающим характером наследования этого признака оказался гетерозис совместно с доминированием признака лучшего родителя (67%). Причем наличие гетерозиса по массе зерна с колоса далеко не всегда совпадало с гетерозисом по числу зерен с колоса и озерненности колоска. Поэтому целесооб-

Таблица 5. Характер наследования массы 1000 зерен и наличие истинного гетерозиса у гибридов F_1 пшеницы мягкой яровой
Table 5. The nature of inheritance of 1000-grain weight and the presence of true heterosis in F_1 hybrids of soft spring wheat

Гибридная комбинация	♀	F_1	♂	D	Характер наследования	Г ист., %
♀ Злата × ♂ МKN№41	40,0	45,2	38,9	10,5	гетерозис	13,0
♀ Злата × ♂ AC Карма	40,0	46,1	45,2	1,3	гетерозис	2,0
♀ Злата × ♂ КВС Аквилон	40,0	46,1	42,7	3,5	гетерозис	8,0
♀ Злата × ♂ Экада 66	40,0	45,1	48,8	0,2	аддитивное	-7,6
♀ Злата × ♂ BW 90	40,0	46,5	40,2	64,0	гетерозис	15,7
♀ Злата × ♂ Тюменская 25	40,0	44,6	39,9	93,0	гетерозис	11,5
♀ Злата × ♂ Сударыня	40,0	50,1	43,5	4,8	гетерозис	15,2
♀ Злата × ♂ Симбирцит	40,0	48,0	46,8	1,4	гетерозис	2,6
♀ Злата × ♂ МК №153	40,0	50,4	44,9	3,2	гетерозис	12,2
♀ Экада 66 × ♂ Тризо	48,8	52,0	43,8	2,3	гетерозис	6,6
♀ Экада 66 × ♂ Тюменская 25	48,8	48,4	39,9	0,9	доминир.	-0,8
♀ Экада 66 × ♂ Лада	48,8	49,5	43,5	1,3	гетерозис	1,4
♀ Экада 66 × ♂ Гранни	48,8	48,9	44,6	1,0	доминир.	0,2
♀ Экада 66 × ♂ КВС Аквилон	48,8	49,4	42,7	1,2	гетерозис	1,2
♀ Экада 66 × ♂ Иволга	48,8	47,1	39,0	0,7	доминир.	-3,5
♀ Экада 66 × ♂ Агата	48,8	45,7	39,2	0,4	аддитивное	-6,4
♀ Экада 66 × ♂ Симбирцит	48,8	53,4	46,8	5,6	гетерозис	9,4
♀ Экада 66 × ♂ Злата	48,8	47,8	40,0	0,8	доминир.	-2,0
♀ Гранни × ♂ Сударыня	44,6	51,4	43,5	13,4	гетерозис	15,2
♀ Гранни × ♂ Лиза	44,6	44,7	41,2	1,1	гетерозис	0,2
♀ Гранни × ♂ Лада	44,6	48,0	43,5	7,2	гетерозис	7,6
♀ Гранни × ♂ Тризо	44,6	44,6	43,8	1,0	доминир.	0,0
♀ Гранни × ♂ Симбирцит	44,6	45,2	46,8	-0,5	рецессивное	-3,4
♀ Гранни × ♂ Экада 66	44,6	48,2	48,8	0,7	доминир.	-1,2
♀ Гранни × ♂ Злата	44,6	46,7	40,0	1,9	гетерозис	4,7
♀ КВС Аквилон × ♂ Злата	42,7	44,8	40,0	2,6	гетерозис	4,9
♀ КВС Аквилон × ♂ Л. МК153	42,7	45,0	44,9	1,1	гетерозис	0,2
♀ КВС Аквилон × ♂ BW90	42,7	38,8	40,2	-2,1	депрессия	-9,1
♀ КВС Аквилон × ♂ Иволга	42,7	41,5	39,0	0,4	аддитивное	-2,8
♀ КВС Аквилон × ♂ AC Taber	42,7	45,6	47,9	0,1	аддитивное	-4,8
♀ КВС Аквилон × ♂ Сударыня	42,7	47,1	43,5	10,0	гетерозис	8,3
♀ КВС Аквилон × ♂ Агата	42,7	46,7	39,2	3,3	гетерозис	9,4
♀ КВС Аквилон × ♂ Лада	42,7	48,6	43,5	13,8	гетерозис	11,7
♀ КВС Аквилон × ♂ Экада 66	42,7	49,5	48,8	1,2	гетерозис	1,4
♀ КВС Аквилон × ♂ Тюменская 25	42,7	43,4	39,9	1,5	гетерозис	1,6
♀ КВС Аквилон × ♂ Симбирцит	42,7	48,2	46,8	1,7	гетерозис	3,0
♀ КВС Аквилон × ♂ AC Карма	42,7	44,1	45,2	0,1	аддитивное	-2,4
♀ Иволга × ♂ Тюменская 25	39,0	43,9	39,9	9,9	гетерозис	10,0
♀ Иволга × ♂ КВС Аквилон	39,0	40,3	42,7	-0,3	аддитивное	-5,6
♀ Иволга × ♂ Линия МК №41	39	47,3	38,9	167,0	гетерозис	21,3
♀ Иволга × ♂ AC Taber	39	47	47,9	0,8	доминир.	-1,9
♀ Иволга × ♂ AC Карма	39	45,1	45,2	1,0	доминир.	-0,2
♀ Иволга × ♂ BW90	39	44,3	40,2	7,8	гетерозис	10,2
♀ Иволга × ♂ Экада 66	39	44,8	48,8	0,2	аддитивное	-8,2
♀ Иволга × ♂ Гранни	39	44,5	44,6	1,0	доминир.	-0,2

Таблица 6. Гибридные комбинации с D выше 1 и наличием истинного гетерозиса в F₁ по признакам числа и массы зерен в главном колосе, озерненности колоска и массе 1000 зерен
Table 6. Hybrid combinations with D above 1 and the presence of true heterosis in F₁ for the traits of number and weight of grains in the main spike, grain content of the spikelet and weight of 1000 grains

Материнская форма	Опылители, при которых проявляется гетерозис по признакам:				
	число зерен в колосе	число зерен в колоске	масса зерен в колосе	масса 1000 зерен	одновременно по большинству признаков
Злата	МК№41, BW90, Сударыня, Симбирцит, МК №153	МК№41, Сударыня, Симбирцит, МК №153	МК№41, BW90, Тюменская 25, Сударыня, Симбирцит, МК №153	МК№41, AC Karma, KBC Аквилон, BW90, Тюменская 25, Сударыня, Симбирцит, МК №153	МК№41, Сударыня, Симбирцит, МК №153
Экада 66	Тюменская 25 Симбирцит, Злата	Симбирцит, Злата	Тризо, KBC Аквилон, Симбирцит, Злата	Тризо, Лада, Гранни, KBC Аквилон, Симбирцит	Симбирцит, Злата
Гранни	Лиза, Лада, Экада 66	Лиза, Лада	Лиза, Лада, Экада 66	Сударыня, Лиза, Лада, Злата	Лиза, Лада
KBC Аквилон	AC Taber, Агата, Лада, Экада 66, AC Karma	AC Taber, Агата, AC Karma	AC Taber, Сударыня, Агата, Лада, Экада 66, Симбирцит, AC Karma	Злата, Сударыня, Агата, Лада, Экада 66, Тюменская 25, Симбирцит,	AC Taber, Агата, AC Karma
Иволга	Гранни	Гранни, AC Karma	AC Karma, Экада 66, Гранни	Тюменская 25, МК№41, BW90	Гранни

разно выделить гибриды F₁, имеющие гетерозис сразу по нескольким количественным признакам, чтобы в последующих поколениях отобрать формы с соответствующими трансгрессиями (табл. 6).

Однако не стоит пренебрегать гибридными комбинациями, у которых проявился гетерозис только для признака масса зерен в главном колосе. Данный элемент структуры урожая наиболее тесно связан с итоговой урожайностью, поэтому отбор перспективных форм только по массе зерна с колоса также допустим. В комбинациях на базе сорта Злата гетерозис проявился с опылителями МК№41, BW90, Тюменская 25, Сударыня, Симбирцит и МК №153. Для материнского сорта Экада 66 наилучшими опылителями оказались Тризо, KBC Аквилон, Симбирцит и Злата. У гибридов F₁ на базе сорта Гранни гетерозис проявился с опылителями Лиза, Лада и Экада 66. Для гибридов F₁ с сортом KBC Аквилон наиболее перспективные комбинации получены с опылителями AC Taber, Сударыня, Агата, Лада, Экада 66, Симбирцит и AC Karma. Гетерозис по массе зерна с колоса у гибридов F₁ на базе сорта Иволга проявился только с опылителями AC Karma, Экада 66, и Гранни.

Характер наследования массы 1000 зерен гибридами F₁ мягкой пшеницы практически совпадает с наследованием массы зерен в главном колосе. Причем по массе 1000 зерен преобладающим характером наследования является гетерозис и доминирование (80% гибридов). Похожие результаты получены исследователями Ростовского аграрного научного центра при изучении озимой пшеницы. Коллеги сообщают, что большинство изученных комбинаций (до 55%) проявляли гетерозис по данному признаку [8]. Исследователи Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий отмечают широкое варьирование наследования данного признака гибридами F₁ – от депрессии до сверхдоминирования [20]. Гибридные комбинации с проявлением истинного гетерозиса представлены в таблице 6.

В таблице 6 представлены итоги анализа характера наследования элементов структуры урожая мягкой яровой пшеницы. Было выявлено, что по массе зерен с главного колоса и массе 1000 зерен количество комбинаций с проявлением истинного гетерозиса у гибридов F₁ было максимальным в 2022 г. Поскольку этот год был благоприятным для роста и развития яровой пшеницы, то можно предполагать проявление всех потенциальных возможностей гибридов. Выявлены комбинации, в которых гетерозис проявился по большинству количественных признаков, тесно связанных с урожайностью. Эти комбинации следует тщательно прорабатывать в дальнейших поколениях для получения трансгрессивных высокоурожайных и высокоадаптивных линий яровой пшеницы для условий ЦРНЗ.

Заключение

По результатам анализа характера наследования количественных признаков, связанных с продуктивностью, установлено, что примерно половина гибридных комбинаций проявляют гетерозис по числу зерен в главном колосе (около 60%), около 30% комбинаций проявляют гетерозис по числу зерен в колоске, свыше 60% – по массе зерен с главного колоса и около 80% – по массе 1000 зерен. Это служит косвенным доказательством эффективности метода индексов для подбора пар для скрещиваний.

Были выделены комбинации с проявлением истинного гетерозиса по комплексу количественных признаков. Для материнской формы Злата наилучшие комбинации получены с опылителями МК№41, Сударыня, Симбирцит и МК №153; для Экада 66 – Симбирцит, Злата; для Гранни – Лиза, Лада; для KBC Аквилон – AC Taber, Агата, AC Karma; для Иволга – Гранни. Очевидно, они обладают высокой комбинационной способностью.

• Литература

1. Наджодов Б.Б., Рубец В.С., Пыльнев В.В., Ворончихина И.Н. Влияние метеорологических условий на формирование хозяйственно-полезных признаков яровой пшеницы в условиях ЦРНЗ. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2023; (7): 47-64. DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-6-47-64>.
2. Кадушкина В.П., Грабовец А.И. Наследование элементов продуктивности у гибридов F₁ яровой твердой пшеницы и возможность прогноза их перспективности. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019; (77): 54-56.
3. Нettekвич Э.Д. Избранные труды. Селекция и семеноводство яровых зерновых культур. М.: Немчиновка, 2008. 348 с.
4. Туктарова Н.Г., Торбина И.В. Проявление гетерозиса озимой пшеницы в гибридном питомнике первого года. *Владимирский земледелец*. 2016; 3(77): 35-37.
5. Крохмаль А.В., Грабовец А.И., Гординская Е.А. Особенности трансгрессивной изменчивости и формообразования при селекции тритикале на продуктивность. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021; (4):17-22. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500262721040049>.
6. Савченко В.К. генетический анализ в сетевых пробных скрещиваниях. – Минск.: «Наука и техника», 1984. 223 с.
7. Мельникова Т.Б., Мельников Р.В. Наследование количественных признаков образцами озимой мягкой пшеницы в условиях Республики Беларусь. *Земледелие и селекция в Беларуси*. 2022. (58): 324-330.
8. Фоменко М. А., Грабовец А. И., Мельникова О. В. Наследование хозяйственно ценных признаков гибридами мягкой озимой пшеницы в степной зоне Ростовской области. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2016; 4(60): 17-20.
9. Выюшков А.А. Селекция яровой пшеницы в Среднем Поволжье. Самара, 2004. 223 с.
10. Давыдова Н.В., Казаченко О.А., Широколава А.В. Исходный материал для селекции яровой мягкой пшеницы на урожайность и устойчивость к стрессовым факторам внешней среды в условиях Центрального Нечерноземья. *Аграрная Россия*. 2021; (9):9-13. DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2021-9-9-13>.
11. Калинин И.Г. Оценить гибриды пшеницы на урожай и качество зерна в первых поколениях. *Селекция и семеноводство*. 1964; (2): 38-41.
12. Коновалова И.В., Богдан П.М., Клыков А.Г. Сравнительный анализ гибридов F₁ яровой мягкой пшеницы при реципрокных скрещиваниях. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2019; 2(50): 39-44. DOI: <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-12018>.
13. Кузьмин Н.А., Гладышева О.В., Григораш О.С. Эффект гетерозиса как показатель селекционной ценности исходного материала. *Вестник РГАУ*. 2009; (4): 26-29.
14. Ворончихин В.В., Пыльнев В.В., Рубец В.С., Ворончихина И.Н. Использование метода индексов при комплексной оценке генетической коллекции тритикале. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019; (7): 92-100.
15. Griffing B.A. Concert of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Austral. J. Biol. Sci.* 1956. (9):463-493.
16. Омаров Д.С. К методике оценки гетерозиса у растений. *Сельскохозяйственная биология*. 1975; 10 (1):123-127.
17. Валежанин В.С., Коробейников Н.И. Изменчивость и характер наследования числа зерен колоса гибридами F₁ мягкой яровой пшеницы в условиях Приобской лесостепи Алтайского края. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020; №3(185): 23-29.
18. Шиндин И. М. Наследование количественных признаков гибридами мягкой яровой пшеницы в условиях Дальнего Востока *Вестник КрасГАУ*. 2008; № 46: 66-70
19. Цильке Р. А. Генетика, цитогенетика и селекция растений. Собрание научных трудов. Новосибирск: НГАУ, 2003. 620 с.
20. Валежанин В.С., Коробейников Н.И. Изменчивость и характер наследования массы 1000 зерен в диаллельных скрещиваниях пшеницы мягкой яровой. *Достижения науки и техники АПК*. 2019; Т.33 (3):42-44. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10310

Об авторах:

Ирина Николаевна Ворончихина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела отдаленной гибридизации ГБС РАН, <https://orcid.org/0000-0002-0639-2709>, SPIN-код: 9967-5608, автор для переписки, voronchikhinayarinka@yandex.ru

Данила Андреевич Щелканов – инженер-исследователь отдела отдаленной гибридизации ГБС РАН, SPIN-код: 2514-4139, danila.shelkanov@yandex.ru

Валентина Сергеевна Рубец – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела отдаленной гибридизации ГБС РАН, Ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной геномики и частной селекции сельскохозяйственных растений ВНИИСБ, <https://orcid.org/0000-0003-1870-7242>, SPIN-код: 8963-2357, Valentina.rubets50@gmail.com

Виктор Викторович Ворончихин – кандидат с.-х. наук, научный сотрудник отдела отдаленной гибридизации ГБС РАН, <https://orcid.org/0000-0002-5763-0877>, SPIN-код: 3735-2160, vitya.voronchihin@gmail.com

• References

1. Nadzhodov B.B., Rubets V.S., Pylnev V.V., Voronchikhin I.N. The influence of meteorological conditions on the formation of economically useful traits of spring wheat in the conditions of the Central Russian Agricultural Zone. *Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy*. 2023; (7): 47-64. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-6-47-64>.
2. Kadushkina V.P., Grabovets A.I. Inheritance of productivity elements in F₁ hybrids of spring durum wheat and the possibility of predicting their prospects. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2019; (77): 54-56. (In Russ.)
3. Netteklich E.D. Selected works. Breeding and seed production of spring grain crops. Moscow: Nemchinovka, 2008. 348 p. (In Russ.)
4. Tuktarova N.G., Torbina I.V. Manifestation of winter wheat heterosis in the first-year hybrid nursery. *Vladimirsky Zemledelets*. 2016; 3(77): 35-37. (In Russ.)
5. Krokhmal A.V., Grabovets A.I., Gordinskaya E.A. Features of transgressive variability and morphogenesis in triticales breeding for productivity. *Russian Agricultural Science*. 2021; (4):17-22. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500262721040049>.
6. Savchenko V.K. genetic analysis in network trial crosses. – Minsk.: "Science and Technology", 1984. 223 p. (In Russ.)
7. Melnikova TV, Melnikov RV Inheritance of quantitative traits by winter soft wheat samples in the conditions of the Republic of Belarus. *Agriculture and breeding in Belarus*. 2022. (58): 324-330. (In Russ.)
8. Fomenko MA, Grabovets AI, Melnikova OV Inheritance of economically valuable traits by soft winter wheat hybrids in the steppe zone of the Rostov region. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2016; 4(60): 17-20. (In Russ.)
9. Vyushkov AA Breeding of spring wheat in the Middle Volga region. *Samara*. 2004. 223 p.
10. Davydova NV, Kazachenko OA, Shirokolava AV Source material for breeding spring soft wheat for yield and resistance to stress factors of the external environment in the conditions of the Central Non-Black Earth Region. *Agrarian Russia*. 2021; (9):9-13. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2021-9-9-13>.
11. Kalinenko I.G. Evaluate wheat hybrids for yield and grain quality in the first generations. *Breeding and Seed Production*. 1964; (2): 38-41. (In Russ.)
12. Konovalova I.V., Bogdan P.M., Klykov A.G. Comparative analysis of F₁ hybrids of spring soft wheat in reciprocal crossings. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2019; 2(50): 39-44. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/1999-6837-2019-12018>.
13. Kuzmin N.A., Gladysheva O.V., Grigorash O.S. Heterosis effect as an indicator of the selection value of the source material. *RSATU Bulletin*. 2009; (4): 26-29. (In Russ.)
14. Voronchikhin V.V., Pylnev V.V., Rubets V.S., Voronchikhina I.N. Using the index method in a comprehensive assessment of the triticales genetic collection. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2019; (7): 92-100. (In Russ.)
15. Griffing B.A. Concert of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Austral. J. Biol. Sci.* 1956. (9):463-493.
16. Omarov D.S. On the methodology of heterosis assessment in plants. *Agricultural biology*. 1975; 10 (1):123-127. (In Russ.)
17. Valekzhanin V.S., Korobeynikov N.I. Variability and inheritance pattern of the number of grains per ear in F₁ hybrids of soft spring wheat under the conditions of the Ob forest-steppe of Altai Krai. *Bulletin of Altai State Agrarian University*. 2020; No. 3 (185): 23-29. (In Russ.)
18. Shindin I.M. Inheritance of quantitative traits in soft spring wheat hybrids under the conditions of the Far East *Bulletin of KrasSAU*. 2008; No. 46: 66-70. (In Russ.)
19. Tsilke R.A. Genetics, cytogenetics and plant breeding. Collection of scientific papers. Novosibirsk: NGAU, 2003. 620 p. (In Russ.)
20. Valekzhanin V.S., Korobeynikov N.I. Variability and inheritance patterns of 1000-grain weight in diallelic crosses of spring soft wheat. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2019; Vol. 33, (3): 42-44. (In Russ.) DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10310

About the Authors:

Irina N. Voronchikhina – Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Department of Distant Hybridization, Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-0639-2709>, SPIN-code: 9967-5608, Corresponding Author, voronchikhinayarinka@yandex.ru

Danila A. Shchelkanov – Research Engineer, Department of Distant Hybridization, Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, SPIN-code: 2514-4139, danila.shelkanov@yandex.ru

Valentina S. Rubets – Dr. Sci. (Biology), Professor, Leading Researcher, Department of Distant Hybridization, Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Applied Genomics and Private Breeding of Agricultural Plants, All-Russian Research Institute of Plant Breeding, <https://orcid.org/0000-0003-1870-7242>, SPIN-code: 8963-2357, Valentina.rubets50@gmail.com

Viktor V. Voronchikhin – Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, Department of Distant Hybridization of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-5763-0877>, SPIN-code: 3735-2160, vitya.voronchihin@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-194-201>
УДК: 633.18:631.531:581.111

Т.Л. Коротенко^{1*}, Л.В. Есаулова¹,
Е.Е. Чичарова¹, П.В. Будунова^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр риса» 350921, Россия, Краснодар, пос. Белозерный, 3

²ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» 350044, Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13

*Автор для переписки: korotenko.tatyan@mail.ru

Финансирование. Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2025-574, по проекту НЦМУ «Центр современной селекции сельскохозяйственных растений».

Вклад авторов: Коротенко Т.Л.: концептуализация, методология, верификация данных, формальный анализ, администрирование данных, создание черновика рукописи. Есаулова Л.В.: концептуализация, методология, создание рукописи и ее редактирование. Чичарова Е.Е.: проведение исследования. Будунова П.В.: проведение исследования, верификация данных, формальный анализ. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Коротенко Т.Л., Есаулова Л.В., Чичарова Е.Е., Будунова П.В. Оценка влияния водного режима на ростовые процессы семян сортов *Oryza sativa* subsp. *japonica* Kato для оптимизации выращивания риса по безгербицидной технологии. Овощи России. 2025;(6):194-201.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-194-201>

Поступила в редакцию: 01.10.2025

Принята к печати: 19.11.2025

Опубликована: 18.12.2025

Tatyana L. Korotenko^{1*}, Lyubov V. Esaulova¹,
Evgeniya E. Chicharova¹, Polina V. Budunova^{1,2}

¹Federal State Budgetary Scientific Institution, Federal Scientific Rice Centre Belozerny, 3, Krasnodar, Russian Federation, 350921

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin 13, Kalinina St., Krasnodar, Russian Federation, 350044

*Correspondence Author: korotenko.tatyan@mail.ru

Funding. The article was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. 075-15-2025-574, under the project "Center for Modern Plant Breeding".

Authors' Contribution: Korotenko T.L.: conceptualization, methodology, validation, formal analysis, data curation, writing – original draft. Esaulova L.V.: conceptualization, methodology, writing – review & editing. Chicharova E.E.: investigation, resources. Budunova P.V.: investigation, validation, formal analysis. All authors have read and approved the final manuscript

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation: Korotenko T.L., Esaulova L.V., Chicharova E.E., Budunova P.V. Evaluation of the effect of water regime on the growth processes of *Oryza sativa* subsp. *japonica* Kato seeds for optimizing rice cultivation using herbicide-free technology. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):194-201. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-194-201>

Received: 01.10.2025

Accepted for publication: 19.11.2025

Published: 18.12.2025

Оценка влияния водного режима на ростовые процессы семян сортов *Oryza sativa* subsp. *japonica* Kato для оптимизации выращивания риса по безгербицидной технологии

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Наряду со всхожестью, способность проростков риса преодолевать слой воды для формирования оптимальной густоты всходов и хорошего урожая имеет основополагающее значение. Рис является гидрофитом, на Кубани его выращивают с применением технологии затопления слоем воды для повышения экологичности отрасли рисоводства и сокращения применения гербицидов. Полевая всхожесть семян существенно ниже лабораторной, что связывают с сортовыми особенностями в физиологии их прорастания и морфологическими параметрами проростков для преодоления слоя затопленной почвы. Актуальным является выяснение особенностей сортов риса по толерантности к затоплению в фазу всходов. Цель исследований: оценить особенности морфологических параметров проростков сортов риса в условиях увлажнения и затопления, скорость прироста на начальной стадии и интенсивность роста растений в течение всей вегетации риса для оптимизации подходов при возделывании.

Материалы и методы. Исследования проведены на базе группы УНУ (уникальная научная установка) «Федерального научного центра риса», с привлечением в эксперимент 15 сортов из Биоресурсной коллекции риса. Лабораторные опыты по оценке жизнеспособности семян и интенсивности роста проростков были заложены в двух вариантах: в 10 см слое воды в стеклянных сосудах и на увлажнении в чашках Петри при одинаковом температурном режиме. Выращивание растений этих же сортов в полевых условиях на орошаемом участке проводили согласно общепринятым методикам и технологии выращивания риса в Краснодарском крае.

Результаты. Анализ полученных данных показал, при выращивании риса следует учитывать реакцию сортов на режим орошения и интенсивность роста в начальной фазе прорастания. Практически у всех сортов затопление слоем воды приводило к уменьшению длины проростка и главного зародышевого корешка. В среднем за 14 суток по сортам отмечено отставание в росте шильца у семян риса под слоем воды на 2,36 см, а корешка на 6,72 см по сравнению с вариантом на увлажнении. Однако у ряда сортов проростки успешно преодолевали слой воды, процент таковых составлял 80-100 у сортов: Авангард, Кубань 3, Яхонт и Стромбус; более 50 % – у сортов: Виктория, Арал 22, Каурус, Форсаж и Лидер. В полевых условиях высокая скорость прироста длины стебля в сутки за весь период вегетации отмечена у высокорослых сортов: Кубань 3, Авангард, Маржан и Стромбус (0,89-1,01 см/сут.). Зафиксировано, что самая низкая скорость прорастания семян в 10 см слое воды наблюдалась у сортов Маржан, Флагман, Полус-5 и Юниор.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

рис, сорт, водный режим, динамика прорастания семян, морфология проростков

Evaluation of the effect of water regime on the growth processes of *Oryza sativa* subsp. *japonica* Kato seeds for optimizing rice cultivation using herbicide-free technology

ABSTRACT

Relevance. Along with germination, the ability of rice seedlings to overcome a layer of water in order to form an optimal density of seedlings and a good harvest is of fundamental importance. Rice is a hydrophite, and in the Kuban region, it is grown using the technology of flooding with a layer of water to improve the environmental friendliness of the rice industry and reduce the use of herbicides. The field germination of seeds is significantly lower than the laboratory germination, which is associated with the varietal characteristics of their germination physiology and the morphological parameters of the seedlings to overcome the layer of flooded soil. It is important to determine the tolerance of rice varieties to flooding during the germination phase.

Purpose of research. To evaluate the features of morphological parameters of rice varieties seedlings under conditions of humidification and flooding, the rate of growth at the initial stage and the intensity of plant growth throughout the rice vegetation for the optimization of approaches in cultivation.

Materials and Methods. The research was conducted on the basis of the USU (Unique Scientific Unit) group of the Federal Scientific Rice Center, with the involvement of 15 varieties from the Rice Bioresource Collection in the experiment. Laboratory experiments on assessing the viability of seeds and the growth intensity of seedlings were conducted in two variants: in a 10 cm layer of water in glass containers and on moistening in Petri dishes at the same temperature. The cultivation of these same varieties in a field on an irrigated plot was carried out according to the generally accepted methods and technologies of rice cultivation in the Krasnodar Territory.

Results. The analysis of the obtained data showed that when growing rice, it is necessary to take into account the reaction of the varieties to the irrigation regime and the intensity of growth in the initial germination phase. In almost all varieties, flooding with a layer of water led to a decrease in the length of the seedling and the main embryonic root. On average, over a period of 14 days, the growth of the rice seedling under a layer of water was 2.36 cm shorter and the root was 6.72 cm shorter compared to the moistened variant. However, in a number of varieties, the seedlings successfully overcame the water layer, the percentage of such was 80-100 for varieties: Avangard, Kuban 3, Yakhont and Strombus; more than 50% for varieties: Victoria, Aral 22, Kauris, Fast and Furious and Leader. In the field, a high rate of increase in stem length per day over the entire growing season was observed in tall varieties: Kuban 3, Avangard, Marzhan and Strombus (0.89-1.01 cm/day). It was recorded that the lowest seed germination rate in a 10 cm layer of water was observed in the Marzhan, Flagman, Polus-5, and Junior varieties.

KEYWORDS:

rice, variety, water regime, seed germination dynamics, seedling morphology



Введение

Рис – единственная в мире культура, полностью обеспеченная почвенной влагой, однако урожайность риса по странам и регионам колеблется в широких пределах от 2-3 до 10 т/га. Необходимость увеличения производства риса заставляет ученых всего мира изучать ограничительные факторы биологического потенциала культуры, в числе которых рассматривают климатические стрессоры, засоление почв, избыток или дефицит воды. Отрицательное воздействие неблагоприятных факторов может быть снижено в результате морфобиотипного разнообразия сортов риса, способного обеспечивать высокую и стабильную продуктивность в различных условиях выращивания [1].

Многообразие культурных форм риса выращивают в мире в различных гидрологических условиях, таких как орошаемые, затопляемые, богарные равнины, высокогорье, возвышенности и пойменные экосистемы [2]. Селекция культуры и ее адаптация к различным средам привели к многочисленным сортам риса, при этом для развития современной селекции на адаптивность ученые рекомендуют уделять больше внимания зародышевой плазме со специфическими физиологическими характеристиками и созданием промежуточных исходных форм. В селекционных программах Китая, Бразилии и Филиппин был разработан новый класс адаптированных к высокогорным условиям аэробных сортов с улучшенной устойчивостью к полеганию, индексом урожая и отзывчивостью. Главной особенностью, отличающей аэробные сорта риса от других, является их способность сохранять высокое производство биомассы и индекс урожая как в благоприятных, так и в стрессовых условиях горной местности [3]. Изучение 692 местных сортов из базовой коллекции зародышевой плазмы риса в Китае показало, что дифференциация между почвенно-водянистыми экотипами у подвида *japonica* более четкая, чем *subsp indica*. Позднеспелые сорта риса подвида индика чаще культивируют рассадным способом, выращивая на террасах под небольшим слоем воды [4, 5].

Ученые из Международного института риса (IRRI, Филиппины) отмечают, что недостаток пресной воды – это надвигающийся кризис и сокращение ее потребления с помощью аэробной системы производства риса, в отличие от традиционной системы орошаемых низменностей, позволит смягчить потенциальный дефицит водных ресурсов. Во всем мире 70% забора воды используется в орошаемом земледелии [6]. Водный режим в течение вегетационного периода сильно влияет на рост растений риса, взаимосвязан с урожайностью и качеством риса [7]. Наряду с внесением удобрений управление водными ресурсами позиционируется как важный метод для контроля роста растений. В нынешней ситуации масштабного увеличения площади рисовых полей поточное (непрерывное) затопление затруднено, поскольку требует большого количества поливной воды. Yuji Matsue (2021) отмечает, что прерывистое орошение в период созревания риса негативно влияет на степень налива зерна и его качество, чем при затоплении, что вероятно связано с поддержанием активности корней в период созревания [8]. При этом у ученых нет единого мнения о том, как влажность почвы и режим орошения влияют на физиологию риса, налив зерна и урожайность. Это связано со сложным местным климатом и агротехническими схемами земледелия в рисопроизводящих странах. Чтобы справиться с растущей нехваткой пресных водных ресурсов, в систе-

мах выращивания риса внедряют водосберегающее прерывистое орошение [9].

Прямой посев риса связан с периодическим затоплением, однако сорта по-разному переносят длительное затопление. В некоторых рисопроизводящих регионах урожай страдает от наводнений, когда рис погружается под воду на срок более 10 дней. Риск заключается в снижении числа всхожих семян и преодолевших слой воды, что приводит к потере урожая. Созревающий рис может переносить полное погружение в воду в течении 3-7 суток, а затем отмечается гибель растений. Как отмечает Макунду Аларик (2005), генофонд устойчивых к погружению сортов риса скуден, поэтому для достижения успеха необходим поиск новых доноров, толерантных к переувлажнению. Уже на ранней стадии роста по величине coleoptilia можно прогнозировать способность к росту проростков в фазу всходов. Высокие темпы роста проростков у риса обеспечивают лучшую полевую всхожесть, создавая оптимальную густоту стояния растений [10]. Известно, что низкокислородный стресс замедляет прорастание семян, задерживает приживаемость, а иногда и приводит к гибели проростков риса прямого посева. Однако у толерантных генотипов выживаемость выше, их семена имеют более высокую активность амилазы, анаэробное дыхание и экспрессию гена *RAmy3D*, при проращивании сохраняют способность использовать накопленные запасы крахмала [11].

Традиционная технология возделывания риса на юге России предусматривает проведение гербицидных обработок для борьбы с просовидными сорняками в рисовых чеках. На сегодняшний день от сельхозпроизводителей требуются не только эффективные производственные показатели, но и высокая экологическая составляющая. В технологии безгербицидного рисоводства применяется режим постоянного затопления рисового поля, когда слой воды поддерживается без сбросов от сева до созревания риса. Многие отечественные сорта риса адаптированы к такой технологии возделывания [12,13]. Постоянный режим орошения наиболее простой и распространенный, но у него есть ряд недостатков: нерациональный перерасход воды, полегание риса, изреживаемость посевов и удлинение срока вегетации.

Другим вариантом режима орошения для безгербицидного рисоводства, как способа борьбы с просьянками, предусматривается залив поля после посева риса слоем 10-15 см с последующим сбросом через 5-6 дней (укороченный режим орошения) [14]. После появления всходов риса поле заливается водой слоем, превышающим высоту просьянок на 5-7 см, а для избегания изреживания посевов высокий горизонт воды не рекомендуется держать более 10 дней. На практике же рекомендации по подавлению сорняков за счет управления уровнем воды без наличия средств автоматизации водораспределения являются сложно выполнимыми [15].

Ученые из Международного института риса на Филиппинах также изучали влияние показателей роста и развития растений риса различных сортов на их конкурентоспособность по отношению к сорнякам. Выявлено, что относительная скорость роста (см/сут.) и биомасса (г/сут.) растений риса в фазу кущения определяли их конкурентоспособность к злаковым сорнякам [16]. В своих экспериментах А.М. Ismail и другие (2007, 2018) наблюдали, что генотипы различались по всхожести на переувлажненной почве. Большая способность к поглощению воды, благодаря физиологической и морфологической адаптации побегов и корней, приводили к хорошей продуктивности биомассы в этих условиях [17,18]. Подольских А.Н. (2008) в своих публикациях отмечает, что

количественные полигенные признаки, зависящие от ряда морфологических и физиологических свойств растительного организма, могут существенно изменяться в различных условиях выращивания [19].

Важными показателями качества семян являются всхожесть семян и интенсивность роста проростков, их способность пробиваться на поверхность почвы [20]. Особого внимания на этапе прорастания заслуживает формирование coleoptиле у проростков риса, способных развиваться в условиях недостатка кислорода. Отмечено наличие положительной корреляции между длиной coleoptиля при нормоксии и гипоксии ($r=0,70$, $p=10^{-6}$), то есть формы, активно растущие в аэробной среде, быстро росли и при затоплении [21].

Таким образом, следует заключить, что высокая интенсивность роста на ранней стадии развития растений, а затем замедленный набор высоты и формирование биомассы растения, достаточной для хорошей фотосинтетической способности, оптимальная высота растения для устойчивости к полеганию и технологичности – интегрированная модель для получения высоких урожаев риса.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись семена 15 сортов риса из Биоресурсной коллекции ФНЦ риса урожая 2024 года. Предмет исследования – всхожесть семян, показатели роста: интенсивность роста, параметры проростков и корешков; водный режим. Стандарты: холодостойкий сорт отечественной селекции – Кубань 3, быстрорастущий сорт казахстанской селекции – Маржан.

Исследования проводили на базе «Федерального научно-го центра риса». Лабораторные и полевые испытания проводили в группе УНУ «Коллекция генетических ресурсов риса». В лабораторном опыте созданы 2 варианта среды для проращивания семян: в чашках Петри на увлажненной фильтровальной бумаге и в стеклянных сосудах заливали 10 см слоем воды. Выполненные семена каждого сорта закладывали по 35 штук в трех повторностях, процент проросших семян учитывали на 7 день. Выдерживали температурный режим в термостате – 20...23°C. Параметры проростков измеряли на 5, 7 и 14 сутки: длину coleoptиля, высоту шильца, длину главного зародышевого корешка (см) и подсчитывали количество мезокотильных корней (шт.). Скорость прироста оценивали в течение 14 дней (см/сут.) расчетным путем [22].

Одновременно набор сортов в 2025 году высевали по принятой технологии рисоводства Краснодарского края в идентичных климатических и агротехнических условиях полевого опыта на искусственно орошаемом участке коллекционного питомника «ФНЦ риса» (г. Краснодар, Россия). Испытания проводили на делянках площадью 1 м² в двукратной повторности методом прямого ручного посева семян и с нормой посева 400 семян на делянку. Сроки посева, фенологические наблюдения, измерения высоты растений и площади листьев осуществлялись в соответствии с биологическими особенностями культуры [22]. Скорость прироста растения за весь период вегетации рассчитывали путем деления средней высоты 10 растений с делянки на продолжительность вегетационного периода сорта. Обработку данных проводили в программе Microsoft Office Excel 2016.

Измеряли физиологические параметры листьев в фазу перехода растений из вегетативной стадии в генеративную, характеризующие фотосинтез: показатель NDVI – нормализованный вегетационный индекс, оптимизированный индекс растительности с учетом почвы OSAVI с применением

Портативного измерителя флуоресценции хлорофилла и ФАР (PAR-FluorPen FP 110, PSI, Чехия) на зрелых листьях 10 растений каждого сорта в делянках полевого опыта.

Результаты и обсуждение

Коллекции зерновых культур являются основой продовольственной безопасности и служат богатым исходным материалом для селекционных работ. Сорта риса мировой селекции риса для прямого посева различаются по морфотипу растений, ростовым характеристикам, чувствительности к температуре и освещенности, урожайности [23]. Из Биоресурсной коллекции УНУ ФНЦ риса (г. Краснодар), которая насчитывает более 7,5 тыс. образцов из 43 стран, в эксперимент были взяты 15 сортов риса подвиды *Oryza sativa* L. subsp. *jarollica*, которые одновременно изучали в полевых и лабораторных опытах.

Сравнительный анализ биологических, биометрических и физиологических параметров растений проводили на 12 кубанских сортах риса разных периодов селекции – Кубань 3, Виктория, Каурис, Лидер, Флагман, Азовский, Яхонт, Полюс 5, Фрегат, Стромбус, Форсаж, Юниор; 2-х казахстанских холодостойких сортах – Арал 22 и Маржан; а также сорте из Узбекистана – Авангард, который считается стандартом стрессоустойчивости.

Выбранные в эксперимент сорта риса различались по группам спелости, типу зерновки и массе 1000 зерен, высоте растений. Фенотипическое и генетическое несходство сортов позволило объективно оценить динамику ростовых процессов семян на разных уровнях влагообеспеченности. Длительность вегетационного периода у исследуемых сортов – в пределах от раннеспелых (100 суток) до позднеспелых (124 суток), варибельность по высоте растений от низкорослых (78 см) до высокорослых (113 см) (табл.1). Существенные различия отмечены между сортами по крупности зерна, варибельность от 23,6 г до 41,4 г. Самое мелкое зерно наблюдали у раннеспелого сорта Азовский, а крупное у сортов Форсаж и Стромбус.

Индекс NDVI, как интегральный показатель развития растительности на поле, позволяет оценить формирование густоты растений и достаточность влаги и питательных элементов, в период перехода из вегетативной фазы в репродуктивную оптимальный показатель должен составлять 0,50-0,85. У позднеспелых форм этот показатель выше, ввиду более длительного фотосинтетического потенциала их растений. Вегетационный индекс OSAVI позволяет оценить жизнеспособность растительного покрова, минимизирующий влияние фона, используется для оценки темпов прироста биомассы, что является важным показателем благополучия растений. Представленные в таблице 1 данные тестирования флуоресценции свидетельствуют, что в полевых условиях растения на делянках у исследуемых сортов физиологически полноценные, соответственно расчетный показатель прироста можно считать достоверным. Расчет прироста длины стебля в сутки за весь период вегетации показал, что низкие темпы прироста характерны сортам Каурис, Полюс-5, Яхонт, Фрегат и Юниор (0,70-0,75 см/сут.). Высокая скорость прироста отмечена у высокорослых сортов: Кубань 3, Авангард, Маржан и Стромбус (0,89-1,01 см/сут.).

Усредненные результаты оценки морфометрических параметров проростков при выращивании семян на увлажнении показаны на рисунке 1, под 10 см слоем воды – на рисунке 2.

Таблица 1. Характеристика сортов риса, выращенных в полевом опыте: биометрические и физиологические показатели растений, 2025 год
Table 1. Characteristics of rice varieties grown in the field experiment: biometric and physiological indicators of plants, 2025

Наименование сорта	Период вегетации, суток	Высота растений, см	Прирост биомассы растения по дням вегетации, см/сут.	Масса 1000 зерен, г	Площадь флагового листа, см ²	Индекс NDVI	Индекс OSAVI
	<i>min-max</i>	<i>min-max</i>	<i>min-max</i>	<i>min-max</i>	$\bar{X}_{\text{ср}} \pm S\bar{X}_{\text{ср}}$	$\bar{X}_{\text{ср}}$	$\bar{X}_{\text{ср}}$
Виктория	114±2	96-98	0,84-0,85	26,4-28,0	15,25±0,21	0,605	0,720
Авангард	116±2	102-113	0,88-0,93	31,6-33,5	32,61±0,17	0,665	0,731
Арал 22	100±2	82-97	0,79-0,91	32,6-33,1	25,97±0,24	0,583	0,696
Маржан	109±1	97-104	0,89-0,94	32,4-34,1	33,50±0,16	0,615	0,704
Каурис	120±2	78-86	0,66-0,71	27,6-28,4	19,63±0,15	0,703	0,731
Кубань 3	103±4	98-110	0,95-1,01	28,6-29,7	20,84±0,12	0,635	0,712
Флагман	115±2	86-97	0,76-0,84	25,8-26,7	25,10±0,26	0,619	0,692
Яхонт	120±2	85-92	0,73-0,76	30,8-32,0	20,26±0,18	0,637	0,699
Полюс - 5	122±2	84-90	0,70-0,73	27,8-28,7	30,91±0,12	0,691	0,741
Фрегат	118±4	83-89	0,72-0,74	26,6-28,0	26,11±0,14	0,620	0,695
Стромбус	115±3	95-107	0,84-0,91	40,5-41,4	23,50±0,16	0,657	0,723
Лидер	120±2	92-99	0,78-0,81	28,7-29,2	25,38±0,16	0,682	0,738
Азовский	108±2	83-90	0,77-0,81	23,6-24,8	19,74±0,16	0,646	0,705
Форсаж	118±2	91-102	0,79-0,85	37,5-38,0	16,12±0,22	0,691	0,741
Юниор	115±3	83-89	0,74-0,75	29,3-31,0	20,31±0,15	0,606	0,646
НСР ₀₅	2,1				2,51	0,018	0,015

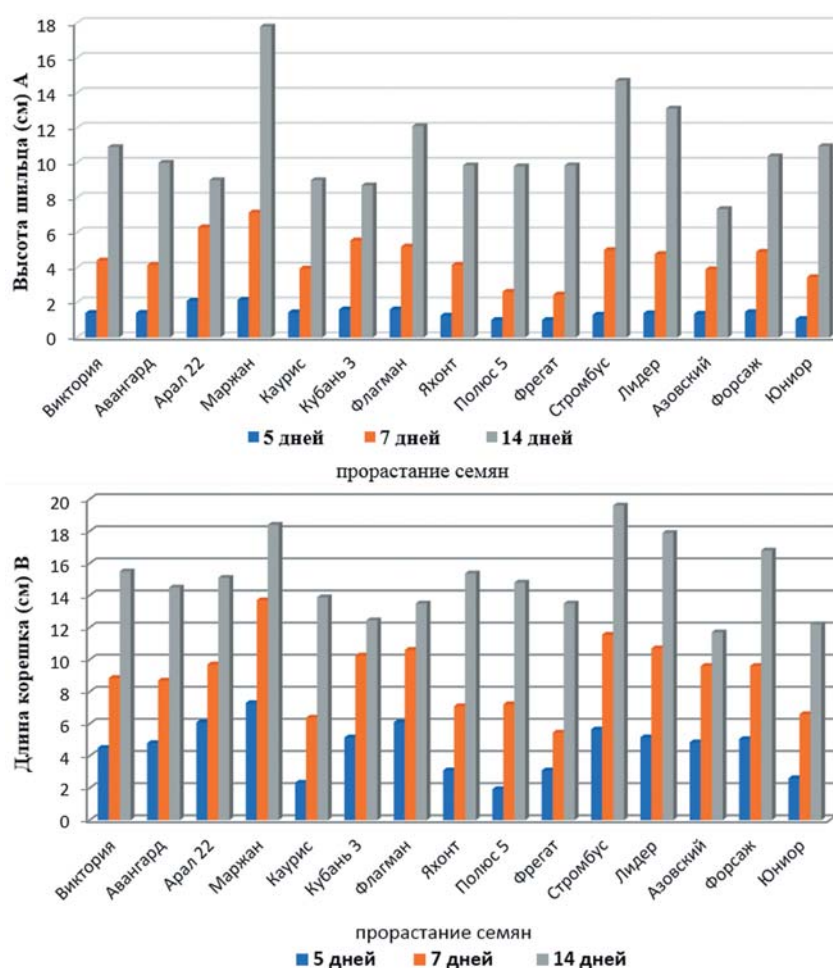


Рис. 1. Оценка параметров проростков у сортов риса по дням прорастания на увлажнении, (А) - шильце; (В) - зачаточного корешка

Fig. 1. Evaluation of seedling parameters in rice varieties by days of germination under moistening, (A) - stilet; (B) - rudimentary root

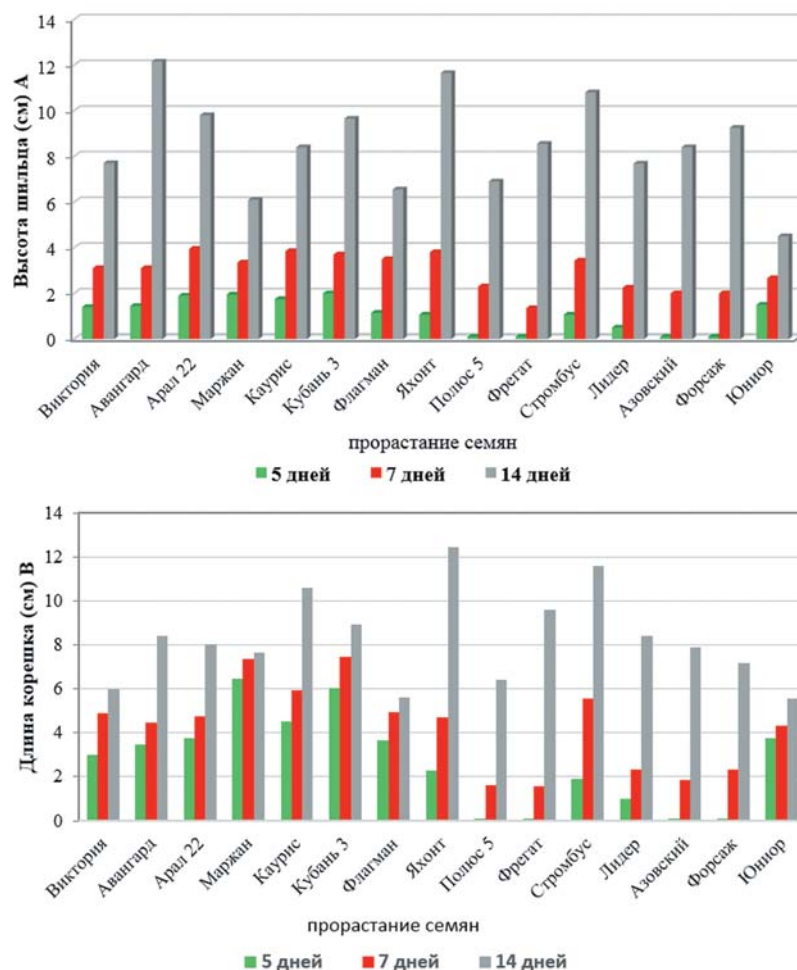


Рис. 2. Оценка параметров проростков у сортов риса по дням прорастания под слоем воды 10 см, (А) - шильце; (В) - зачаточного корешка

Fig. 2. Evaluation of seedling parameters in rice varieties by days of germination under a 10 cm layer of water, (A) - stilet; (B) - rudimentary root

Таблица 2. Динамика прорастания семян сортов риса и лабораторная всхожесть семян
Table 2. Dynamics of seed germination of rice varieties and laboratory seed germination

Наименование сорта	Скорость прироста шильца, см/сут.						Всхожесть семян, %	
	на увлажнении			под слоем воды			на увлажнении	под слоем воды
	5 сутки	7 сутки	14 сутки	5 сутки	7 сутки	14 сутки		
Виктория	0,28	0,63	0,77	0,28	0,44	0,55	100	99
Авангард	0,28	0,59	0,71	0,29	0,44	0,86	100	100
Арал 22	0,42	0,90	0,64	0,38	0,56	0,70	98	99
Маржан	0,43	1,02	1,27	0,39	0,48	0,43	100	98
Каурис	0,28	0,56	0,64	0,35	0,55	0,60	94	90
Кубань 3	0,32	0,79	0,62	0,40	0,52	0,68	100	99
Флагман	0,32	0,74	0,86	0,23	0,50	0,46	98	97
Яхонт	0,25	0,59	0,70	0,21	0,54	0,83	100	99
Полюс 5	0,20	0,37	0,70	0,02	0,32	0,49	94	90
Фрегат	0,20	0,35	0,70	0,02	0,19	0,61	98	98
Стромбус	0,26	0,71	1,05	0,21	0,49	0,77	100	95
Лидер	0,27	0,68	0,93	0,10	0,32	0,54	90	82
Азовский	0,27	0,55	0,53	0,02	0,28	0,61	96	90
Форсаж	0,29	0,70	0,74	0,02	0,28	0,66	95	80
Юниор	0,21	0,49	0,78	0,30	0,38	0,32	93	90
Среднее	0,28	0,63	0,77	0,21	0,42	0,61	97,06	93,86

Анализ данных влияния водного режима на ростовые процессы семян при проращивании в течение 14 дней позволил выявить сортовые морфометрические особенности не только по высоте шильца и длине корешка, но и скорости их прироста. При проращивании семян на увлажнении самые лучшие параметры шильца у сортов Маржан, Флагман, Стромбус и Лидер, а размеры зачаточного корешка – у сортов Маржан, Стромбус, Лидер и Форсаж. Уступал по параметрам проростков на увлажнении сорт Азовский. Вариативность размеров проростков по сортам высокая, о чем свидетельствует коэффициент вариации (CV, %) от 15 до 45%.

В варианте с затоплением семян слоем воды лучшие параметры шильца у сортов Аванград, Арал 22, Кубань 3, Яхонт, Стромбус и Форсаж, а размеры зачаточного корешка у сортов риса Каурис, Яхонт, Фрегат и Стромбус. Отставание по параметрам проростков при затоплении отмечено у сортов Виктория, Флагман, Маржан, Юниор и Полюс 5.

Сравнительный анализ морфологических данных проростков показал лучшую степень развития всходов в варианте с увлажнением семян. В среднем за 14 суток по сортам отмечено отставание в росте шильца у семян риса под слоем воды на 2,36 см, а корешка – на 6,72 см по сравнению с вариантом на увлажнении. Скорость прироста высоты шильца на увлажнении была выше в среднем по сортам на 0,16 см/сут. (табл.2).

Выявлены генотипические особенности ряда сортов по толерантности к затоплению. В условиях гипоксии у ряда протестированных сортов всхожесть семян не значительно снижалась, при этом сорта риса различались силой роста за временной период. Высокие темпы первоначального роста (первые 5 суток) под слоем воды отмечены у сортов Арал 22, Маржан, Каурис и Кубань 3. У сортов Авангард, Яхонт и Стромбус динамика прироста всходов повышается с 7 суток. Самую низкую скорость прорастания при создании слоя

воды наблюдали у сортов Маржан, Флагман, Полюс-5 и Юниор. При этом на увлажнении темпы первоначального роста высокие у сортов Маржан, Флагман, Стромбус и Лидер, а низкие у сортов Каурис, Полюс-5, Фрегат, Азовский.

У каждого исследуемого сорта экспериментально был определен процент проростков, преодолевших 10 см слой воды. Самые высокие показатели (80-100%) у сортов: Аванград, Кубань 3, Яхонт и Стромбус; более 50 % проростков преодолели слой воды у сортов: Виктория, Арал 22, Каурис, Форсаж и Лидер. Медленные темпы первоначального роста не позволили всем проросткам ряда сортов преодолеть слой воды, менее 50 % - у сортов Маржан, Флагман, Полюс-5, Фрегат, Азовский и Юниор. Таким образом, удалось уточнить, что длительное затопление не желательно применять при возделывании перечисленных сортов риса. Для таких сортов применителен режим орошения, когда всходы получают при увлажнительных поливах или сбрасывают слой воды в начале наклевывания семян, что обеспечивает интенсивное прорастание.

Особенности формирования зародышевых корешков у семян исследуемых сортов при разной влагообеспеченности оценивали также по скорости прироста (табл.3).

Результаты опыта свидетельствуют, что при затоплении семян в условиях слабой обеспеченности кислородом происходит подавление роста не только coleoptилей, но и корешков. Скорость удлинения корешка в условиях гипоксии тормозится почти в 2 раза: на увлажнении показатель – 1,07 см/сут. на 14 день, а под слоем воды – 0,58 см/сут. Однако у сортов Маржан, Каурис и Кубань 3 в таких условиях начальные темпы прироста корешка не снижаются. Рост зародышевого корешка не зависимо от режима увлажнения усиливается на 7 сутки. У сорта Каурис – медленно растущие корешки на увлажнении и быстрорастущие при слое воды. Самые низкие темпы удлинения корешка в обоих вариантах отмечены у сортов Полюс-5 и Юниор, а у сортов Стромбус, Лидер и Форсаж

Таблица 3. Скорость прироста зачаточного корешка (см/сут.) и количество побочных корешков (шт.)
Table 3. Growth rate of the embryonic root (cm/day) and number of side roots (pcs.)

Наименование сорта	На увлажнении			Количество побочных корешков на 14 день	Под слоем воды			Количество побочных корешков на 14 день
	5 сутки	7 сутки	14 сутки		5 сутки	7 сутки	14 сутки	
Виктория	0,90	1,26	1,10	6,4	0,60	0,70	0,43	4,4
Авангард	0,96	1,24	1,04	6,3	0,69	0,63	0,60	6,2
Арал 22	1,22	1,38	1,07	6,3	0,75	0,67	0,47	4,5
Маржан	1,46	1,95	1,31	6,3	1,29	1,05	0,54	2,5
Каурис	0,47	0,91	0,99	6,0	0,90	0,85	0,76	3,5
Кубань 3	1,03	1,46	0,89	5,6	1,21	1,06	0,64	5,1
Флагман	1,22	1,51	0,96	6,1	0,73	0,71	0,42	4,6
Яхонт	0,60	1,01	1,09	6,9	0,45	0,67	0,88	5,5
Полюс 5	0,38	1,03	1,05	6,1	0,10	0,23	0,45	4,7
Фрегат	0,60	0,78	0,96	6,0	0,10	0,22	0,68	4,0
Стромбус	1,13	1,65	1,40	5,4	0,38	0,79	0,83	4,6
Лидер	1,03	1,53	1,28	6,0	0,20	0,33	0,60	5,1
Азовский	0,97	1,37	0,83	6,1	0,10	0,26	0,56	4,1
Форсаж	1,01	1,92	1,20	6,0	0,10	0,33	0,51	4,0
Юниор	0,52	0,94	0,87	6,0	0,75	0,61	0,40	3,5
Среднее	0,9	1,33	1,07	6,1	0,56	0,61	0,58	4,4

самые интенсивно растущие корешки в условиях увлажненного полива. В среднем количество вторичных корешков на увлажнении у семян исследуемых сортов формировалось на 1,7 шт. больше, чем при затоплении, что вероятно объясняется необходимостью усилить поглощение воды для роста coleoptилей. Для сортов риса с быстрорастущим зародышевым корешком характерно формирование меньшего числа придаточных корешков. Как отмечает В.А. Масливец (2014), «при произрастании риса на затопленной почве слоем воды 10-15 см корней образуется мало и молодые растения риса до образования двух настоящих листьев усваивает воду и минеральные элементы пищи через главный корень» [24]. Отсюда можно заключить, что для увеличения числа придаточных корней и мощному их развитию, способствующих устойчивости и продуктивности растений, следует создавать на стадии получения всходов кратковременный водный дефицит путем сброса воды.

Заключение

Эксперимент показал, что слой воды и создание условий гипоксии при получении всходов приводит к снижению параметров проростков и корешков. Скорость удлинения корешка в условиях гипоксии тормозится почти в 2 раза: на увлажнении показатель – 1,07 см/сут. на 14 день, а под слоем воды – 0,58 см/сут. При этом у сорта Каурис – мед-

ленно растущие корешки на увлажнении и быстрорастущие при слое воды.

В работе продемонстрировано, что сорта различаются интенсивностью роста не только на стадии прорастания, но и в течение всего периода вегетации. Низкие темпы прироста высоты растений за весь период вегетации характерны сортам Каурис, Полус-5, Яхонт, Фрегат и Юниор (0,70-0,75 см/сут.). Медленные темпы первоначального роста не позволили всем проросткам преодолеть слой воды, менее 50% – у сортов Маржан, Флагман, Полус-5, Фрегат, Азовский и Юниор, такие сорта рекомендуется выращивать по технологии укороченного затопления.

Высокие темпы роста проростков сортов обеспечат лучшую полевую всхожесть и оптимальную густоту стояния растений. Быстрорастущими за весь период вегетации являются сорта Кубань 3, Авангард, Маржан и Стромбус (0,89-1,01 см/сут.). Однако на стадии прорастания семян без затопления лучшие показатели у сортов Маржан, Флагман, Стромбус и Лидер, а при затоплении у сортов Авангард, Арал 22, Кубань 3, Яхонт, Стромбус и Форсаж. Выявленные толерантные к затоплению формы с высокими темпами начального роста проростков для лучшего сохранения всходов и рекомендованы для выращивания по безгербицидной технологии. Информация о реакции сортов риса на водный режим полезна как для производственных посевов, так и при отборе исходных форм для селекции новых сортов.

• Литература

1. Wang Xing, Jing Zhen-Huan, He Cong, Liu Qiu-Yue, Jia Hao, Qi Jian-Ying, Zhang Hai-Lin. Breeding rice varieties provides an effective approach to improve productivity and yield sensitivity to climate resources. *European Journal of Agronomy*. 2021;124:126239. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126239>
2. Nayar N.M. Chapter 1 - Rice in the World: Origin and Phylogeny of Rices. Academic Press. 2014;1-14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417177-0.00001-2>
3. Atlin G.N., Lafitte H.R., Tao D., Laza M., Amante M., Courtois B. Developing Rice Cultivars for High-Fertility Upland Systems in the Asian Tropics. *Field Crops Research*. 2006;97:43-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2005.08.014>
4. Zhang J., Zhao J., Zhou Q., Ma Y., Zhao X., Zhao P., Chen The G. The agronomic performance of sand rice (*Agriophyllum squarrosum*), a potential semi-arid crop species. *Genet Resour Crop Evol*. 2018;65:2293–2301. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0689-3>
5. Zeng Y.W., Zhang H.L., Li, Z.C., Shen S.Q., Sun J.L., Wang, M.X. Evaluation of genetic diversity in the rice landraces (*Oryza sativa* L.) in Yunnan, China. *Breeding Science*. 2007;57:91–99. doi:10.1270/jsbbs.57.91
6. Atlin G.N., Laza M., Amante M., Lafitte H.R. Agronomic performance of tropical aerobic, irrigated, and traditional upland rice varieties in three hydrological environments. *International Rice Research Institute, Metro, Philippines, DAPO*. 7777. 2004. www.regional.org.au/au/asa/2004/poster/1/2/1259_atlina.htm?print=1 (access, 01.12.2009)
7. Pay A.Г., Бакирова А.Ш. Влияние температуры слоя воды рисовых чеков на урожайность риса. *Рисоводство*. 2019;2(43):48-51. <https://elibrary.ru/zenovw>
8. Yuji Matsue, Katsuya Takasaki, Jun Abe. Water Management for Improvement of Rice Yield, Appearance Quality and Palatability with High Temperature During Ripening Period. *Rice Science*. 2021;28(4):409-416. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.05.011>
9. Le Chen Lin Guo, Xueyun Deng, Tao Luo, Hongxia Duan, Xinbiao Chen, Xueming Tan, Hui Gao Yongjun Zeng. Canopy humidity and irrigation regimes interactively affect rice physiology, grain filling and yield during grain filling period. *Agricultural Water Management*. 2025;307:109143. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109143>
10. Макунду Аларик. Прорастание семян и развитие растений различных сортов риса в зависимости от глубины затопления. Краснодар, 2005. 21 с.
11. Ismail A.M., Ella E.S., Vergara G.V., Mackill D.J. Mechanisms associated with tolerance to flooding during germination and early seedling growth in rice (*Oryza sativa*). *Annals of Botany*. 2009;103(2):197–209. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn211>
12. Зеленский Г.Л. Рис: биологические основы селекции и агротехники. Краснодар, 2016. 238 с.
13. Гаркуша С.В., Есаулова Л.В. Адаптивная стратегия рисоводства в условиях изменяющегося климата. В сборнике: Современное состояние и инновационные пути развития мелиорации и орошаемого земледелия. Материалы III Международной научно-практической конференции. Дагестанский ГУ: Махачкала, 2024. С. 20-25. <https://elibrary.ru/alemji> <https://doi.org/10.25691/a6727-0217-8781-g>
14. Попов В.А., Островский Н.В. Агроклиматология и гидравлика рисовых экосистем. Монография. Краснодар, 2013. 189 с.
15. Балакай Г.Т., Докучаева Л.М., Юркова Р.Е. К вопросу разработки норм водопотребности риса и водоотведения с рисовых оросительных систем. *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2018;3(31):1-22. <https://elibrary.ru/xwarkp> <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2018-3-1-22>
16. Moody N.H.K., Robles R.P., Paller E.C. Jr, Lales J.S. *Oryza sativa* traits conferring competitive ability against weeds. *Weed Sci*. 2000;48:200-204. <https://www.jstor.org/stable/4046255>
17. Ismail A.M. Submergence tolerance in rice: resolving a pervasive quandary. *New Phytologist*. 2018;218(4):1298-1300. <https://doi.org/10.1111/nph.15188>
18. Ismail A.M., Ella E.S., Vergara G.V., Mackill D.J. Mechanisms related to tolerance to flooding during germination and early growth of rice seedlings (*Oryza sativa*). *Ann Bot*. 2007;103:197-209. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn211>
19. Подольских А.Н., Сагиндыкова А.С. Устойчивость местных и стародавних сортов риса к абиотическим стрессам на ранних стадиях развития растений. *Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана*. 2008;7:9-11.
20. Шиловский В.Н., Рубан В.Я. Изучение признаков проростков у риса. В сборнике: Материалы IX международного симпозиума «Нетрадиционное растениеводство. Эниология. Экология и здо-

ровье". 2000. С. 542. <https://elibrary.ru/ndqsoe>

21. Богданова Е.М., Бертова А.Д., Кирпичникова А.А., Бикташева М.О., Кондратьева А.В., Шапиро А.С., Пузанский Р.К., Коротенко Т.Л., Мухина Ж.М., Емельянов В.В., Шишова М.Ф. Показатели роста и устойчивости к дефициту кислорода у coleoptiles *Oryza sativa* L. из коллекции ФНЦ риса. Сельскохозяйственная биология. 2023;58(3):538-553. (In Russ.) <https://elibrary.ru/xozzkm>
22. Standard Evaluation System for rice. INGER-IRRI. 1996. 52 p.
23. Коротенко Т.Л., Чухирь И.Н., Хорина Т.А., Петрухненко А.А. Генетическое разнообразие коллекции риса и аспекты его использования в почвенно-климатических условиях Кубанской зоны рисосеяния. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017;66:131-137. <https://elibrary.ru/zdperz>
<https://doi.org/10.21515/1999-1703-66-131-137>
24. Масливец В.А., Герасименко В. Н., Макаренко С. А. Рисоводство: методические указания. Краснодар, 2014. 68 с.

References

1. Wang Xing, Jing Zhen-Huan, He Cong, Liu Qiu-Yue, Jia Hao, Qi Jian-Ying, Zhang Hai-Lin. Breeding rice varieties provides an effective approach to improve productivity and yield sensitivity to climate resources. European Journal of Agronomy. 2021;124:126239. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126239>
2. Nayar N.M. Chapter 1 - Rice in the World: Origin and Phylogeny of Rices. Academic Press. 2014;1-14.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417177-0.00001-2>
3. Atlin G.N., Lafitte H.R., Tao D., Laza M., Amante M., Courtois B. Developing Rice Cultivars for High-Fertility Upland Systems in the Asian Tropics. Field Crops Research. 2006;97:43-52.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2005.08.014>
4. Zhang J., Zhao J., Zhou Q. Ma Y., Zhao X., Zhao P., ChenThe G. The agronomic performance of sand rice (*Agriophyllum squarrosum*), a potential semi-arid crop species. Genet Resour Crop Evol. 2018;65:2293-2301. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0689-3>
5. Zeng Y.W., Zhang H.L., Li, Z.C., Shen S.Q., Sun J.L., Wang, M.X. Evaluation of genetic diversity in the rice landraces (*Oryza sativa* L.) in Yunnan, China. Breeding Science. 2007;57:91-99. doi:10.1270/jsbbs.57.91
6. Atlin G.N., Laza M., Amante M., Lafitte H.R. Agronomic performance of tropical aerobic, irrigated, and traditional upland rice varieties in three hydrological environments. International Rice Research Institute, Metro, Philippines, DAPO. 7777. 2004.
http://www.regional.org.au/au/asa/2004/poster/1/2/1259_atlina.htm?print=1 (access, 01.12.2009)
7. Rau A.G., Bakirova A.Sh. Influence of the temperature of the water layer of rice paddy fields on rice yield. Rice growing. 2019;2(43):48-51 <https://elibrary.ru/zenovw> (In Russ.)
8. Yuji Matsue, Katsuya Takasaki, Jun Abe. Water Management for Improvement of Rice Yield, Appearance Quality and Palatability with High Temperature During Ripening Period. Rice Science. 2021;28(4):409-416. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.05.011>
9. Le Chen Lin Guo, Xueyun Deng, Tao Luo, Hongxia Duan, Xinbiao Chen, Xueming Tan, Hui Gao Yongjun Zeng. Canopy humidity and irrigation regimes interactively affect rice physiology, grain filling and yield during grain filling period. Agricultural Water Management. 2025;307:109143. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109143>

10. Makundu Alarik. Seed germination and plant development of various rice varieties depending on the depth of flooding. Krasnodar, 2005. 21 p. (In Russ.)

11. Ismail A.M., Ella E.S., Vergara G.V., Mackill D.J. Mechanisms associated with tolerance to flooding during germination and early seedling growth in rice (*Oryza sativa*). Annals of Botany. 2009;103(2):197-209. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn211>
12. Zelensky G.L. Rice: Biological Foundations of Breeding and Agricultural Techniques: A Monograph. Krasnodar, 2016. 237 p. (In Russ.)
13. Garkusha S.V., Esaulova L.V. Adaptive strategy of rice growing in the conditions of a changing climate. In the collection: The current state and innovative ways of development of land reclamation and irrigated agriculture. Materials of the III International scientific and practical conference. Dagestan State University: Makhachkala. 2024. P. 20-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.25691/a6727-0217-8781-g>
<https://elibrary.ru/alemji>
14. Popov V.A., Ostrovsky N.V. Agroclimatology and Hydraulics of Rice Ecosystems. Krasnodar, 2013. 189 p. (In Russ.)
15. Balakai G.T., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E. On the Development of Rice Water Requirements and Drainage from Rice Irrigation Systems. Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2018;3(31):1-22. (In Russ.)
<https://doi.org/10.31774/2222-1816-2018-3-1-22>
<https://elibrary.ru/xwarkp>
16. Moody N.H.K, Robles R.P., Paller E.C. Jr, Lales J.S. *Oryza sativa* traits conferring competitive ability against weeds. Weed Sci. 2000;48:200-204. <https://www.jstor.org/stable/4046255>
17. Ismail A.M. Submergence tolerance in rice: resolving a pervasive quandary. New Phytologist. 2018;218(4):1298-1300.
<https://doi.org/10.1111/nph.15188>
18. Ismail A.M., Ella E.S., Vergara G.V., Mackill D.J. Mechanisms related to tolerance to flooding during germination and early growth of rice seedlings (*Oryza sativa*). Ann Bot. 2007;103:197-209.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcn211>
19. Podolskikh A.N., Sagindykova A.S. Resistance of local and ancient rice varieties to abiotic stresses at early stages of plant development. Bulletin of Agricultural Science of Kazakhstan. 2008;7:9-11. (In Russ.)
20. Shilovsky V.N., Ruban V.Ya. Study of the characteristics of rice seedlings. In the collection: Materials of the IX International Symposium "Non-traditional Plant Growing. Enology. Ecology and Health". 2000. P. 542. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ndqsoe>
21. Bogdanova E.M., Bertova A.D., Kirpichnikova A.A., Biktasheva M.O., Kondratyeva A.V., Shapiro A.S., Puzansky R.K., Korotenko T.L., Mukhina Zh.M., Emelyanov V.V., Shishova M.F. Growth and Oxygen Deficiency Resistance of *Oryza sativa* L. Coleoptiles from the Rice Research Center Collection. Agricultural Biology. 2023;58(3):538-553. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2023.3.538rus>
<https://elibrary.ru/xozzkm>
22. Standard Evaluation System for rice. INGER-IRRI. 1996. 52 p.
23. Korotenko T.L., Chukhir I.N., Khorina T.A., Petrukhnenko A.A. Genetic diversity of the rice collection and aspects of its use in the soil and climatic conditions of the Kuban rice-growing zone. Proceedings of the Kuban State Agrarian University. 2017;66:131-137. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21515/1999-1703-66-131-137>
<https://elibrary.ru/zdperz>
24. Maslivets V.A., Gerasimenko V.N., Makarenko S.A. Rice Growing: Methodological Guidelines. Krasnodar: KubSAU. 2014. 68 p. (In Russ.)

Об авторах:

Татьяна Леонидовна Коротенко – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-3831-4879>,
SPIN-код: 1215-7119,
автор для переписки: korotenko.tatyan@mail.ru
Любовь Владимировна Есаулова – кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе,
<https://orcid.org/0000-0002-0907-2524>,
SPIN-код: 9335-1160, l.esaulova@mail.ru
Евгения Евгеньевна Чичарова – младший научный сотрудник,
SPIN-код: 5062-7123, negrevskaya.zhenichka@mail.ru
Полина Владимировна Будунова – магистрант, лаборант-исследователь, SPIN-код: 2218-5075, budda-5@mail.ru

About the Authors:

Tatyana L. Korotenko – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher,
<https://orcid.org/0000-0002-3831-4879>,
SPIN-code: 1215-7119, Corresponding Author, korotenko.tatyan@mail.ru
Lyubov V. Esaulova – Cand. Sci. (Biology), Deputy Director for Research,
<https://orcid.org/0000-0002-0907-2524>,
SPIN-code: 9335-1160, l.esaulova@mail.ru
Evgeniya E. Chicharova – Junior Researcher of the Laboratory, SPIN-code: 5062-7123, negrevskaya.zhenichka@mail.ru
Polina V. Budunova – Master's student, Laboratory Research Assistant,
SPIN-code: 2218-5075, budda-5@mail.ru

Краткое сообщение / Short communication

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-202-207>
УДК: 635.24-021.66:664.143

М.В. Осипов¹, С.Л. Белецкий¹, Е.В. Казанцев^{1*},
А.Е. Баженова¹, Ф.Б. Мусаев²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности – филиал Федерального государственного бюджетного научно-го учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
107023, Россия, г. Москва, ул. Электровзводская, 20

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства»
143080, Россия, Московская обл., Одинцовский городской округ, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, 14

*Автор для переписки: conditerprom_lab@mail.ru

Вклад авторов: Белецкий С.Л.: руководство исследованием. Казанцев Е.В.: проведение исследования. Осипов М.В.: администрирование данных. Баженова А.Е.: создание рукописи и её редактирование. Мусаев Ф.Б.: формальный анализ, методология.

Конфликт интересов. Мусаев Ф.Б. является членом редакционной коллегии журнала «Овощи России» с 2019 года, но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Для цитирования: Осипов М.В., Белецкий С.Л., Казанцев Е.В., Баженова А.Е., Мусаев Ф.Б. Влияние различного содержания продукции топинамбура на процессы влагопереноса кондитерских изделий. *Овощи России*. 2025;(6):202-207.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-202-207>

Поступила в редакцию: 27.10.2025

Принята к печати: 05.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Maxim V. Osipov¹, Sergey L. Beletsky¹,
Egor V. Kazantsev^{1*}, Alla E. Bazhenova¹,
Farkhad B. Musaev²

¹All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry – Branch of V.M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS
20, Elektrovzvodskaya st., Moscow, 107023, Russia

²Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Vegetable Center»
14, Selektionnaya st., Odintsovskiy gorodskoy okrug, VNIISOK, Moscow region, 143080, Russia

* Corresponding Author: conditerprom_lab@mail.ru

Authors' Contribution: Beletsky S.L.: supervision. Osipov M.V.: data curation. E.V. Kazantsev: investigation. Bazhenova A.E.: writing – original draft, writing – review & editing. Musaev F.B.: formal analysis, methodology.

Conflict of interest. Musaev F.B. has been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia" since 2019, but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

For citation: Osipov M.V., Beletsky S.L., Kazantsev E.V., Bazhenova A.E., Musaev F.B. The influence of different Jerusalem artichoke content on the moisture transfer processes in confectionery products. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):202-207. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-202-207>

Received: 27.10.2025

Accepted for publication: 05.12.2025

Published: 18.12.2025

Влияние различного содержания продукции топинамбура на процессы влагопереноса кондитерских изделий

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Овощи являются незаменимыми продуктами для здорового питания человека и являются основными поставщиками углеводов, витаминов, антиоксидантов, минеральных солей и др. компонентов. Важнейшим свойством овощей является их способность повышать усвояемость белков, жиров и углеводов, поэтому одним из перспективных направлений в питании является обогащение различных продуктов овощными и фруктовыми порошками. В последнее время в кондитерские изделия часто добавляют овощное сырье или овощные порошки. Авторами показано влияние порошка топинамбура сорта Омский белый на процессы влагопереноса кондитерских изделий пенообразной структуры.

Материал и методика. Исследовали различное содержание клубней топинамбура на изучение процессов влагопереноса кондитерских изделий пенообразной структуры. Изготовлены модельные образцы пастилы с различным добавлением измельченного порошка топинамбура сорта Омский белый и контрольный образец без порошка топинамбура. В работе применяли физико-химические, структурно-механические методы исследования. Органолептические характеристики пастилы оценивали по ГОСТ 6441-2014, массовая доля влаги определена по ГОСТ 5900 – 2014, активность воды определена по ГОСТ ISO 21807-2015. Прочность образцов определена использованием прибора «Структурометр СТ-2» (Россия) с индентором «Валента», согласно инструкции к прибору.

Результаты. Установлено, что добавление порошка топинамбура оказывает существенное влияние на скорость процессов влагопереноса при хранении пастилы. Наибольшие потери влаги по истечении 3 месяцев хранения установлены для контрольного образца, наименьшие потери влаги – у образца с 2% порошка топинамбура. Добавление порошка топинамбура позволяет уменьшить скорость влагопереноса в 1,5-2,0 раза, что влияет на срок годности пастильных изделий. Активность воды образцов кондитерских изделий пенообразной структуры с добавлением порошка топинамбура составляет 0,762-0,720, что указывает на удержание влаги порошком топинамбура и сохраняет мягкую, нежную консистенцию образцов с 2% порошка топинамбура, но требует дополнительного контроля микробиологических показателей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

кондитерские изделия, пастила, сорт топинамбура, качественные характеристики, влагоперенос

Check for updates



The influence of different Jerusalem artichoke content on the moisture transfer processes in confectionery products

ABSTRACT

Relevance. Vegetables are essential for a healthy human diet and are the main sources of carbohydrates, vitamins, antioxidants, minerals, and other components. A key property of vegetables is their ability to enhance the digestibility of proteins, fats, and carbohydrates, making enriching various products with vegetable and fruit powders a promising approach in nutrition. Vegetable raw materials or vegetable powders are often added to confectionery products recently. The authors demonstrated the effect of Omsky belyy Jerusalem artichoke powder on the moisture transfer processes in foam-like confectionery products.

Materials and Methods. We studied various Jerusalem artichoke tuber contents to investigate moisture transfer processes in foam-like confectionery products. Model pastille samples were prepared with varying amounts of ground Jerusalem artichoke powder Omsky belyy and a control sample without Jerusalem artichoke powder. Physicochemical and structural-mechanical methods were used. The organoleptic characteristics of the pastille were assessed according to GOST 6441-2014, moisture content was determined according to GOST 5900-2014, and water activity was determined according to GOST ISO 21807-2015. The strength of the samples was determined using a Structurometer ST-2 (Russia) with a Valenta indenter, according to the device instructions.

Results. It was found that the addition of Jerusalem artichoke powder significantly affects the rate of moisture transfer processes during pastille storage. The highest moisture loss after 3 months of storage was observed for the control sample, while the lowest moisture loss was observed for the sample containing 2% Jerusalem artichoke powder. Adding Jerusalem artichoke powder reduces the rate of moisture transfer by 1.5 to 2 times, which affects the shelf life of pastille products. The water activity of foam-like confectionery samples containing Jerusalem artichoke powder ranged from 0.762 to 0.720, indicating that Jerusalem artichoke powder retains moisture and maintains the soft, delicate consistency of the samples containing 2% Jerusalem artichoke powder. However, additional microbiological monitoring is required.

KEYWORDS:

confectionery products, pastille, jerusalem artichoke variety, quality characteristics, and moisture transfer

Введение

Пастильное изделие – сахаристое кондитерское изделие пенообразной структуры с подсушенной поверхностью, полученное из сбивной массы с добавлением фруктово-ягодного сырья, пищевых добавок, ароматизаторов, с массовой долей фруктового сырья не менее 11%, массовой долей влаги не более 25%, плотностью не более 900 кг/м³ ^{1,2}.

Пастильные кондитерские изделия, такие как зефир и пастила, обладают пенообразной структурой и пользуются высоким спросом у потребителей. Обеспечение длительных сроков хранения пастильных изделий с сохранением их структуры и свежести, а также без изменения вкусовых свойств является актуальной задачей для производителей. В процессе хранения такие продукты подвержены физическим трансформациям в результате дегидратации или синерезиса, увлажнения поверхности, изменения показателей пищевой ценности [1].

В последнее время существует много способов приготовления пастильных изделий. Добавление порошка из клубней топинамбура в рецептуру зефира, обогащенного пищевыми волокнами, способствуют сохранению мягкой консистенции продукта и микробиологической стабильности, улучшают потребительские качества [2].

Для предотвращения процессов кристаллизации сахара и миграции влаги в зефире разработан способ получения зефира на основе крахмальной высокоосахаренной патоки, что увеличило срок хранения в два раза. Образцы маршмеллоу с натуральными антоциановыми красителями обладали в 2-2,5 раза большими антиоксидантными свойствами по сравнению с контрольным образцом. Герметичная упаковка в полиэтиленовую пленку и картон обеспечила сохранность изделий [3].

В процессе хранения зефира в течение 3-6 месяцев выявлено, что влажность снижалась в среднем на 4%, плотность увеличивалась до 11%, однако не превышала допустимого значения 0,6 г/см³. Показатели микробиологической безопасности к концу срока годности находились в соответствии с требованиями нормативной документации. Выявлены изменения органолептических показателей исследуемых изделий [4].

Для уменьшения калорийности и обогащения витаминно-минерального состава фруктово-овощной пастилы разработана рецептура и технология производства изделий на основе яблочного пюре с использованием моркови, свеклы, тыквы, абрикосов, кураги и хурмы. Добавление зостерина не влияет на вкус, цвет и запах пастильных изделий после 6 месяцев хранения, однако способствует обогащению пастилы витаминами и минералами, улучшает пластичность изделий [5].

Предложен способ получения азрированных кондитерских изделий типа маршмеллоу, содержащих «азрированную желатиновую сетку» и стабилизатор указанной «сетки», в частности пектин, отличающихся тем, что указанное кондитерское изделие имеет pH от 2,2 до 3,5. «Азрированная желатиновая сетка» состоит из желатина с воздухом. В качестве стабилизаторов использованы гидроколлоиды агар, альгинат или каррагинан [6].

Многие исследования посвящены влиянию различных видов пищевых добавок на технологию приготовления пастильных изделий. Так для стабилизации влажности маршмеллоу используют полиолы (глицерин, полиэтиленгликоль, мальтит, ксилит и сорбит). Предложена технология приготовления сбивных изделий, в т.ч. зефира с пониженным углеводным содержанием, повышенной термостабильностью, что позволяет расширить диапазоны температуры хранения и увеличить сроки годности до 6-9 месяцев [7].

Органолептические и физико-химические свойства маршмеллоу, такие как взбиваемость, эластичность, способность сохранять форму, наличие развитой синергии в парах: агар – низкоэтерифицированный пектин, гуаровая камедь – ксантановая камедь – рожковое дерево позволили обеспечить высокое качество маршмеллоу [8].

Для повышения качества, питательной и биологической ценности сбивных конфет, а также для расширения ассортимента, разработан способ производства включающий предварительно подготовленные полуфабрикаты на основе топинамбура (мезгу и сок). Сок фильтруют, смешивают, порошок топинамбура, патоку крахмально-кукурузную, крахмал, фруктовую эссенцию, лимонную кислоту и уваривают [9].

Предложен способ производства сбивных конфет типа «суфле» глазированных шоколадной глазурью. Конфетную массу получают сбиванием сахаро-паточных сиропов, содержащих студнеобразователь, яичный белок с последующим смешиванием пенообразной массы с вкусовыми компонентами. При увеличении давления воздуха при сбивании от 0 до 0,3 МПа наблюдается ускорение процесса сбивания в 3-8 раз и уменьшение дисперсности воздушной фазы. При увеличении количества вводимого в массу белка в 1,2 раза повышалась устойчивость структуры пены, а изделия сохраняли форму [10].

Предложена технология зефира с пониженной калорийностью, обладающего диетическими свойствами, включающая смешивание фруктозы, изомальта и сорбита и фруктовые и овощные порошки. Овощные порошки с заданной влагоудерживающей способностью придали маршмеллоу эластичную пенообразную структуру, сохраняющуюся на протяжении 3-3,5 месяцев. Маршмеллоу с овощными порошками сочетается с мучными кондитерскими изделиями различных групп, что позволяет расширить ассортимент [11,12].

Для уменьшения себестоимости зефира, упрощения и сокращения продолжительности технологического процесса и придания зефиру детского и диабетического назначения разработан новый способ производства зефира, предусматривающий предварительную подготовку студнеобразователя, в качестве которого используют водно-фруктозно-пектиновую смесь [13].

Перспективным направлением является использование в хлебобулочном и кондитерском производстве нетрадиционных источников сырья, которые являются ценным продуктом здорового питания. Наблюдается тенденция к применению нетрадиционного растительного сырья, например, клубней топинамбура, которые способны придать диетические свойства готовым изделиям, рекомендуемым для больных сахарным диабетом, улучшить их качество, снизить энергетическую ценность и

1 ГОСТ Р 53041-2008 «Изделия кондитерские и полуфабрикаты кондитерского производства. Термины и определения». Москва: Стандартинформ, 2019. 16 с.

2 ГОСТ 6441-2014 Изделия кондитерские пастильные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 7 с

интенсифицировать биотехнологические процессы при их производстве. Топинамбур — многолетнее травянистое растение из семейства астровых, родственно подсолнечнику, также называется земляной грушей или иерусалимским артишоком. Продукты переработки топинамбура как в форме биологически активной добавки, так и в качестве сырья удобно использовать для производства хлебобулочных изделий [14].

Результаты исследований и их обсуждение

Во ВНИИКП – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН были проведены исследования влияния порошка топинамбура на скорость изменения процесса влагопереноса пастилы.

Предложена технологическая схема приготовления пастилы с добавлением порошка из топинамбура (рис. 1).



Рис. 1. Технологическая схема производства пастилы с использованием порошка из топинамбура
Fig. 1. Technological scheme of pastila production using Jerusalem artichoke powder

Для повышения качества, питательной и биологической ценности изделия, разработан способ производства кондитерской продукции на основе топинамбура, что позволило расширить ассортимент [15].

Однако исследования по влиянию различного содержания порошка топинамбура сорта Омский белый на сохранность кондитерских изделий пенообразной структуры, на примере пастилы, не достаточно изучены, поэтому такая работа актуальна.

Материал и методика проведения исследований

Исследован сорт топинамбура Омский белый, г. Кострома, урожая 2024 года, размер порошка 100 мкр. Объектом для исследований являлись модельные образцы пастилы, изготовленные в лабораторных условиях с добавлением порошка топинамбура: 0% (контроль), 2% и 4%.

Состав образцов пастилы включал: сорбит – 70,4%, пюре яблочное – 13,0%, агар – 1,6%, крахмальную патоку – 13,14%, белок яичный сухой – 0,9%, 50%-й раствор лимонной кислоты – 0,96%.

Определяли следующие показатели качества: массовую долю влаги – ГОСТ 5900 «Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ», активность воды – ГОСТ Р ИСО 21807 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Определение активности воды», структурно-механические свойства образцов характеризовали показателем прочности по полученным усилиям нагружения образцов с помощью структуроанализатора «СТ-2» (РФ). Органолептические характеристики пастилы оценивали по ГОСТ 6441-2014 «2014 Изделия кондитерские пастильные. Общие технические условия». Образцы упаковывали в полипропиленовую плёнку с толщиной 30 мкм. Хранение образцов пастилы проведено в климатической камере «Climacell 404» (Чехия), термостате «Sanyo Mir 262» (Япония) при температурах 18°C, относительной влажности окружающего воздуха 40%. Статистический анализ полученных экспериментальных данных проведен с помощью программного обеспечения Excel 2019.

Образцы пастилы с добавлением порошка топинамбура изготавливались следующим образом. На первом этапе порошок топинамбура в виде гидратированной суспензии смешивали с сухим яичным белком и яблочным пюре, массу перемешивали и получали фруктовый полуфабрикат. Далее готовили агаро-сорбито-паточный сироп, содержащий агар, сорбит, патоку крахмальную. Сироп уваривали до содержания сухих веществ $70 \pm 0,5$ %. На втором этапе во фруктовый полуфабрикат добавляли агаро-сорбито-паточный сироп, охлажденный до температуры 78°C и взбивали миксером 15 мин. В взбитую массу добавляли 50%-раствор лимонной кислоты и взбивали 2 мин. Готовую пастильную массу разливали в формы для процесса структурообразования, для чего ее выдерживали при температуре 20-22°C в течение двух часов. Готовую пастильную массу резали на отдельные изделия с последующей упаковкой. При разработке технологии пастилы максимально допустимое количество порошка топинамбура не превышало 4%, так как дальнейшее увеличение количества порошка в рецептурной смеси приводило к значительному повышению её вязкости.

Образцы изготовленной пастилы с использованием порошка топинамбура представлены на рисунке 2.



Рис. 2. Модельные образцы пастилы с использованием порошка топинамбура
Fig. 2. Model samples of pastila using Jerusalem artichoke powder

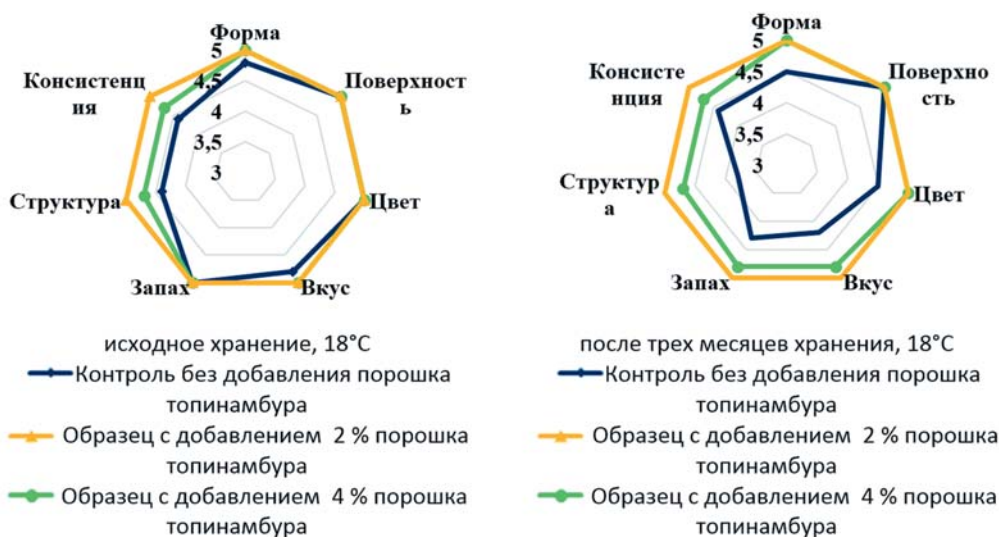


Рис. 3. Профилограмма образцов пастилы с добавлением топинамбура до и после трех месяцев хранения
Fig. 3. Profiling of pastille samples with the addition of Jerusalem artichoke before and after three months of storage

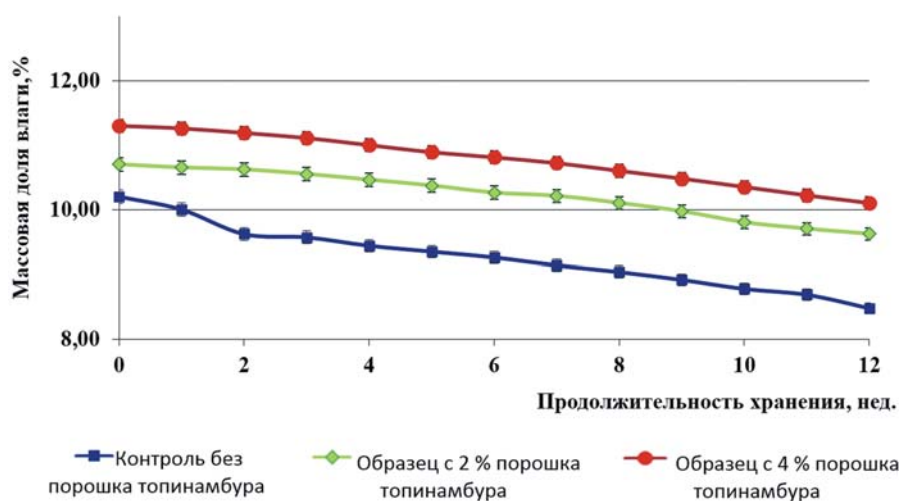


Рис. 4. Изменения массовой доли влаги образцов пастилы в процессе хранения
Fig. 4. Changes in the moisture content of pastille samples during storage

Проведены исследования органолептических показателей качества образцов пастилы в процессе хранения (рис. 3). Оценка органолептических показателей проведена по балловой системе, единица измерения – баллы.

Образцы, изготовленные на основе порошка топинамбура, обладали пенообразной структурой; вкус и запах, свойственные пастильным изделиям и удовлетворяли требованиям ГОСТ 6441-2014.

Консистенция образцов однородная, пастила правильной формы с упругой консистенцией. У образцов пастилы с добавлением порошка топинамбура присутствовал слегка сероватый оттенок в отличие от контрольного образца. После трёх месяцев хранения отмечено, что наилучшими органолептическими показателями обладали образцы пастилы, изготовленные на основе порошка топинамбура в количестве 2% по сравнению с образцами с 4% порошка топинамбура и контрольным образцом.

Для установления влияния порошка топинамбура на скорость процессов влагопереноса проведены исследования изменения массовой доли влаги в процессе хранения образцов пастилы, содержащих различное количество порошка топинамбура, при температуре 18°C и относительной влажности воздуха 40 %, результаты которых представлены на рисунке 4.

Установлено, что массовая доля влаги снизилась у контрольного образца от 10,2% до 8,5%, у образца с 2% порошка топинамбура от 10,8 % до 9,5%, у образца с 4% порошка топинамбура от 11,3% до 10,2%. Наибольшие потери влаги по истечении 3 месяцев хранения установлены для контрольного образца, наименьшие потери влаги – у образца с 2% порошка топинамбура. Увеличение потерь свободной влаги образцами пастилы с 4% порошка топинамбура возможно связано с деформацией пенообразной структуры образцов в процессе хранения.

Получены математические зависимости массовой доли влаги (W, %) образцов пастилы с использованием порошка топинамбура от длительности хранения (t, нед.):

$$\begin{aligned} \text{Контрольный:} & W = -0,13t + 10,0 \quad (R^2=0,97); \\ \text{с 2\% порошка топинамбура:} & W = -0,09t + 10,8 \quad (R^2=0,98); \\ \text{с 4\% порошка топинамбура} & W = -0,10t + 11,4 \quad (R^2=0,99). \end{aligned}$$

Уравнения позволяют рассчитать массовую долю влаги изделий (W) в заданный момент хранения (t).

Проведены исследования влияния порошка топинамбура на показатель активности воды изготовленных образцов пастилы (рис. 5).

Активность воды у образцов пастилы с использованием различного содержания порошка топинамбура находилась

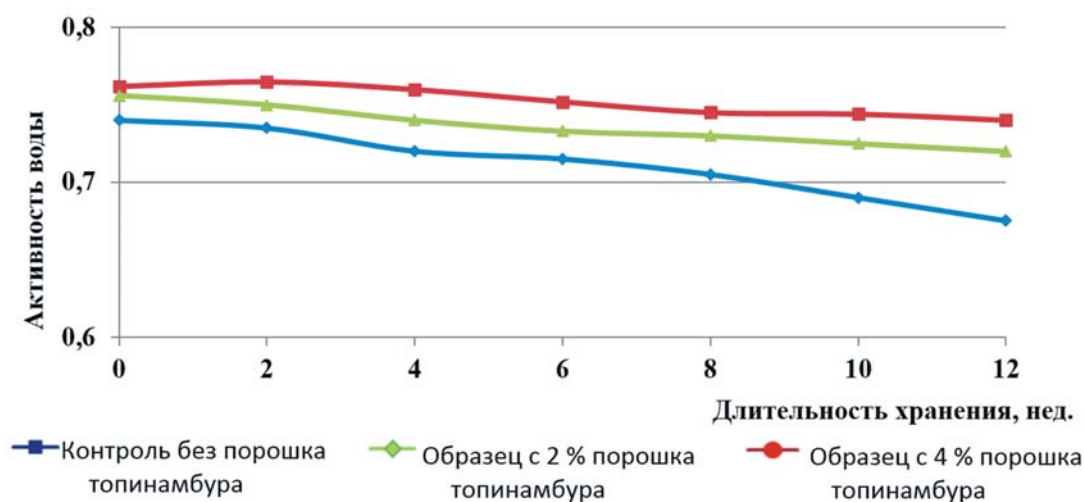


Рис. 5. Изменение показателя активности воды образцов пастилы в процессе хранения
Fig. 5. Changes in the water activity index of pastille samples during storage

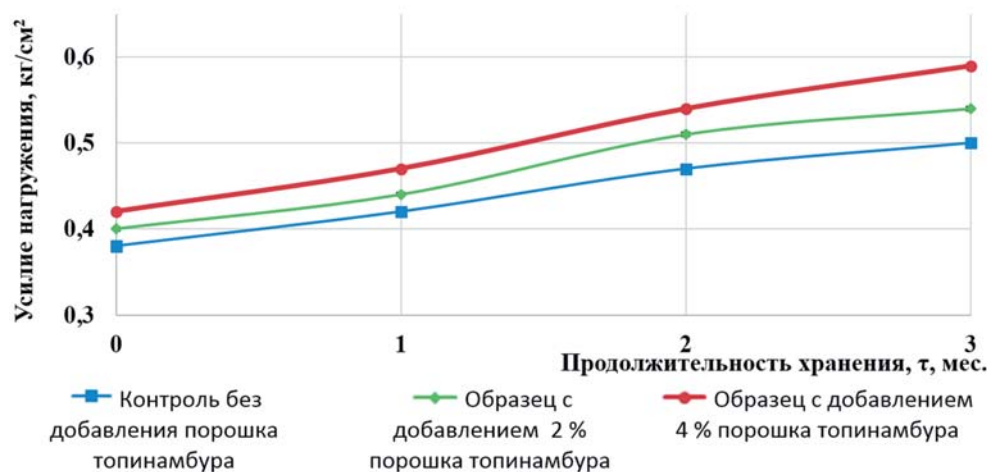


Рис. 6. Изменения усилия нагружения образцов пастилы в процессе хранения
Fig. 6. Changes in the loading force of pastille samples during storage

в диапазоне для образца с содержанием 2% порошка топинамбура от 0,756 до 0,720, для образца с содержанием 4 % порошка топинамбура от 0,762 до 0,740, что указывает на удержание влаги порошком топинамбура и сохраняет мягкую, нежную консистенцию образцов с 2% порошка топинамбура, но при этом требуется дополнительный контроль микробиологических показателей, так как изделие содержит больше влаги, чем в контрольном образце.

Определены усилия нагружения, характеризующие пластическую прочность образцов пастилы до и после процесса хранения (рис. 6).

Пластическая прочность образцов пастилы после трёх месяцев хранения находилась в диапазоне 0,38-0,59 кг/см², что обеспечивает высокую формоустойчивость и сохранность пастилы. Добавление порошка топинамбура по истечении 3 мес. хранения повысило прочность образца с 2% порошка топинамбура от 0,40 до 0,54 кг/см² и образца с 4% порошка топинамбура от 0,42 до 0,59 кг/см² в отличие от контрольного образца пастилы, прочность которого находилась в диапазоне 0,38-0,50 кг/см². Такие изменения усилий нагружения в образцах пастилы с добавлением порошка топинамбура связаны со свойствами пищевых волокон порошка топинамбура, что и оказывает непосредственное влияние на прочностные характеристики образцов в процессе хранения. При этом консистенция образцов

пастилы с порошком топинамбура в количестве 2 % осталась не слишком твёрдой и приемлемой для употребления.

Заключение

Использование порошка топинамбура сорта «Омский» в рецептурном составе пастилы позволило повысить питательные и вкусовые характеристики продукции.

Наибольшие потери влаги по истечении 3 месяцев хранения выявлены были у контрольного образца пастилы, наименьшие потери – у образца с добавлением 2 % порошка топинамбура. Отмечено, что добавление порошка топинамбура влияет на скорость процесса влагопереноса образцов пастилы, что связано со свойствами пищевых волокон, которые обеспечивают наибольшие влагоудерживающие свойства, и следовательно, повышают сохранность и срок годности пастилы.

Результаты исследований могут быть полезны при разработке составов кондитерских изделий с использованием овощного порошка топинамбура с целью обогащения пищевыми волокнами обладающих функциональными свойствами. Такие изделия будут перспективны для питания лиц с нарушением углеводного обмена при дополнительном клинико-диетологическом обосновании.

• Литература

- Зверев С.В., Карпов В.И., Никитина М.А. Оптимизация пищевых композиций по профилю идеального белка. *Пищевые системы*. 2021;4(1):4–11. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-4-11> <https://www.elibrary.ru/oljiii>
- Кондратова И.И., Томашевич С.Е., В.М. Кононович, Шостак Л.М. Изменение водной активности в процессе хранения зефира, обогащенного пищевыми волокнами. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук*. 2014;2:110-215.
- Artamonova M.A., et al. Study of properties of marshmallow with natural anthocyanin dyes during storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;3/11(87):23–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103857>
- Попова Д.Г., Резниченко И.Ю., Табаторович А.Н. Исследование влияния сроков хранения на показатели качества пастильных изделий. *АПК России*. 2020;27(5):853-859. <https://www.elibrary.ru/bvxxxy>
- Зотова Л.В., Мякинникова Е.И., Савина А.М. Инновационная технология производства фруктово-овощной пастилы. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2016;2:3:43-46. <https://www.elibrary.ru/wdhtqr>
- Stevens P., Guedj S., Capdepon C., Giraud A.Pat. 20060101 USA Patent. Marshmallow-type aerated confectionery and method of preparation; assignee: Gent Mendonk (USA). № A23G 3/52; 13.08.2008; propr. 14.10.2010. 5 p.
- Дюжина Т.В., Символокова С.А., Миронова А.Н., Тагиева Т.Р. Патент РФ № 2016121386, RU 2647130C2. Кондитерское изделие. Патентообладатель ОАО "Кондитерский концерн Бабаевский". Оpubл. 14.03.2018.
- Nepovinnikh N.V. Study of the stability of foam and viscoelastic properties of Marshmallow without Gelatin. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(1):90-98. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-90-98>
- Воробьев С.Л. и др. Патент РФ № 2244436, A23G3/00. Способ производства сбивных конфет. заявитель и патентообладатель ООО Рuzанна. Оpubл. 20.01.2005.
- Истомина М.М. и др. Конфеты. М.: *Пищевая Промышленность*, 1979. 293 с.
- Магомедов Г.О., Плотникова И.В., Кривошеева А.В. Pat. RU2651288C1 Russian Patent. Marshmallow production method, assignee: ФГБОУ ВО "ВГУИТ" (RU). № RU2017114089A; 2018-04-19; propr. 2017-04-24. 9 с.
- Pat. KR101602785B1 Korean Patent. Vegetable Marshmallow and Method for manufacturing the same and Confectionery containing Vegetable Marshmallow. assignee: Morinaga & Co Ltd (US). - № 101602785B1; 11.03.2016; propr. 2016.03.11. 7 p.
- Жукова Л.П. Патент РФ № 2146473 МПК A23G3/00, A23L1/06. Способ производства зефира. Патентообладатель Орловский ГТУ. Оpubл. 20.03.2000.
- Королев Д.Д., Симаков Е.А., Старовойтов В.И. Картофель и топинамбур — продукты будущего. Министерство сельского хозяйства РФ. М.: ФГНУ Росинформагротех, 2007. 292 с. <https://www.elibrary.ru/yrgtch>
- Рябова В.Ф. и др. Пищевая добавка из топинамбура для производства хлебобулочных изделий с лечебно-профилактическими свойствами. *Молодой ученый*. 2015;23(103):217-219. <https://www.elibrary.ru/vddoxf>

• References

- Zverev S.V., Karpov V.I., Nikitina M.A. Optimization of food compositions based on the ideal protein profile. *Food Systems*. 2021;4(1):4–11. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-4-11> <https://www.elibrary.ru/oljiii>. (In Russ.)
- Kondratova I.I., Tomashevich S.E., V.M. Kononovich, Shostak L.M. Changes in water activity during storage of marshmallows enriched with dietary fiber. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Agrarian Sciences*. 2014;2:110-215. (In Russ.)
- Artamonova M.A., et al. Study of properties of marshmallow with natural anthocyanin dyes during storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;3/11(87):23–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103857>
- Popova D.G., Reznichenko I.Yu., Tabatorovich A.N. Study of the influence of storage periods on the quality indicators of pastille products. *AIC of Russia*. 2020;27(5):853-859. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/bvxxxy>
- Zotova L.V., Myakinnikova E.I., Savina A.M. Innovative technology for the production of fruit and vegetable pastilles. *News of universities. Food technology*. 2016;2-3:43-46. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/wdhtqr>
- Stevens P., Guedj S., Capdepon C., Giraud A.Pat. 20060101 USA Patent. Marshmallow-type aerated confectionery and method of preparation; assignee: Gent Mendonk (USA). № A23G 3/52; 13.08.2008; propr. 14.10.2010. 5 p.
- Dyuzhina T.V. et al. Russian Federation Patent No. 2016121386, RU 2647130C2. Confectionery product. Patent holder: Babaevsky Confectionery Concern OJSC. Published March 14. 2018. (In Russ.)
- Nepovinnikh N.V. Study of the stability of foam and viscoelastic properties of Marshmallow without Gelatin. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(1):90-98. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-90-98>
- Vorobyov S.L. et al. Russian Federation Patent No. 2244436, A23G3/00. Method for producing whipped candies, applicant and patent holder - Ruzanna LLC. Published 20.01.2005. (In Russ.)
- Istomina, M.M. et al. Candies. - M.: *Food Industry*. 1979. 293 p.
- Magomedov G.O., Plotnikova I.V., Krivosheeva A.V. Pat. RU2651288C1 Russian Patent. Marshmallow production method; assignee: FGBOU VO "VSUET" (RU). No. RU2017114089A; 2018-04-19; propr. 2017-04-24. 9 p. (In Russ.)
- Pat. KR101602785B1 Korean Patent. Vegetable Marshmallow and Method for manufacturing the same and Confectionery containing Vegetable Marshmallow. assignee: Morinaga & Co Ltd (US). - No. 101602785B1; 03/11/2016; propr. 2016.03.11. 7 p. (In Russ.)
- Zhukova L.P. Russian Federation Patent No. 2146473 IPC A23G3/00, A23L1/06. Method for producing marshmallow Patent holder - Oryol State Technical University. Published 20.03.2000. (In Russ.)
- Korolev D.D., Simakov E.A., Starovoytov V.I. Potatoes and Jerusalem artichoke — products of the future. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. M.: FGNU Rosinformagrotekh, 2007. 292 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/yrgtch>
- Ryabova V.F. et al. Food additive from Jerusalem artichoke for the production of bakery products with therapeutic and prophylactic properties. *Young scientist*. 2015;23(103):217-219. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/vddoxf>

Об авторах:

Максим Владимирович Осипов – кандидат техн. наук, зав. отделом современных методов оценки качества кондитерских изделий, <https://orcid.org/0000-0002-1316-259X>, SPIN-код: 4693-0084

Сергей Леонидович Белецкий – кандидат техн. наук, директор, <https://orcid.org/0000-0003-4351-2674>, SPIN-код: 4689-2733, grain-miller@yandex.ru

Егор Валерьевич Казанцев – научный сотрудник отдела современных методов оценки качества кондитерских изделий, <https://orcid.org/0000-0001-8923-0029>, SPIN-код: 9106-4901, автор для переписки, conditerprom_lab@mail.ru

Алла Евгеньевна Баженова – научный сотрудник отдела современных методов оценки качества кондитерских изделий, <https://orcid.org/0000-0002-6994-8524>, SPIN-код: 6485-9760

Фархад Багадыр оглы Мусаев – доктор с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/000-0001-9323-7741>, SPIN-код: 5918-0757

About the Authors:

Maxim V. Osipov – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Modern Methods for Assessing the Quality of Confectionery Products, <https://orcid.org/0000-0002-1316-259X>, SPIN-code: 4693-0084

Sergey L. Beletskiy – Cand. Sci. (Engineering), Director, <https://orcid.org/0000-0003-4351-2674>, SPIN-code: 4689-2733, grain-miller@yandex.ru

Egor V. Kazantsev – Researcher of the Department of Modern Methods of Quality Assessment of Confectionery Products, <https://orcid.org/0000-0001-8923-0029>, SPIN-code: 9106-4901, Corresponding Author, conditerprom_lab@mail.ru

Alla E. Bazhenova – Researcher, Department of Modern Methods for Assessing the Quality of Confectionery Products, <https://orcid.org/0000-0002-6994-8524>, SPIN-code: 6485-9760

Farkhad B. Musaev – Dr. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, <https://orcid.org/000-0001-9323-7741>, SPIN-code: 5918-0757

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-208-213>
УДК: 633.174:57(571.15)

А.П. Чебатареv^{1,2*}, Л.Ф. Сыркина³, С.В. Жаркова²,
А.Б. Володин⁴, Е.Н. Пшеничникова¹

¹ФГБУ «Федеральный Алтайский
научный центр агробиотехнологий»
656910, Россия, г. Барнаул

²Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный аграрный универси-
тет»
656049, Россия, Сибирский федеральный округ,
Алтайский край, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98

³Самарский федеральный исследовательский центр
РАН, Поволжский научно-исследовательский инсти-
тут селекции и семеноводства
им. П.Н. Константинова
446442, Россия, пгт. Усть-Кинельский

⁴ФГБУ «Северо-Кавказский ФНАЦ»
356212, Россия, г. Михайловск

*Автор для переписки: admiral160697@mail.ru

Вклад авторов: А.П. Чебатареv: концептуализа-
ция, проведение исследований, верификация дан-
ных, создание черновика рукописи. Л.Ф. Сыркина:
концептуализация, верификация данных. С.В.
Жаркова: концептуализация, верификация данных,
создание рукописи и ее редактирование. А.Б.
Володин: концептуализация, верификация данных.
Е.Н. Пшеничникова: проведение исследований.

Конфликт интересов: Жаркова С.В. является
членом редакционной коллегии журнала «Овощи
России» с 2017 года, но не имеет никакого отноше-
ния к решению опубликовать эту статью. Статья про-
шла принятую в журнале процедуру рецензирова-
ния. Об иных конфликтах интересов авторы не
заявляют.

Для цитирования: Чебатареv А.П., Сыркина Л.Ф.,
Жаркова С.В., Володин А.Б., Пшеничникова Е.Н.
Оценка агробиологических свойств сортов и линий
сорго сахарного (*Sorghum saccharatum* L. Moench) в
условиях лесостепной зоны Алтайского края. *Овощи
России*. 2025;(6):208-213.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-208-213>

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Принята к печати: 04.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Anatoly P. Chebatarev^{1,2*},
Lyubov F. Syrkina³, Stalina V. Zharkova²,
Alexander B. Volodin⁴, Elena N. Pshenichnikova¹

¹«Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnology»
Barnaul, Altai Krai, Russia, 656910

²Altai State Agricultural University
Krasnoarmeysky Avenue, 98, Barnaul, Altai Krai,
Siberian Federal District, 656049, Russia

³Samara Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences,
P.N. Konstantinov Volga Scientific Research Institute of
Breeding and Seed Production
Ust-Kinelsky, Russia, 446442

⁴North Caucasian FNAC»
Mikhailovsk, Russia, 356212

*Corresponding Author: admiral160697@mail.ru

Authors' Contribution: Chebatarev A.P.: conceptual-
ization, investigation, validation, writing – original draft.
Syrkina L.F.: conceptualization, validation. Zharkova
S.V.: conceptualization, validation, writing – review &
editing. Volodin A.B.: conceptualization, validation.
Pshenichnikova E.N.: investigation.

Conflict of interests. Zharkova S.V. has been a mem-
ber of the editorial board of the Journal "Vegetable crops
of Russia" since 2017, but had nothing to do with the
decision to publish this manuscript. The manuscript
passed the journal's peer review procedure. The authors
declare no other conflicts of interest.

For citations: Chebatarev A.P., Syrkina L.F., Zharkova
S.V., Volodin A.B., Pshenichnikova E.N. Assessment of
agrobiological properties of varieties and lines of sugar
sorghum (*Sorghum saccharatum* L. Moench) in the con-
ditions of the forest-steppe zone of the Altai Territory.
Vegetable crops of Russia. 2025;(6):208-213. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-208-213>

Received: 22.10.2025

Accepted for publication: 04.12.2025

Published: 18.12.2025

Оценка агробиологических свойств сортов и линий сорго сахарного (*Sorghum saccharatum* L. Moench) в условиях лесостепной зоны Алтайского края

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Темпы изучения сортового разнообразия сорго сахарного со стороны науки постепенно растут, но пока остаются недостаточными для значительного расши-
рения границ использования этой культуры в различных отраслях промышленности и
сельском хозяйстве Западной Сибири. Цель исследований – выделить перспективные
линии и сорта сорго сахарного универсального использования.

Материалы и методы. Конкурсное сортоиспытание сорго сахарного проводили в
период 2022-2024 годов на опытном поле ФГБУ «Федерального Алтайского научного
центра агробиотехнологий». Испытывали 4 сорта и 2 линии сахарного сорго: Алга,
Галия, Кинельское 4, Тандем, Л1533, Л1920. Стандартом выступал сорт Алтайское 1.
Семена высевали на делянках площадью 10 м² в четырехкратной повторности. Уборку
делянок делали вручную и с помощью селекционного комбайна Wintersteiger «Classic».
Учет и оценка хозяйственно ценных признаков сортообразцов выполнена по общепри-
нятым и методам.

Результаты. В ходе испытания выделено 3 сорта и 1 линия сахарного сорго с комплек-
сом агробиологических признаков: по урожайности зеленой (93,3 ц/га) и сухой массы
(31,2 ц/га) – Алга; по урожайности зеленой массы (76,6 ц/га), зерна (3,0 т/га) – Кинельское
4; по урожайности зеленой (90,4 ц/га) и сухой массы (29,4 ц/га), содержанию сырых
жиров (2,0 %), сахаров (23,1 г), перевариваемого протеина (111,4 г) – Тандем; по урожай-
ности сухой массы (27,6 ц/га), зерна (3,8 т/га), содержанию сахаров (21,8 г), переваривае-
мого протеина (104,6 г) – Л1920. Ярко выраженные по этим признакам генотипы могут
быть рекомендованы для дальнейшего ведения селекции сахарного сорго.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

сорт, линия, урожайность, качество, протеин

Assessment of agrobiological properties of varieties and lines of sugar sorghum (*Sorghum saccharatum* L. Moench) in the conditions of the forest-steppe zone of the Altai Krai

ABSTRACT

Relevance. The pace of scientific study of the varietal diversity of sugar sorghum (*Sorghum
saccharatum* L. Moench) is gradually increasing, but still remain insufficient for a significant
expansion of the boundaries of use of this crop in various branches of industry and agricul-
ture in Western Siberia. The purpose of the research is to identify promising lines and vari-
eties of sugar sorghum of universal use.

Materials and Methods. Competitive variety testing of sugar sorghum was carried out in the
period 2022-2024 at the experimental field of the Federal State Budgetary Institution «Federal
Altai Scientific Center for Agrobiotechnology», located in the suburbs of Barnaul. 4 varieties
and 2 lines of sugar sorghum were tested: Alga, Galiya, Kinelskoe 4, Tandem, L1533, L1920.
The standard variety was Altayskoye 1. The seeds were sown on plots of 10 m² in fourfold rep-
etition. The plots were cleaned manually and with the help of a Wintersteiger «Classic» breed-
ing combine. Accounting and evaluation of economically valuable characteristics of cultivars
is carried out according to generally accepted and standardized methods.

Results. During the test, 3 varieties and 1 line of sugar sorghum were identified, combining a
complex of useful agrobiological features: in terms of green yield (93.3 kg/ha) and dry weight
(31.2 kg/ha) – Alga; in terms of green yield (76.6 kg/ha), grain (3.0 t/ha) – Kinelskoe 4; in terms
of green yield (90.4 c/ha) and dry weight (29.4 c/ha), fat content (2.0%), sugars (23.1 g),
digestible protein (111.4 g) – Tandem; in terms of dry weight yield (27.6 c/ha), grain (3.8 t/ha),
sugar content (21.8 g), digestible protein (104.6 g) – L1920. Forms that are pronounced
according to these characteristics can be commended for further breeding of sugar sorghum.

KEYWORDS:

variety, line, yield, quality, protein

Введение

В условиях глобального потепления климата особое преимущество среди злаковых культур несёт сорго сахарное (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench). Благодаря принадлежности к ксерофитам [1, 2, 3], культура легко переносит жару (до +40С°), неприхотлива к почве и часто используется как страховая [1]. Сорго сахарное возделывается почти в 100 странах мира. Посевные площади под эту культуру во всём мире достигают 44 млн га [1, 4], в России – 220,3 тыс. га [1, 5]. Мировые объёмы производства сорго составляют свыше 56 млн тонн зерна за год [1, 6]. В отличие от других разновидностей рода *Sorghum* (зерновое, травянистое, веничное), стебель этого вида имеет сахаристость, близкую сахарному тростнику [1, 4].

Основные достижения в селекции сорго сахарного были достигнуты в США [2], в том числе и по выведению сортов с высоким содержанием сахара в стебле до 22% (начало 1940 гг.) [5]. В России первые опыты по изучению сорго начали в 1880 году и длительное время вели преимущественно на кормовые цели [1, 2, 7]. Сейчас содержание сахара у отечественных сортов и гибридов стало выше (19-24%) [1], чем у старых форм (до 16%), на что существенное влияние оказали результаты проведенных исследований в этом направлении [8].

Как пищевое растение сорго сахарное занимает 3 место после пшеницы и риса. Оно широко используется для получения сиропа, пива и патоки [4]. Это хорошая крупяная культура [8]. Зерно сорго богато белком (80 %), крахмалом (94 %), витаминами группы В (50-75 %) и минеральными веществами (Са, Р, Mg, К, Na, Си и т.д.) [6]. Крупу из сорго включают в приготовление разнообразных блюд (каши, супы), а муку частично добавляют в хлебобулочные и кондитерские изделия (пряники) для улучшения их органолептических показателей [9]. Сорго остается основным хлебным злаком примерно для 500 млн людей в 30 странах Индии и Африки [8, 10]. В России статус продовольственной культуры сорго сахарное пока не имеет [9].

С появлением в мире современных технологий, направленных на более эффективную очистку растительного сырья от примесей, значительно расширились сферы применения сорго сахарного [4, 11, 12]. Например, в США и Европе эта культура несет преимущество перед свеклой сахарной и тростником [4, 13] и выступает главным источником получения биотоплива (биоэтанол, биотопливо) [11, 14]. В России главное назначение этого злака остается кормо-

вым [7]. Высокая питательная ценность зерна (92,50% – сухого вещества, 9,50% – сырого протеина, 2,70% – сырой клетчатки, 1,25% – золы) [6] и зеленой массы (15,0-19,0% – водорастворимых сахаров, 6,1-8,3% – сырого протеина, 1,6-3,4% – сырого жира) [15] выступают определяющими факторами использования культуры в кормопроизводстве (силос, сено, сенаж, зернофураж). Однако существующие прогнозы по усилению засух в ближайшие годы (на 2,5С°) могут резко ухудшить состояние слабо развитого животноводства в нашей стране и снизить производство кормов [16, 17].

Известно, что сорго сахарное более охотно возделывают в засушливых регионах, где высокие температуры благоприятствуют его развитию, но плохо отражаются на продуктивности традиционных кормовых культур (свекла сахарная, кукуруза) [11, 18]. В условиях Западной Сибири существенное внедрение в производство и структуру посевных площадей сорго сахарное до сих пор не получило из-за отсутствия широкого набора сортов и гибридов, высокоадаптированных к специфике климата этой зоны [19]. По состоянию на 2025 год в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию по 10 региону, включено лишь 6 сортообразцов, из них 3 сорта и 3 гибрида [8]. Поэтому выведение высокопродуктивных, с высоким качеством зеленой массы форм этой культуры будет способствовать расширению местного ассортимента кормовых культур и улучшения ведения сельского хозяйства в области растениеводства.

Цель исследования – выделить перспективные линии и сорта сахарного сорго универсального использования.

Методика, условия проведения и объекты исследования

Конкурсное сортоиспытание (КСИ) сортов и линий сорго сахарного проводили в период 2022-2024 годов на опытном поле ФГБНУ «Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий», расположенного в пригороде города Барнаул (пос. Научный городок). Погодные условия вегетационных периодов на основе расчета гидротермического коэффициента (ГТК) складывались разнообразными: 2022 год – засушливый, 2023 год – очень засушливый, 2024 год – довольно влажный (табл. 1). Неравномерное распределение осадков в сочетании с умеренными температурами в эти три года позволили более широко и объективно оценить потенциал сортообразцов.

Таблица 1. Метеорологические условия вегетационного периода, 2022-2024 гг.
Table 1. Meteorological conditions during the growing season, 2022-2024

Период	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Среднемноголетние данные
Среднемесячная температура воздуха, °С				
Май	17,2	12,1	12,5	12,9
Июнь	18,2	19,7	20,3	18,2
Июль	18,8	21,4	21,6	19,9
Август	16,8	8,4	19,0	17,6
Осадки, мм				
Май	4,6	10,1	18,0	42,0
Июнь	111,2	44,9	54,8	47,0
Июль	56,0	75,1	77,1	64,0
Август	16,1	79,6	78,5	49,0
ГТК	0,84	0,73	1,1	-



Рис. 1. Учет зеленой массы
Fig. 1. Accounting for the green mass



Рис. 2. Определение фазы развития зерна
Fig. 2. Determination of the grain development phase

В питомнике КСИ испытывали 4 сорта и 2 линии сорго сахарного: Алга, Галия, Кинельское 4, Тандем, Л1533, Л1920. Стандартом выступал сорт Алтайское 1.

Семена высевали в период III декада мая – I декада июня на делянках площадью 10 м² в четырехкратной повторности. Расположение делянок – рендомизированное. Предшественник – чистый пар. Уход за растениями заключался в проведении защитных мероприятий (обработка гербицидом «Балерина») и прополках. Учет и уборку делянок делали вручную и с помощью селекционного комбайна Wintersteiger «Classic» (рис. 1, 2).

Оценку хозяйственно ценных признаков (урожайность зеленой, сухой массы и зерна) сортов и линий сорго сахарного выполняли по методике Государственного сортоиспытания с.-х. культур [20]. Определение биохимического состава сухой массы сорго проводили в лаборатории аналитиче-

ских исследований согласно требованиям ГОСТ: 26176-2019 (сахар, крахмал), 31675-2012 (сырая клетчатка), 13496.17-2019 (сырой жир). Питательную ценность кормов рассчитывали с помощью коэффициента перевариваемости кормов по М.Ф. Томмэ. Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена методом дисперсионного анализа [21] и пакета программ Excel2000.

Результаты исследований

Предел варьирования урожайности зеленой массы у сортов и линий сорго сахарного в период 2022-2024 годов составил от 59,7 ц/га у линии Л1533 до 93,3 ц/га у сорта Алга (табл. 2). Достоверно по этому признаку выделились сорта Алга, Кинельское 4 и Тандем ($HCP_{05}=19,2$ ц/га). У двух сортов (Алга, Тандем) в отличие от сорта-стандарта отмечено увеличение продуктивности зеленой массы в ответ на

Таблица 2. Урожайность зеленой массы сортов и линий сорго сахарного, ц/га
Table 2. Yield of green mass of sugar sorghum varieties and lines, c/ha

Сорт, линия	Годы исследований			Среднее	Отклонение от st.
	2022	2023	2024		
Алтайское 1, st.	43	64	63	56,7	–
Алга	101	95	84	93,3	+36,6
Галия	74	53	69	65,3	+8,6
Кинельское 4	86	74	70	76,6	+19,9
Тандем	95,3	72,7	103,3	90,4	+33,7
Л1533	50	63	66	59,7	+3,0
Л1920	69	56	62	62,3	+5,6
HCP_{05}	-	-	-	19,2	–

засушливые и очень засушливые условия 2022-2023 годов, т.е. превышение значений 2024 года на 14 ц/га и соответственно на 10 ц/га. Урожайность зеленой массы у остальных образцов сорго сахарного (Л1533 – 59,7 ц/га, Л1920 – 62,3 ц/га, Галия – 65,3 ц/га) не превышала значимо уровень стандарта (56,7 ц/га), её прибавка в среднем составила 5,7 ц/га.

Средняя урожайность сухой массы у изучаемых сортов и линий сорго сахарного за годы исследований варьировала от 23,1 ц/га у линии Л1533 до 31,2 ц/га у сорта Алга (табл. 3). Достоверно по урожайности сухой массы превысили стандартный сорт Алтайское 1 (18,9 ц/га) линия Л1920, сорта Алга и Тандем ($HCP_{05}=7,6$ ц/га), прибавки составили от 8,7 ц/га до 29,4 ц/га. По этому признаку сортообразцы незначительно варьировали между периодом 2022-2023 годов и 2024 годом, за исключением сорта Алга, который в условиях засухи дал в среднем наибольшую урожайность сухой массы (34,1 ц/га), чем во влажный 2024 год (25,4 ц/га). Остальные сортообразцы сорго (Галия – 25,7 ц/га, Л1533 – 23, ц/га, Кинельское 4 – 24,7 ц/га) в среднем сформировали на 4,1 ц/га больше урожайности сухой массы, чем сорт-стандарт (18,9 ц/га), но достоверно не отличались от него.

В ходе КСИ все сортообразцы сорго сахарного показали высокую либо соответствующую стандартному сорту продуктивность биомассы, но не все формы успели полноценно вызреть и сформировать зерно, такими явились Галия, Алга, Тандем (табл. 4). В период 2022-2024 годов урожай-

ность зерна колебалась от 3,0 т/га у сорта Кинельское 4 до 3,8 т/га у линии Л1920, прибавки составили от 1,7 т/га до 2,5 т/га. Превзошли стандарт (1,3 т/га) по этому признаку линии Л1533, Л1920 и сорт Кинельское 4 ($HCP_{05}=0,7$ т/га). Несмотря на контрастность условий испытания, значимых колебаний в урожайности зерна, как по другим признакам, у генотипов подобно стандартному сорту не отмечалось. Лишь сорт Кинельское 4 в засушливые 2022-2023 годы показал в среднем чуть большую продуктивность зерна (на 0,3 т/га больше) в сравнении с достаточно влажным 2024 годом.

Исследования показали, что химический состав зеленой массы у сортов и линий сорго сахарного имел следующие пределы изменчивости качественных показателей: протеина – от 8,4% до 13,7%, клетчатки – от 25,2% до 35,8%, жиров – от 1,0% до 2,1%, сахаров – от 8,5 г до 23,1 г, крахмала – от 4,5 г до 16,6 г, перевариваемого протеина – от 82,3 г до 12,8 г (табл. 5). Большинство сортообразцов по многим показателям качества превзошли стандартные значения сорта Алтайское 1: Алга (по протеину – на 7,3%, перевариваемому протеину – на 51,1 г), Галия (по протеину – на 6,6%, клетчатке – на 11,1%, жирам – на 0,8%, перевариваемому протеину – на 54,6 г), Кинельское 4 (по клетчатке – на 8,3%), Тандем (по жирам – на 0,7%, сахарам – на 4,6 г, перевариваемому протеину – на 53,2 г), Л1920 (по сахарам – на 3,3 г, перевариваемому протеину – на 46,4 г), Л1533 (по крахмалу – на 7,6 г).

Таблица 3. Урожайность сухой массы сортов и линий сахарного сорго, ц/га
Table 3. Yield of dry mass of sugar sorghum varieties and lines, c/ha

Сорт, линия	Годы исследований			Среднее	Отклонение от st.
	2022	2023	2024		
Алтайское 1, st.	15,5	21,7	19,4	18,9	–
Алга	39,6	28,5	25,4	31,2	+12,3
Галия	29,6	22,7	24,7	25,7	+6,8
Кинельское 4	27,3	24,5	22,4	24,7	+5,8
Тандем	32	27,3	29	29,4	+10,5
Л1533	17,4	26,1	25,7	23,1	+4,2
Л1920	30,3	24,4	28	27,6	+8,7
HCP_{05}	–	–	–	7,6	–

Таблица 4. Урожайность зерна сортов и линий сорго сахарного, т/га
Table 4. Grain yield of sugar sorghum varieties and lines, t/ha

Сорт, линия	Годы исследований			Среднее	Отклонение от st.
	2022	2023	2024		
Алтайское 1, st.	0,9	1,6	1,3	1,3	–
Алга	–	–	–	–	–
Галия	–	–	–	–	–
Кинельское 4	3,7	2,5	2,8	3,0	+1,7
Тандем	–	–	–	–	–
Л1533	3,5	2,6	3,2	3,1	+1,8
Л1920	4,4	3,2	3,8	3,8	+2,5
HCP_{05}	–	–	–	0,7	–

Таблица 5. Химический состав зеленой массы сортов и линий сахарного сорго
Table 5. Chemical composition of the green mass of sugar sorghum varieties and lines

Сорт, линия	Химический состав, %			В 1 кг корма содержится, г		
	протеин	сырая клетчатка	сырой жир	сахар	крахмал	перевариваемый протеин в 1 к.ед.
Алтайское 1, st.	6,4	24,7	1,3	18,5	9,0	58,2
Алга	13,7	28,4	1,7	18,5	6,2	109,3
Галия	13,0	35,8	2,1	20,2	8,9	112,8
Кинельское 4	8,5	33,0	1,9	20,0	12,6	90,3
Тандем	9,5	29,6	2,0	23,1	4,5	111,4
Л1533	8,4	25,2	1,0	8,5	16,6	82,3
Л1920	10,0	30,1	1,9	21,8	5,2	104,6

Заключение

Оценка сортов и линий сорго сахарного в условиях лесостепной зоны Алтайского края показала хорошие результаты по исследуемым признакам. Оценивая в данном исследовании в КСИ 4 сорта и 2 линии сорго сахарного по ряду хозяйственно ценных признаков в 2022-2024 годах, определено, что лучшими вариантами в опыте являлись следующие формы: по урожайности

зеленой (93,3 ц/га) и сухой массы (31,2 ц/га) – сорт Алга; по урожайности зеленой массы (76,6 ц/га), зерна (3,0 т/га) – сорт Кинельское 4; по урожайности зеленой (90,4 ц/га) и сухой массы (29,4 ц/га), содержанию жиров (2,0%), сахаров (23,1 г), перевариваемого протеина (111,4 г) – сорт Тандем; по урожайности сухой массы (27,6 ц/га), зерна (3,8 т/га), содержанию сахаров (21,8 г), перевариваемого протеина (104,6 г) – линия Л1920.

Литература

- Оказова З.П. О возможности возделывания сахарного сорго на Северном Кавказе. Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса юга России: сборник докладов по материалам Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Майкоп: ИП «Магарин О.Г.», 2020. С. 125-128. <https://www.elibrary.ru/zczfze>
- Алабушев А.В., Шишова Е.А., Романюкин А.Е., Ермолина Г.М., Горпиниченко С.И. Происхождение сорго и развитие его селекции. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2017;127(03):281-294. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-127-017> <https://www.elibrary.ru/ylztvj>
- Тимохин А.Ю. Повышение семенной продуктивности сорго сахарного в лесостепи Западной Сибири. Актуальные направления развития аграрной науки в работах молодых учёных: сборник научных статей молодых ученых, посвященный 190-летию опытного дела в Сибири, 100-летию сельскохозяйственной науки в Омском Прииртышье и 85-летию образования Сибирского НИИ сельского хозяйства. Омск: «ЛИТЕРА», 2018. С. 28-33. <https://www.elibrary.ru/ovrdat>
- Юдина В.Н., Болдырева Л.Л. Создание высокосахаристых линий сорго сахарного. Сборник материалов V научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых. Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского. Симферополь, 2019. С. 12-14. <https://www.elibrary.ru/rklnwj>
- Ковтунова Н.А., Ковтунов В.В. Использование сорго и основные направления селекционной работы во ВНИИЗК им. ИГ Калиненко. *Таверический вестник аграрной науки*. 2016;3(7):60-70. <https://www.elibrary.ru/xideul>
- Tsygankova V. The effect of pyrimidine and pyridine derivatives on the growth and productivity of sorghum. *International Journal of Botany Studies*, 2022;7(5):19-31.
- Ковтунова Н.А., Ковтунов В.В. Использование сорго сахарного в качестве источника питательных веществ для человека (обзор литературы). *Зерновое хозяйство России*. 2019;3(63):3-9. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-63-3-3-9> <https://www.elibrary.ru/xwdpxp>
- Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т.1. «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. 646 с.
- Антимонов А.К., Сыркина Л.Ф., Антимонина О.Н. Селекция зернового сорго пищевого направления. *Земледелие*. 2021;(8):28-32.

<https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-8-28-32>

<https://www.elibrary.ru/exedkf>

10. Калужный А.А. Морфо-биологическое изучение коллекции сорго зернового ФГБНУ «АНЦ «Донской». *Зерновое хозяйство России*. 2024;16(5):64-70. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-94-5-64-70> <https://www.elibrary.ru/rdokct>

11. Oktem A., Oktem A.G. Bioethanol obtained from soluble sugars in sweet sorghum, influencing properties and their interrelationships. *Industrial Crops and Products*. 2024;221:119351.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119351>

12. Каменева О.Б., Кибальник О.П., Ефремова И.Г., Семин Д.С., Калинин Ю.А. Сахарное сорго как сахаронос и альтернативный источник биоэнергии (обзор). *АгроЭкоИнфо*. 2021;(48):32.

<https://doi.org/10.51419/20216602>

<https://www.elibrary.ru/yhgask>

13. Бойко В.С., Тимохин А.Ю., Михайлов В.В. Влияние различных условий минерального питания на урожайность семян сорго сахарного в условиях южной лесостепи Западной Сибири. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022;4(60):6-13.

<https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-4-6-13>

<https://www.elibrary.ru/ovhmpv>

14. Мищенко Г.В., Смиловенко Л.А. Оценка районированного, новых сортов и линий сахарного сорго по комплексу хозяйственно ценных признаков. *Фундаментальные исследования*. 2006;(10):80-80. <https://www.elibrary.ru/ijjyap>

15. Кибальник О.П., Ефремова И.Г., Семин Д.С., Пронько В. В., Ерохина А. В. Продуктивность сахарного сорго при использовании гуминовых препаратов в условиях нижнего Поволжья. *Нива Поволжья*. 2020;3(56):3-9.

<https://doi.org/10.36461/NP.2020.56.3.004>

<https://www.elibrary.ru/qtgggy>

16. Кононов В.М., Шевяхова Е.А., Давыдов А.В., Грошев М.С. Состояние и перспективы производства кормов в нижнем Поволжье. *Научно-агрономический журнал*. 2016;1(98):7-11.

<https://www.elibrary.ru/wwwlygx>

17. Титков В.И., Безуглов В.В., Галаяутдинов Р.Х. Сорго ценная страховая кормовая культура Оренбургской области. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2011;2(30):51-53. <https://www.elibrary.ru/nuuqpv>

18. Биктимиров Р.А., Шакирзянов А.Х., Низаева А.А. Экологическая стабильность и пластичность кормового сорго в Республике Башкортостан. *Достижения науки и техники АПК*. 2019;33(8):46-49. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10810>

<https://www.elibrary.ru/wtuctr>

19. Сарсенбаев Б.А. Сорго сахарное перспективная культура многоцелевого использования. *Известия Национальной Академии Республики Казахстан. Серия биологическая и медицинская*. 2014;(3):3-9.
20. Методика Государственного сортоиспытания. М.: Колос. 1975.
21. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

References

1. Okazova Z.P. On the possibility of cultivating sweet sorghum in the North Caucasus. The state and prospects of development of the agro-industrial complex in the South of Russia: collection of reports on the materials of the All-Russian Scientific and practical conference (with international participation), Maikop: IP «Magarin O.G.», 2023. P. 125-128. <https://www.elibrary.ru/zzcfze> (In Russ.)
2. Alabushev A.V., Shishova E.A., Romanyukin A.E., Ermolina G.M., Gorpichenko S.I. Origin of sorghum and development of its breeding. *Polythematic online scientific journal of Kuban state agrarian university*. 2017;127(03):281-294. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-127-017> <https://www.elibrary.ru/ylztvj> (In Russ.)
3. Timokhin A.Yu. Increase of the seed yield of sorghum in the forest-steppe of Western Siberia. Current trends in the development of agricultural science in the works of young scientists: a collection of scientific articles by young scientists dedicated to the 190th anniversary of experimental work in Siberia, the 100th anniversary of agricultural science in the Omsk Irtysh region and the 85th anniversary of the formation of the Siberian Research Institute of Agriculture. Omsk: «LITERA», 2018. P. 28-33. <https://www.elibrary.ru/ovrdat> (In Russ.)
4. Yudina V.N., Boldyreva L.L. Development of high-sugar lines of sweet sorghum. Collection of materials from the 5th scientific and practical conference of faculty, graduate students, undergraduates, and young scientists. Science Days of the Vernadsky Kazan Federal University. Simferopol., 2019. P. 9-14. <https://www.elibrary.ru/rklnwj> (In Russ.)
5. Kovtunova N.A., Kovtunov V.V. The use of sorghum and the main directions of breeding work at the I.G. Kalinenko All-Russian Research Institute of Grain Crops. *Taurida herald of the agrarian sciences*. 2016;3(7):60-70. <https://www.elibrary.ru/xideul> (In Russ.)
6. Tsygankova V. The effect of pyrimidine and pyridine derivatives on the growth and productivity of sorghum. *International Journal of Botany Studies*, 2022;7(5):19-31.
7. Kovtunova N.A., Kovtunov V.V. The use of sweet sorghum as a source of nutritious substances for human (literature review). *Grain economy of Russia*. 2019;3(63):3-9. (In Russ.) <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-63-3-3-9> <https://www.elibrary.ru/xwdxpx>
8. State Register of Breeding Achievements Approved for Use. Vol. 1. "Plant Varieties" (official publication). Moscow: Rosinformagrotekh, 2022. 646 p. (In Russ.)
9. Antimonov A.K., Syrkin L.F., Antimonova O.N. Breeding of food

- grain sorghum. *Agriculture*. 2021;(8):28-32. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-8-28-32> <https://www.elibrary.ru/exedkf> (In Russ.)
10. Kalyuzhnyy A.A. Morpho-biological study of the grain sorghum collection of the FSBSI «ARC «Donskoy». *Grain economy of Russia*. 2024;16(5):64-70. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-94-5-64-70> <https://www.elibrary.ru/rdoct> (In Russ.)
11. Oktem A., Oktem A.G. Bioethanol obtained from soluble sugars in sweet sorghum, influencing properties and their interrelationships. *Industrial Crops and Products*. 2024;221:119351. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119351>
12. Kameneva O.B., Kibal'nik O.P., Efremova I.G., Semin D.S., Kalinin Yu.A. Sugar sorghum as a sugar-bearing and alternative source of bioenergy (review). *AGROECOINFO*. 2021;(48):32. (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/20216602> <https://www.elibrary.ru/yhgask>
13. Bojko V.S., Timoxin A.Yu., Mixajlov V.V. Influence of different conditions of mineral nutrition on yield of sweet sorghum seeds in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2022;4(60):6-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-4-6-13> <https://www.elibrary.ru/ovhmpv>
14. Mishhenko G.V., Smilovenko L.A. The valuing of the division into district, new kinds and lines of sugar sorghum on the complex of the economically valuable indications. *Basic research*. 2006;(10):80-80. <https://www.elibrary.ru/ijiyen> (In Russ.)
15. Kibal'nik O. P., Efremova I. G., Semin D. S., Pron'ko V.V., Erošina A.V. Productivity of sugar sorghum when using humic preparations in the conditions of the lower Volga region. *Niva Povolzhya*. 2020;3(56):3-9. <https://doi.org/10.36461/NP.2020.56.3.004> <https://www.elibrary.ru/qtgggy> (In Russ.)
16. Kononov V.M., Shevaykova E.A., Davydov A.V., Groshev M.S. The state and prospects of fodder production in the Lower-Volga region. *Scientific agronomy journal*. 2016;1(98):7-11. <https://www.elibrary.ru/wwlyrx> (In Russ.)
17. Titkov V.I., Bezuglov V.V., Galyautdinov R.X. Sorgho as a valuable insurance fodder crop in the Orenburg region. *Proceedings of the Orenburg state agrarian university*. 2011;2(30):51-53. <https://www.elibrary.ru/nuukpv> (In Russ.)
18. Biktimirov R.A., Shakirzyanov A.X., Nizaeva A.A. Environmental stability and plasticity of feeding sorghum in the Republics of Bashkortostan. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2019;33(8):46-49. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10810> <https://www.elibrary.ru/wtuctr> (In Russ.)
19. Sarsenbayev B.A. Sorghum sugar perspective culture of multi-purpose use. *News of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Biological and Medical*. 2014;(3):3-9. (In Russ.)
20. Methodology of State Variety Testing. M.: Kolos, 1975. (In Russ.)
21. Dospikhov B.A. Methods of field experience. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p. (In Russ.)

Об авторах:

Анатолий Павлович Чебатареv – младший научный сотрудник, магистрант, <https://orcid.org/0009-0009-3380-8616>, SPIN-код: 9574-7621, автор для переписки, admiral160697@mail.ru

Любовь Федоровна Сыркина – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8773-6691>, SPIN-код: 9680-1300, uristgnu_pniiss@mail.ru

Сталина Владимировна Жаркова – доктор с.-х. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-8410-6715>, SPIN-код: 3579-4063, stalina_zharkova@mail.ru

Александр Борисович Володин – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2944-4241>, SPIN-код: 5874-9728

Елена Николаевна Пшеничникова – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-0732-7407>, SPIN-код: 4620-3205, nlab@mail.ru

About the Authors:

Anatoly P. Chebatarev – Junior Researcher, Master's student, <https://orcid.org/0009-0009-3380-8616>, SPIN-code: 9574-7621, Corresponding Author, admiral160697@mail.ru

Lyubov F. Syrkin – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8773-6691>, SPIN-code: 9680-1300, uristgnu_pniiss@mail.ru

Stalina V. Zharkova – Dr. Sci. (Agriculture), Prof., <https://orcid.org/0000-0001-8410-6715>, SPIN-code: 3579-4063, stalina_zharkova@mail.ru

Alexander B. Volodin – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2944-4241>, SPIN-code: 5874-9728

Elena N. Pshenichnikova – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-0732-7407>, SPIN-code: 4620-3205, nlab@mail.ru

Краткое сообщение / Short communication

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-214-218>
УДК: 635.33:631.531.02(470.67)

Е.Г. Гаджимустапаева*, К.У. Куркиев

Дагестанская опытная станция –
филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр –
Всероссийский институт генетических ресурсов
растений имени Н.И. Вавилова»
368612, Россия,
Республика Дагестан,
р-н Дербентский, с. Вавилово

*Автор для переписки: vir-evg-gajimus@yandex.ru

Финансирование. Работа выполнена в рамках тем НИР FGEM-2022-0003 «Мировые ресурсы овощных и бахчевых культур коллекции ВИР: эффективные пути раскрытия эколого-генетических закономерностей формирования разнообразия и использования селекционного потенциала» и FGEM– 024-008 «Создание конкурентоспособных среднепоздних и поздних гибридов капусты белокачанной с целью импортозамещения».

Вклад авторов: Куркиев К.У.: руководство исследованием. Гаджимустапаева Е.Г.: проведение исследования, создание рукописи и её редактирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гаджимустапаева Е.Г., Куркиев К.У. Особенности семеноводства разных подвидов *Brassica oleracea* L. в условиях южного Дагестана. *Овощи России*. 2025;(6):214-218.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-214-218>

Поступила в редакцию: 27.10.2025

Принята к печати: 12.12.2025

Опубликована: 18.12.2025

Evgeniya G. Gadzhimustapaeva*,
Kishhtili U. Kurkiev

The Dagestan Experimental Station is a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center – All-Russian Institute of Plant Genetic Resources named after N.I. Vavilov Vavilovo village, Derbent district, Republic of Dagestan, 368612, Russia

*Corresponding Author: vir-evg-gajimus@yandex.ru

Funding. This work was supported by research projects FGEM-2022-0003 "World Resources of Vegetable and Melon Crops from the VIR Collection: Effective Ways to Uncover Ecological and Genetic Patterns of Diversity Formation and Utilization of Breeding Potential" and FGEM–024-008 "Creation of Competitive Mid-Late and Late Cabbage Hybrids for Import Substitution."

Authors' Contribution: Kurkiev K.U.: supervision. Gadzhimustapaeva E.G.: investigation, writing – review & editing.

Conflict of interest. The authors declare that there are no conflicts of interest.

For citation: Gadzhimustapaeva E.G., Kurkiev K.U. Features of seed production of different subspecies of *Brassica oleracea* L. in the conditions of southern Dagestan. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):214-218. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-214-218>

Received: 27.10.2025

Accepted for publication: 12.12.2025

Published: 18.12.2025

Особенности семеноводства разных подвидов *Brassica oleracea* L. в условиях южного Дагестана

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Изучение особенностей семеноводства подвидов капусты в благоприятных для беспересадочного метода условиях южного Дагестана является актуальным для получения высококачественного семенного материала отечественных сортов и гибридов для нужд сельхозпроизводителей России.

Цель исследования – определение оптимальных сроков посева для формирования полноценного и качественного урожая семян является основной задачей беспересадочного метода семеноводства капусты в Дагестане.

Материал и методы. Работа проведена на Дагестанской ОС – филиал ВИР, расположенной в южной низменной зоне Дагестана. Материалом послужили сорта и гибриды разных подвидов капусты. Проводили оценку наступления основных фаз развития растений.

Результаты. В результате исследования показаны оптимальные сроки посева семян и высадки рассады для выращивания семян разных подвидов капусты – белокачанной, цветной, брокколи, брюссельской и краснокочанной беспересадочным методом в южном Дагестане, природно-климатические условия которого наиболее благоприятны для ведения семеноводства. Показаны особенности прохождения основных фаз развития в осенний, зимний и весенне-летний периоды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

семеноводство, подвиды капусты, климат, сроки посева, вегетационный период

Features of seed production of different subspecies of *Brassica oleracea* L. in the conditions of southern Dagestan

ABSTRACT

Relevance. Studying the seed production characteristics of cabbage varieties in southern Dagestan, where direct transplantation is favorable, is essential for obtaining high-quality seed material of domestic varieties and hybrids for Russian agricultural producers.

Study Objective – determining the optimal sowing time for the formation of full-fledged reproductive shoots (inflorescences) is the primary objective of direct transplantation of cabbage seed in Dagestan.

Materials and Methods. The study was conducted at the Dagestanskaya Os, a branch of the All-Russian Institute of Plant Research, located in the southern lowlands of Dagestan. The material consisted of varieties and hybrids of different cabbage species.

Results. The study identified optimal seed sowing and seedling planting times for growing different cabbage varieties – white cabbage, cauliflower, broccoli, Brussels sprouts, and red cabbage – directly in southern Dagestan, where the natural and climatic conditions are most favorable for seed production. The study also demonstrated the key development phases during the fall, winter, and spring-summer periods.

KEYWORDS:

seed production, cabbage varieties, climate, sowing times, growing season

Введение

Капуста белокочанная обладает высокой адаптивностью, высокими вкусовыми качествами и такими селекционно-ценными свойствами, как высокая урожайность, транспортабельность и пр. Имеющееся разнообразие сортов и гибридов позволяет наладить круглогодичное обеспечение населения страны свежей продукцией. Отдельно нужно отметить полезные свойства данной культуры, так в соответствии с приказом Министерства здравоохранения РФ №614 от 19 августа 2016 года «Об установлении рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевой продукции, отвечающим требованиям здорового питания», норма потребления капусты на человека в год составляет 40 кг. В нашей стране капуста пользуется большой популярностью и ее возделывают на площади более 60 тыс. га. Российская Федерация является третьим по величине производителем капусты с объемом более 3,0 млн тонн в год.

Семеноводство является основой успешной агрокультуры, гарантирующей получение высоких урожаев. Качество семян играет ключевую роль в обеспечении стабильных урожаев и удовлетворения потребностей населения в качественной продукции. Семеноводство представляет собой важнейшую основу для развития аграрного комплекса любого региона, определяющую качество и продуктивность урожая [1-3].

Дагестан – один из регионов с благоприятными природно-климатическими условиями для выращивания овощных культур% как товарного овощеводства, так и семеноводства. Помимо ведения семеноводства распространенной культуры – капусты белокочанной, большую перспективу имеет выращивание менее распространенных подвидов капусты: краснокочанной, брюссельской, цветной, брокколи [4]. Особый интерес представляет также ведение зимнего овощеводства [5, 6].

Анализ тенденции размещения мирового семеноводства капусты указывает на его концентрацию в зонах, позволяющих использовать беспересадочный способ при подзимней высадке рассады. Это дает возможность максимально снизить затраты на производство F1 гибридных семян. В мире семеноводство капусты сконцентрировано главным образом в субтропических зонах Италии и Франции, в северных районах Индии, на Тихоокеанском побережье и Австралии. Климатические условия сухих субтропиков Дербентского района являются благоприятными для одногодичного беспересадочного семеноводства не только белокочанной, но других подвидов капусты и сравнимы с основными мировыми регионами выращивания семян овощных культур [7, 8]. Общим для этих регионов является наличие теплых зим с минимальной температурой воздуха в пределах от 0 до 7°C, что позволяет проводить осенние высадки рассады и перезимовку растений в поле, где они успешно яровизируются и цветут [9-11].

Изучение особенностей семеноводства подвидов капусты *Brassica oleracea* L. в благоприятных для беспересадочного метода условиях южного Дагестана является актуальным для получения высококачественного семенного материала отечественных сортов и гибридов для нужд сельхозпроизводителей России. Определение оптимальных сроков посева, для формирования полноценного и качественного урожая семян, является основной задачей беспересадочного метода семеноводства капусты в Дагестане.

В конце 2023 года в Российской Федерации началась реализация подпрограммы Федеральной научно-технической программы (ФНТП) развития сельского хозяйства по овощным культурам. Агрофирма «ПОИСК» начала свою работу в подпрограмме импортозамещения овощных культур, в том числе и капусты белокочанной. В связи с этим, актуальным стал вопрос о развитии системы семеноводства на территории России. Одним из исполнителей проекта является Дагестанская ОС – филиал ВИР, которая расположена в уникальной природно-климатической зоне и имеет многолетний опыт в семеноводстве сельскохозяйственных культур [12].

Материал и методы

Опыты проведены на базе Дагестанской ОС – филиала ВИР, где осуществляются работы по сохранению, размножению и изучению сортообразцов и гибридов разных подвидов капусты *Brassica oleracea* L. Исследования проводили с использованием общепринятых методов. Материалом для исследований служили гибриды и сорта разных подвидов капусты, в том числе, отечественной селекции. В последние годы российским овощеводам предлагаются лучшие отечественные селекционные достижения, не уступающие зарубежным аналогам. На данный момент в России имеется несколько учреждений, где успешно ведется селекционная работа по созданию гибридов белокочанной капусты – агрофирма «ПОИСК», Селекционная станция Н.Н. Тимофеева, ФГБНУ ФНЦО и др. Ведется работа по организации демонстрационных площадок для ознакомления сельхозпроизводителей с новейшими отечественными достижениями.

По климатическим особенностям территория Южного Дагестана, где расположена Дагестанская ОС – филиал ВИР, относится к агроклиматическому району с сухим субтропическим климатом, который характеризуется мягкой непродолжительной зимой, прохладной затяжной весной, сухим и жарким летом, влажной осенью. Близость моря, искусственное орошение обуславливают постоянно высокую относительную влажность воздуха, которая в самом жарком месяце – июле, как правило, не ниже 67%. В целом условия места проведения исследований являются весьма благоприятными для роста и развития растений при выращивании на семена беспересадочным методом.

Результаты

Семеноводство капусты, в зависимости от подвида, обладает рядом специфических особенностей, которые необходимо учитывать при выращивании беспересадочным методом.

Особенностью выращивания семян капусты белокочанной является то, что она двулетняя перекрестно-опыляемая культура. Вести семеноводство можно двумя способами: пересадочным и беспересадочным. При пересадочном – в первый год выращивают маточный материал, на зиму их закладывают на хранение, весной высаживают в поле и осенью получают семена. Это основной способ выращивания в селекционном процессе и при выращивании элитного и линейного материала, т.к. есть возможность проводить отборы, соответствующие требованиям селекции или первичного семеноводства. При беспересадочном – в первый год в середине лета высевать семена, в конце лета – начале осени высаживают рассаду в поле, где растения и зимуют. Весной возобновляется вегетация, созревание

Таблица 1. Оптимальные сроки посева семян и высадки рассады подвидов капусты для семеноводства, ДОС ВИР
Table 1. Optimal timing for sowing seeds and planting seedlings of cabbage species for seed production, DOS VIR

Вид	Позднеспелая		Среднеспелая		Ранняя	
	посев	высадка рассады	посев	высадка рассады	посев	высадка рассады
Белокочанная	15-20.07	25.08-05.09	01-05.08	15-25.09	10-15.08	25-30.09
Краснокочанная	01-05.08	15-20.09	-	-	-	-
Цветная, брокколи	25.07-05.08	05-10.09	20-25.08	05-10.10	05-10.09	05-10.11
Брюссельская	25-30.07	10-15.09	-	-	-	-

наступает летом (рис. 1 и 2). За время выращивания проводится несколько сортовых прочисток и апробация. Беспересадочный метод более экономичный.

Одним из основных факторов, определяющих урожайность и качество семян, который необходимо учитывать при выращивании семенников капусты беспересадочным методом – это сроки посева. В зависимости от длины вегетационного периода сорта или гибрида капусты, для перехода из вегетативного состояния в генеративное растению необходимо воздействие определенного количества пониженных температур в течение определенного периода, продолжительность которого определяется биологическими особенностями сорта, возрастом растения и условиями среды. В таблице 1 представлены оптимальные сроки для посева семян и высадки рассады в условиях Дербентского района.

Оптимальные условия для прохождения стадии яровизации капусты отмечены при температуре 5...8°C. При низких положительных температурах растения переходят в состояние покоя, и процессы морфогенеза приостанавливаются.

В Дербентском районе РД все стадийные процессы проходят в короткий период (осенний и ранней весной). Растения капусты осенью и ранней весной наращивают определенное количество листьев, они должны иметь хорошо развитых 16-20 шт. листьев (ассимиляционный аппарат). В конце марта – начале апреля начинается процесс формирования продуктивного органа. Цветение начинается в конце мая. Созревают семенники в конце июня начале июля. Вегетационный период от всходов до уборки у позднеспелых сортов и гибридов капусты белокочанной длится почти год – 300-330 дней. За период вегетации проводится несколько сортовых прочисток и апробация.

В семеноводстве одним из критических периодов является время от посадки рассады до отрастания и бутонизации у капусты. В это время происходит развитие корневой системы, наращивание листьев, что требует оптимального водообеспечения и минерального питания, для обеспечения высокой продуктивности и качества семян. Для нормального роста и развития капусты на протяжении всего вегетационного периода большое значение



Рис. 1. Семенники гибрида белокочанной капусты (фаза бутонизации)
Fig. 1. Seed plants of a white cabbage hybrid (budding phase)



Рис. 2. Семенники белокочанной капусты (фаза цветения)
Fig. 2. White cabbage seed plants (flowering phase)

имеет обеспеченность растений влагой. Растения хорошо растут и развиваются, если относительная влажность воздуха составляет от 80-90%. Влажность почвы в пределах 75-80% НВ. Немаловажное значение при выращивании семян является применение сбалансированных удобрений с оптимальным содержанием аминокислот, которые способствуют повышению урожайности, улучшению качества плодов и увеличению устойчивости растений к различным факторам стресса.

Одной из основных проблем при выращивании семян капусты является поражение болезнями и вредителями. Особенно вредоносными являются те, которые вызывают уменьшение урожайности и ухудшение качества семян. В этой связи необходимо изучение влияния различных препаратов на болезни и вредителей капусты.



Рис. 3. Капуста цветная (цветение)
Fig. 3. Cauliflower (flowering)

Таблица 2. Фазы развития у позднеспелых сортов и гибридов разных подвидов капусты
Table 2. Development phases of late-ripening varieties and hybrids of different types of cabbage

Виды	Дата высадки	Формирование продуктивного органа		Дата цветения		Созревания	Вегетационный период
		10%	75%	10%	75%		
Белокочанная	01-05.09	01-10.03	10-25.03	10-20.05	15-25.05	25-30.06.	320-340
Краснокочанная	15-20.09	10-15.03	20-25.03	15-20.05	20-30.05	01-10.07	300-320
Брюссельская	10-15.09	15-20.01	5-15.03	5-15.05	5-25.05	01-10.07	300-320
Цветная	5-15.09	1-25.03	01-10.04	10-15.04	15-25.04	15-25.06	270-330
Брокколи	10-20.09	20-25.03	30.03-5.04	5-15.04	10-20.04	15-25.06	270-330

Семеноводство капусты цветной и брокколи – весьма трудоемкий и сложный процесс, зависящий от ряда факторов: наличие исходного материала с хорошими селекционно-генетическими признаками; сроков и способов посева; продолжительности межфазных периодов; устойчивости к болезням; почвенно-климатических условий.

Успешное ведение семеноводства капусты цветной и брокколи зависит от тщательности выполнения всех агроприемов, применяемых при выращивании товарной продукции, хорошие семена можно получить лишь от растений, которые дают высокотоварные здоровые продуктивные органы с хорошо развитыми неповрежденными листьями.

Одним из критических моментов в семеноводстве является повышенная температура. При температуре выше 25°C проходит процесс абортации у капусты цветной, у растений не формируется головка и цветочные побеги, а проходит нарастание листовой розетки (отмечено 43 шт. листьев).

У капусты цветной и брокколи вегетационный период от посева до созревания семян в зависимости от зоны выращивания и сорта: у скороспелых сортов колеблется

от 200-240 суток, у позднеспелых – 270-330 суток в южных районах выращивания (табл. 2). В Дербентском районе рассаду выращивают в открытом грунте передвигая сроки посева и высадки в зависимости от группы спелости сорта и культуры.

В фазе роста и развития растений в весенний период требуется полив и подкормка удобрениями для нарастания листовой розетки. Учитывая высокую требовательность к влажности почвы и воздуха, семенные растения капусты необходимо поливать во время формирования продуктивного органа, соцветий, цветения и налива семян.

Техническая спелость головок наступает в конце марта – апреле – и до I декады мая. Время образования хозяйственно годных головок от начала до массового созревания у некоторых сортов и гибридов капусты цветной растягивается на 13-81 суток. Далее наступает фаза цветения, которая у капусты цветной и брокколи растянута.

Агротехника семеноводства капусты брюссельской и краснокочанной в целом не отличается от семеноводства капусты белокочанной. Посев семян производят в те же сроки, что и для продовольственных целей. Рассада высаживается по схеме 70 x 50 см осенью. Ранней весной начинается уход за семенниками. Отбирают хорошо развитые, правильно сформировавшиеся растения с крупными и плотными кочанчиками. В апреле у растений обре-

зают нижние боковые листья, оставляя верхние листья, черешки на 2 см выше кочанчиков для проветривания снизу воздухом. Проводится подкормка, поливы, окуливания растений, борьба с сорняками и вредителями. Созревшие семенники скашивают и складываются в маленькие валки на поле, где плоды дозариваются за 3-5 суток. Нужно отметить низкую урожайность семян у капусты краснокочанной.

Заключение

Таким образом, климатические условия южного Дагестана позволяют вести семеноводство основных подвидов капусты. В результате исследования определены оптимальные сроки посева семян и высадки рассады для выращивания семян разных подвидов *Brassica oleracea* L. – белокочанной, цветной, брокколи, брюссельской и краснокочанной беспересадочным методом в южном Дагестана, природно-климатические условия которого наиболее благоприятные для ведения семеноводства. Показаны особенности прохождения основных фаз развития растений разных подвидов капусты в осенний, зимний и весенне-летний периоды.

• Литература

1. Солдатенко А.В., Пивоваров В.Ф., Пышная О.Н., Гуркина Л.К., Пинчук Е.В. Селекция и семеноводство овощных культур – на инновационный путь развития. *Овощи России*. 2023;(1):5-13. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-1-5-13>
<https://www.elibrary.ru/wzovbp>
2. Разин А.Ф., Иванова М.И., Мещерякова Р.А., Разин О.А. Современное состояние овощеводства России. *Экономика сельского хозяйства России*. 2016;(7):49-54. <https://www.elibrary.ru/wkgqtb>
3. Дербенский В.И., Леунов В.И., Монахос Г.Ф., Резвый Г.И. Опыт прошлого – на службу современному семеноводству овощных культур. *Картофель и овощи*. 2024;(2):45-51. <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.86.11.006>
<https://www.elibrary.ru/mrztqy>
4. Кораблев Ю.Н., Цыганок Н.С., Бондарева Л.Л. Краткие методические указания по одногодичному выращиванию семян белокочанной, краснокочанной, савойской, декоративной капусты и кольраби в условиях Дербентского района Республики Дагестан. М., 1998. 11 с.
5. Гаджимустапаева Е.Г. Перспектива новых гибридов капусты цветной и расширение зоны их возделывания в Дагестане. *Аграрная Россия*. 2014;(12):14–17. <https://www.elibrary.ru/taiffh>
6. Гаджимустапаева Е.Г. Новые линии капусты цветной для северных сухих субтропиков Дагестана. *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. 2024;(1):44-48. <https://doi.org/10.31857/S2500208224010102>
<https://www.elibrary.ru/tceiuc>
7. Монахос Г.Ф., Пацурия Д.В. Биологическое и генетическое обоснование технологии беспересадочного выращивания семян F гибридов белокочанной капусты в условиях Субтропиков. Доклады ТСХА. 1997;(268):241-244.
8. Баутин В.М., Монахос Г.Ф. Экономическая эффективность селекции и семеноводства F₁ гибридов капусты белокочанной. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2013;(2):107-116. <https://www.elibrary.ru/pzxfjf>
9. Монахос Г.Ф., Крючков А.В., Монахос С.Г., Пацурия Д.В., Воробьева Н.Н., Лежнина А.А., Судденко В.Г. Размножение самонесовместимых линий капусты и технология беспересадочного семеноводства гибридов капусты: метод. рекомендации. М.: Изд-во РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2009. 64 с.
10. Гусейнов Ю.А., Велижанов Н.М., Казбеков А.Б. Беспересадочное семеноводство сортов и F₁ гибридов капусты в условиях субтропиков Дагестана. *Горное сельское хозяйство*. 2016;(3):148-151. <https://www.elibrary.ru/xddvbd>
11. Сирота С.М., Бондарева Л.Л., Велиев К.Н. Выращивание семян капусты беспересадочным способом в условиях Дербентского района Республики Дагестан. *Овощи России*. 2019;4(48):21-24. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-4-21-24>
<https://www.elibrary.ru/ybiodt>
12. Куркиев К.У., Гаджимогомедова М.Х. Перспективы развития семеноводства белокочанной капусты в Республике Дагестан. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(4):246-251. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-4-246-251>
<https://www.elibrary.ru/gnnikc>

• References

1. Soldatenko A.V., Pivovarov V.F., Pyshnaya O.N., Gurkina L.K., Pinchuk E.V. Selection and seed production of vegetable crops – on an innovative path of development. *Vegetable crops of Russia*. 2023;(1):5-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-1-5-13>
<https://www.elibrary.ru/wzovbp>
2. Razin A.F., Ivanova M.I., Meshcheryakova R.A., Razin O.A. The Current State of Vegetable Growing in Russia. *Economics of Agriculture of Russia*. 2016;(7):49-54. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/wkgqtb>
3. Derbenskiy V.I., Leunov V.I., Monakhos G.F., Rezvyj G.I. Experience of the past – at the service of modern seed production of vegetable crops. *Potato and vegetables*. 2024;(2):45-51. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2024.86.11.006>
<https://www.elibrary.ru/mrztqy>
4. Korablyov Yu.N., Tsyganok N.S., Bondareva L.L. Brief guidelines for one-year cultivation of seeds of white cabbage, red cabbage, Savoy cabbage, ornamental cabbage and kohlrabi in the conditions of the Derbent district of the Republic of Dagestan. Moscow, 1998. – 11 c.
5. Gadzhimustapaeva E.G. Prospects for new cauliflower hybrids and expansion of their cultivation zone in Dagestan. *Agrarian Russia*. 2014;(12):14–17. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/taiffh>
6. Gadzhimustapaeva E.G. New lines of cauliflower for Dagestan north arid subtropics. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2024; (1) 44-48. (In Russ.)
7. Monakhos G.F., Patsuriya D.V. Biological and genetic substantiation of the technology of non-transplanted cultivation of F hybrid white cabbage seeds in the subtropical conditions. *Doklady TSKHA*. 1997; (268): 241-244. (In Russ.)
8. Bautin V.M., Monakhos G.F. Economic efficiency of breeding and seed production of F₁ hybrids of white cabbage. *Izvestiya of Timiryazev agricultural academy*. 2013;(2):107-116. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/pzxfjf>
9. Monakhos G.F., Kryuchkov A.V., Monakhos S.G., Patsuriya D.V., Vorob'yeva N.N., Lezhnina A.A., Suddenko V.G. Reproduction of self-incompatible cabbage lines and technology of direct seed production of cabbage hybrids: methodological recommendations. Moscow: Publishing house RGAU - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2009 г. 64 с. (In Russ.)
10. Guseynov YU.A., Velizhanov N.M., Kazbekov A.B. Direct seed production of cabbage varieties and F₁ hybrids in the subtropics of Dagestan. *Mountain agriculture*. 2016;(3):148-151. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/xddvbd>
11. Sirota S.M., Bondareva L.L., Veliev K.N. Direct seed farming of cabbage in Derbent district of Republic of Dagestan. *Vegetable crops of Russia*. 2019;(4):21-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-4-21-24>
<https://www.elibrary.ru/ybiodt>
12. Kurkiev K.U., Gadzhimagomedova M.Kh. Prospects for the development of white cabbage seed production in the Republic of Dagestan. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2024;185(4):246-251. (In Russ.) <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-4-246-251>
<https://www.elibrary.ru/gnnikc>

Об авторах:

Евгения Гусейновна Гаджимустапаева – доктор с.-х. наук, старший научный сотрудник, автор для переписки, vir-evg-gajimus@yandex.ru
Куркиев Киштили Уллубиевич – доктор биол. наук, директор Дагестанской ОС – филиала ВИР, SPIN-код: 5878-1246

About the Authors:

Evgeniya G. Gadzhimustapaeva – Dr. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Correspondence Author, vir-evg-gajimus@yandex.ru
Kishhtili U. Kurkiev – Dr. Sci. (Biology), Director, SPIN-code: 5878-1246

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-219-224>
УДК:

Д.В. Шуляк¹, В.А. Калягин¹, Д.М. Бенин²,
Х.А. Абдулмажидов^{2*}, Н.В. Гавриловская²

¹ООО «ВИННЕРЪ»
346787, Россия, Ростовская область,
г. Азов, Красногоровская ул., д. 19, офис 22

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева)
127550, Россия, г. Москва,
ул. Прянишникова, д. 19

*Автор для переписки: hamzat72@mail.ru

Вклад авторов: Шуляк Д.В.: проведение исследований, сбор и формальный анализ данных, визуализация, написание рукописи; Калягин В.А.: методология, курирование данных; Бенин Д.М., Абдулмажидов Х.А., Гавриловская Н.В.: концептуализация, ресурсы, руководство исследованием, редактирование рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шуляк Д.В., Калягин В.А., Бенин Д.М., Абдулмажидов Х.А., Гавриловская Н.В. Влияние планировки почвы сельскохозяйственного поля на почвенные условия по влажности. *Овощи России*. 2025;(6):219-224.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-219-224>

Поступила в редакцию: 21.04.2025

Принята к печати: 25.08.2025

Опубликована: 18.12.2025

Dmitry V. Shulyak¹, Vitaly A. Kalyagin¹,
Dmitry M. Benin², Khamzat A. Abdumazhidov^{2*},
Nadezhda V. Gavrilovskaya²

¹WINNER LLC
Krasnogorovskaya street, 19, office 22,
Azov, Rostov region, 346787, Russia

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy)
Pryanishnikova str., 19, Moscow, 127550, Russia

*Correspondence: hamzat72@mail.ru

Authors' Contribution: Shulyak D.V.: research, data collection and formal analysis, visualization, writing a manuscript; Kalyagin V.A.: methodology, data supervision; Benin D.M., Abdumazhidov Kh.A., Gavrilovskaya N.V.: conceptualization, resources, research management, manuscript editing.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Shulyak D.V., Kalyagin V.A., Benin D.M., Abdumazhidov Kh.A., Gavrilovskaya N.V. Influence of soil leveling in an agricultural field on soil conditions in terms of moisture. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):219-224. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-219-224>

Received: 21.04.2025

Accepted for publication: 25.08.2025

Published: 18.12.2025

Влияние планировки почвы сельскохозяйственного поля на почвенные условия по влажности

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Цель исследования заключается в определении влияния операций планировки почвы сельскохозяйственного поля на почвенные условия по влажности.

Методы. Основными методами исследований, использованными в работе, были: а) измерение; б) сравнение, в) моделирование, г) анализ. Для обеспечения высоких урожаев сельскохозяйственных культур необходимо поддерживать оптимальные уровни для растений по водному, воздушному и питательному режимам. Для анализа состояния поля в работе были применены принципы GPS технологий, которые в плане оценки, а также повторного исследования выгодно отличаются от лазерных технологий.

Результаты. Сельскохозяйственное поле с неровной поверхностью имеет понижения и повышения уровней. Очевидно, что влага будет накапливаться в понижениях. Отсюда следует, что на повышениях будет наблюдаться нехватка влаги для растений, а на понижениях – избытки. Для исключения таких проблем выполняется планировка полей. Возможной негативной составляющей при планировке поверхности сельскохозяйственного поля является срезание почвенного слоя и оголение, и при этом нижних слоев, плодородность которых значительно ниже. В статье представлены результаты исследований сельскохозяйственных полей, на которых выполняется планировка. Планировка полей призвана для повышения урожайности, которая обеспечивается равномерным распределением оросительной воды по всей площади, обеспечивая при этом все растения требуемым количеством влаги на весь период вегетации. В заключении определена важность рассмотрения влияния срезаемой рабочим органом планировщика толщины плодородного слоя почвы на урожайность сельскохозяйственной культуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

мелиоративные системы, планировка полей, поверхность поля, плодородный слой, скрепер-планировщик, GPS технологии

Influence of soil leveling in an agricultural field on soil conditions in terms of moisture

ABSTRACT

Relevance. The purpose of the study is to determine the effect of soil leveling operations of an agricultural field on soil conditions in terms of moisture.

Methods. The main research methods used in the work were: a) measurement; b) comparison, c) modeling, d) analysis. To ensure high yields of crops, it is necessary to maintain optimal levels for plants in terms of water, air and nutrient regimes. To analyze the state of the field, the principles of GPS technologies were applied in the work, which in terms of evaluation, as well as re-examination, compare favorably with laser technologies.

Results. An agricultural field with an uneven surface has lowering and rising levels. Obviously, moisture will accumulate in depressions. It follows that there will be a lack of moisture for the plant at elevations, and excess at depressions. To eliminate such problems, the layout of the fields is carried out. A possible negative component in the planning of the surface of an agricultural field is the cutting of the soil layer and denudation, and at the same time the lower layers, the fertility of which is much lower. The article presents the results of studies of agricultural fields on which planning is carried out. Field planning is designed to increase yields, which is provided by the uniform distribution of irrigation water over the entire area, while providing all plants with the required amount of moisture for the entire growing season. In conclusion, the importance of considering the influence of the thickness of the fertile soil layer cut by the working body of the planner on the yield of the agricultural crop is determined.

KEYWORDS:

reclamation systems, field planning, field surface, fertile layer, scraper-leveler, GPS technologies

Введение

Планировка сельскохозяйственных полей – это весьма важный технологический процесс, повышающий урожайность выращиваемой культуры за счет обеспечения строгой горизонтальности участка. Ровное поле поддерживает необходимые для культуры водный, воздушный и питательные режимы [1-3]. Кроме того, строго горизонтальная поверхность наиболее эффективна для механизации всего процесса. Подтверждением необходимости проведения планировки является то, что при орошении растение, находящееся на склоне, страдает от нехватки влаги, а растения на понижениях – от избытка воды и нарушения воздушного режима [4-6]. Очевидно, что на строго горизонтальной поверхности поля все растения будут получать одинаковое требуемое количество влаги в течение всего периода вегетации. Для планировки сельскохозяйственных полей могут быть применены длиннобазовые или короткобазовые планировщики с автоматическим управлением, кроме того, применяются скрепер-планировщики. Рабочим органом длиннобазового планировщика является бездонный ковш под рамой. При движении бездонный ковш своей режущей кромкой срезает грунт на повышениях, заполняется грунтом, образующим призму волочения внутри и перед ковшем. Далее грунт из призмы заполняет понижения и разравнивается ковшом. Качество планировки у длиннобазовых планировщиков выше по сравнению с короткобазовыми, однако они уступают в плане маневренности. В связи с этим наибольшее часто в настоящее время используются универсальные скрепер-планировщики.

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в определении влияния операций планировки почвы сельскохозяйственного поля на условия влажности.

Для достижения данной цели решены задачи по определению:

- естественно-производственных условий эксплуатации сельскохозяйственного поля и его характеристик с применением принципов GPS технологий;
- неровностей поверхности поля топографической съемкой с помощью системы нивелирования «Горизонт» и результатов съемки с обработкой в системе WM-Form разработанной компанией Trimble;
- коэффициента срезания почвенного слоя;
- производительности скрепера планировщика;
- спектральной плотности выравниваемой планировщиком поверхности поля с оценкой состояния и глубины почвенного слоя с помощью агрегата для снятия проб почвы «Робопроб».

Методы исследования

Объектом исследований явились сельскохозяйственные площади в 27,7 га (координаты центральной точки 57°18'57.5" с. ш., 39°18'55.3" в. д., средняя высота над уровнем моря 102 м) для выращивания салата агропредприятия ООО «Красный Маяк», расположенные в Ростовском районе Ярославской области. На сельскохозяйственном поле (рис. 1) проводится орошение дождеванием с помощью дождевальной машины кругового действия Valley.

Основными методами исследований, использованными в работе, были: а) измерение; б) сравнение, в) моделирование, г) анализ.

Для анализа состояния поля в работе были применены принципы GPS технологий, которые в плане оценки, а также повторного исследования выгодно отличаются от лазерных технологий. Значительная часть поля до планировки имела средние значения по высоте над уровнем моря в пределах от 102 до 102,4 м. После планировки для данного участка поля значения оказались близки к 102,2 м.



Рис. 1. Исследуемое поле для выращивания салата
Fig. 1. Study field for growing lettuce

Технология проведения выравнивания поля требует выполнения предварительной съемки для оценки и планирования объемов работ. Топографическая съемка проводилась с помощью системы нивелирования «Горизонт». Данная система позволяет снимать высотные отметки в местной локальной системе координат по осям X, Y, Z с точностью до 2 см.

Полученные результаты съемки обрабатывали в системе WM-Form, разработанной компанией Trimble. Система WM-Form создает цифровую модель, на основании которой формируется высокоточная объемная (рельефная) поверхность поля. Перечисленные системы в дальнейшем могут быть использованы для контроля качества выполненных планировочных работ.

Результаты и обсуждение

Программное обеспечение позволяет моделировать осадки и сохранение влаги при изменении горизонтального угла, отсчитываемого между заранее выбранным направлением (например, северным) и направлением на заданный предмет для посадки и обработки почвы.

При этом создается новая поверхность поля с минимальным перемещением почвы в период планировки, и, которая будет соответствовать наилучшим условиям для выращивания сельскохозяйственной культуры.

На рисунке 2 представлены виды состояния исследуемого поля до и после планировочных работ.

Очевидно, что процесс проведения планировки поля включает в себя операции срезания почвы на повышениях поверхности поля и перемещение их на участки с понижением [7-9]. При этом в процессе работы планировщика или

скрепера-планировщика на тех участках с повышениями, где происходит срез почвенного плодородного слоя толщиной 25-40 см возможно «оголение» подпочвенных переходных слоев, которые не обладают таким же количеством питательных веществ как в верхнем почвенном плодородном слое [10-12].

Возникновение таких «островков» при планировке может отразиться на качестве и урожайности культуры. Здесь исследователи сталкиваются с тем, что с одной стороны для повышения урожайности проводится планировка и выравнивание сельскохозяйственного поля, а с другой стороны в процессе планировки формируются участки поля, на поверхность которых выходит подпочвенный грунтовый слой.

Работы по изучению влияния планировки и выравнивания плодородного слоя на равномерность формирования зеленой биомассы были проведены в рамках настоящего исследования. Они заключались в предварительной оценке площадей участков поля, где произошло «оголение» грунтов, и сравнении равномерности распределения биомассы на них с данным показателем на участках с ненарушенным плодородным почвенным слоем.

Условно количество и площадь «островков» можно оценить коэффициентом срезания почвенного слоя K_n , который определяется отношением суммарной площади S_o оголенных участков (островков) к общей площади поля S .

$$K_n = \frac{\sum S_o}{S},$$

где S_o – суммарная площадь оголенных участков, м²;
 S – общая площадь поля, м².

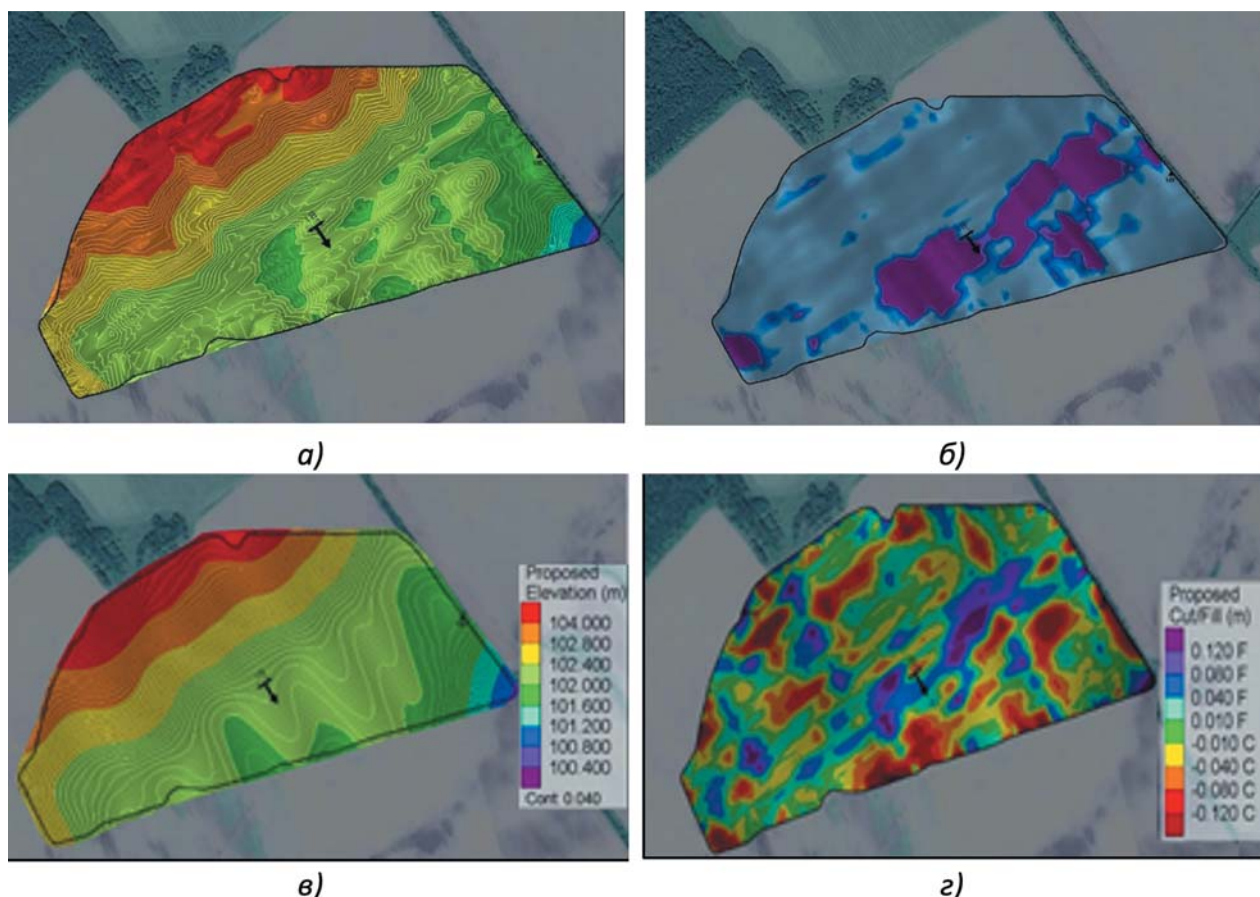


Рис. 2. Состояние выравниваемого поля: а) топографическая съемка до планировки; б) карта вымоков до планировки; в) топографическая съемка после планировки; г) карта выемок и отсыпок
 Fig. 2. Condition of the leveled field: a) topographic survey before planning; б) map of soaks before planning; в) topographic survey after planning; г) Map of cuts and fillings

Очевидно, что лучшая ситуация для обеспечения высоких урожаев будет складываться при отсутствии оголенных грунтовых участков поля. Однако этот вопрос, с учетом проведенных планировочных работ, требует уточнения.

Для выяснения влияния переноса почвенного слоя на равномерность формирования зеленой биомассы сельскохозяйственной культуры предварительно была получена картограмма поля с оголенными участками (рис. 2, г) с коэффициентом $K_{\text{п}}=0,3$ и картограмма поля с выращенной сельскохозяйственной культурой (рис. 3). Коэффициент $K_{\text{п}}=0,3$ означает, что выравненной поле имеет 30% «оголенных» участков поля, на которых урожайность с учетом низкого содержания питательных веществ для культуры возможно будет ниже.

Несмотря на то, что выполняется планировка со срезанием плодородного слоя, снимки NDVI (Normalized difference vegetation index – нормализованный вегетационный индекс, числовой показатель качества и количества растительности на участке поля) [12] показывают, что есть улучшение водно-воздушного режима и нет критичного отсутствия зеленой массы урожая в местах среза грунта.

Такое состояние сельскохозяйственной культуры можно объяснить эффективностью планировки поля, отсутствием строгой переходной границы между плодородным слоем и низ лежащими слоями грунта, что «не совсем лишает» культуру питательных веществ. Таким образом, сравнение двух картограмм показало равномер-

ность распределения зеленой биомассы по всему выравненному полю независимо от наличия «оголенных островков».

Программа позволяет также оптимизировать распределение воды по поверхности поля. При высокой степени выравнивания поля исключаются участки с большим количеством воды на поверхности, это способствует равномерному распределению по всему полю. По величине выровненности поля в последующем можно прогнозировать урожайность, что позволяет формировать дифференцированные карты урожайности, которые можно учитывать в последующие годы. Кроме того, имеется возможность определять участки поля с возможными очагами заболеваний.

Графоаналитические характеристики полученной новой поверхности можно сохранить в качестве отдельных файлов в систему управления базового трактора землеройно-транспортной машины. Наличие координат по площади и высоте поля позволяет системе управления рабочим органом скрепера планировщика сравнивать координаты понижений или повышений с расположением отвального рабочего органа в пространстве и управлять им по высоте в соответствии с координатами Z.

Формирование новой поверхности поля в рассматриваемом примере осуществляется скрепер-планировщиком. Работа его заключается в выполнении операций среза участков повышения и перемещения с выравниванием на участки понижений.

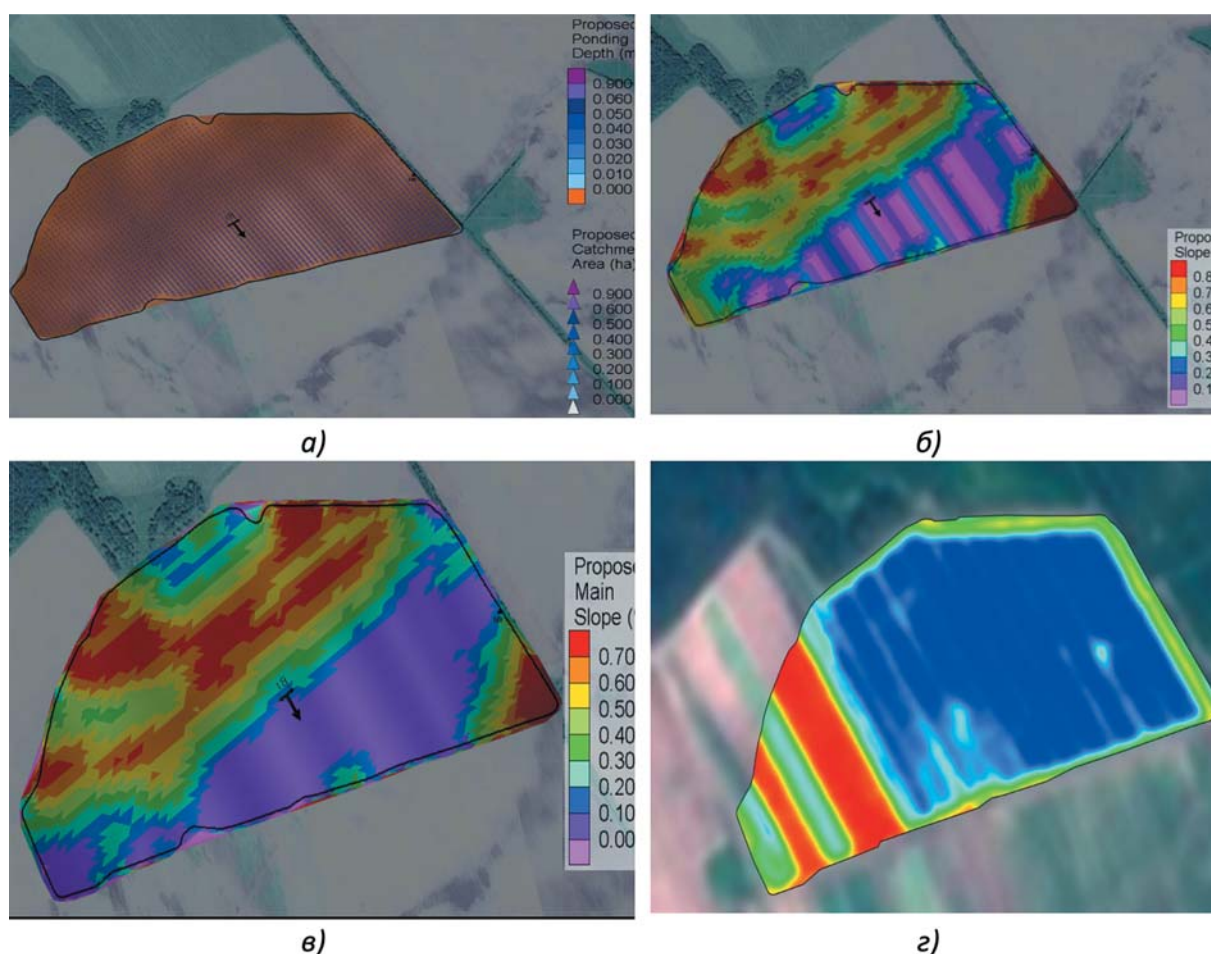


Рис. 3. Исследование поля в системе NDVI: а) величина глубины заболачивания; б) карта среза плодородного слоя поля с максимальными значениями; в) карта среза плодородного слоя поля с минимальными значениями; г) картограмма поля с выращенной культурой, снимок поля исследуемого поля с NDVI
Fig. 3. Field study in the NDVI system: a) the value of the depth of swamping; b) a cross-section map of the fertile layer of the field with maximum values; c) a cross-section map of the fertile layer of the field with minimum values; d) cartogram of the field with the grown crop, a snapshot of the field under study with NDVI;

Наибольший интерес представляет топографическая съемка до планировки и после планировки. На фото до планировки видны островки с понижениями, на фото после планировки они ликвидированы с общим понижением на юго-восток. При этом диапазон изменения высотных отметок находится в пределах от 100,4 до 104 м на все исследуемое поле, причем максимальное снижение сконцентрировано в правом нижнем углу.

Применение лазерной технологии при выравнивании поля имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам можно отнести возможность получения точных результатов по поверхности поля, а к недостаткам относится значительные затраты времени и ресурсов при работе.

Планировка поверхности поля производится такими машинами как скреперы, длиннобазовые и короткобазовые планировщики. Наибольшее распространение в настоящее время находят скреперы, это связано с их универсальностью. Производительность скрепера определяется по формуле:

$$P = \frac{V \cdot K_v \cdot K_n}{K_p \cdot T_{\text{ц}}}$$

где V – вместимость ковша, м³;
 K_v – коэффициент использования машины по времени;
 K_n – коэффициент наполнения ковша;
 K_p – коэффициент разрыхления грунта;
 $T_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла работы скрепера, определяемая суммой

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{наб}} + t_{\text{гр}} + t_{\text{пор}} + t_{\text{разгр}} + t_{\text{перекл}},$$

где $t_{\text{наб}}$ – время набора грунта, мин;
 $t_{\text{гр}}$ – время груженого хода;
 $t_{\text{пор}}$ – время порожнего хода, мин;
 $t_{\text{разгр}}$ – время разгрузки ковша, мин;
 $t_{\text{перекл}}$ – время переключения передач, мин.

Работа планировщиков по выравниванию поверхности рисового чека может быть описана следующей формулой [13]:

$$S2 = SA^2$$

где $S2$ – спектральная плотность выравниваемой планировщиком поверхности поля в виде двумерной матрицы;

S – спектральная плотность поверхности участка поля после одного прохода планировщика представленная также в виде двумерной матрицы;

A – амплитудно-частотная характеристика планировщика, представленная в виде квадратной диагональной матрицы.

Используемая в формуле спектральная плотность базирующееся на преобразовании Фурье связана с рассмотрением и съемкой выравниваемого прямоугольного поля как с его длинной, так и с короткой стороны. Такое рассмотрение позволяет оценивать чередующееся множество понижений и повышений поверхности с максимальными и минимальными их значениями.

Однако из существующих схем вертикальной съемки поверхности поля (типовая петлевая съемка; экспресс-съемка: а) диагонально перекрестный маршрут, б) дважды перекрестный маршрут) такое рассмотрение подходит только для петлевой съемки, когда оценка проводится по параллельным сторонам поля.

Плодородный слой поверхности выравниваемого слоя имеет разную толщину, поэтому одной из возможных проблем, с которыми могут столкнуться сельхозпроизводители при выравнивании сельскохозяйственного поля, является срезание, перенос и удаление верхнего плодородного слоя почвы с оголением нижнего грунтового пласта. Это отражается на урожайности выращиваемой культуры.

В таких случаях можно проводить оценку глубины плодородного слоя по всему участку применением машин для оценки почв. Таким агрегатом является «Робопроб», представляющий собой самоходный мини-вездеход с автоматическими рабочим устройством и системой управления, перемещающийся на гусеничном ходу, снабженный буровым рабочим оборудованием, отбирающим пробы почвы и грунта на глубину до 0,5 м. Он перевозится любым автомобильным транспортом на прицепе. В поле машина передвигается самостоятельно по маршруту. Применение таких машин позволит контролировать и поддерживать оптимальную глубину плодородного слоя при проведении работ по выравниванию сельскохозяйственного поля.

По проведенному анализу задач выравнивания поверхности сельскохозяйственных полей можно сделать выводы о том, что:

- выравнивание поверхности может значительно повышать урожайность сельскохозяйственных культур;
- наибольшее применение в процессе выравнивания находят машины с системами автоматического управления рабочим оборудованием;
- для оценки состояния планируемого участка рекомендуется применять методы статистического исследования высотных отклонений неровностей от нулевой поверхности;
- для исследования плодородного слоя выравниваемого участка с целью его сохранения рекомендуется применять роботизированную машину «Робопроб».

Выводы

1. Несмотря на то, что произведена планировка поля со срезанием плодородного слоя, снимки NDVI подтверждают наличие улучшения водно-воздушного режима и отсутствие сокращения зеленой массы-урожая в местах среза грунта.

2. Улучшение достигнуто за счет качественной планировки поля, отсутствия строгой переходной границы между плодородным слоем и низлежащими слоями грунта, что не лишает культуру питательных веществ.

3. Исследования подтверждают, что в рассмотренных условиях высокая урожайность выращиваемой культуры в большей степени зависит от качественно выполненной планировки поверхности поля и в меньшей степени от наличия участков с «оголенными» грунтами. Выявлено оптимальное значение коэффициента срезания почвенного слоя.

4. Способ планировки выравнивания полей на основе использования GPS по сравнению с другими методами не требует больших временных и материальных затрат. Определена производительность скрепера-планировщика.

5. Для оценки состояния и глубины плодородного слоя целесообразно применять самоходный агрегат «Робопроб», способный исследовать всю площадь сельскохозяйственного поля.

• Литература

1. Крутько С.М., Саквенков К.М., Тиво П.Ф., Высоцкая М.Е. Влияние планировки поверхности на плодородие осушенных связных почв. *Мелиорация*. 2012;1(67):128–134. <https://www.elibrary.ru/tahkfu>
2. Башняк С.Е., Башняк И.М. Ресурсосберегающая технология подготовки почвы рисовых полей к посеву в условиях Ростовской области. *Вестник Донского государственного аграрного университета*. 2018;3–1(29):75–82. <https://www.elibrary.ru/ylqzmt>
3. Ревин Ю.Г. Характеристики микрорельефа рисовых чеков и общие рекомендации по выполнению планировочных работ. *Природообустройство*. 2008;(4):96–99. <https://www.elibrary.ru/jxvgjb>
4. Мурадов Р.А. Планировка земель на просадочных грунтах. *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2014;3(15):69–81. <https://www.elibrary.ru/szioez>
5. Богославчик П.М., Батышко О.А., Селезнев В.И., Высоченко А.В. Современный опыт проектирования объектов мелиорации и реконструкции мелиоративных систем. *Наука и техника*. 2014;(5):67–74.
6. Горохова И.Н., Хитров Н.Б., Прокопьева К.О., Харланов В.А. Почвенный покров Светлоярской оросительной системы через полвека мелиоративных воздействий. *Почвоведение*. 2018;(8):1033–1044. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18080130> <https://www.elibrary.ru/xzzhdf>
7. Ефремов А.Н. Импортзамещение мелиоративных машин с лазерным управлением для планировки орошаемых земель. *Мелиорация и водное хозяйство*. 2016;(2):32–34. <https://www.elibrary.ru/whaxbl>
8. Семененко С.Я. Техногенная оптимизация поверхностного стока в орошаемом земледелии. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: *Наука и высшее профессиональное образование*. 2022;2(66):388–396. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-48> <https://www.elibrary.ru/jloiw1>
9. Севрюгина Н.С., Апатенко А.С., Голубев И.Г. и др. Технологии и технические средства рекультивации залежных земель с регулированием уровня увлажненности почвы. *Природообустройство*. 2023;(3):38–44. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-38-44> <https://www.elibrary.ru/hzkhke>
10. Ефремов А.Н., Головинов Е.Э. Проектирование и планировка орошаемых и осушаемых земель. *Экологические системы и приборы*. 2022;(1):32–40. <https://doi.org/10.25791/esip.1.2022.1280> <https://www.elibrary.ru/chgnip>
11. Антонов Е.В. Комплексная технология планировки рисовых чеков с помощью скрепера-планировщика СП-4,0. *Мелиорация и водное хозяйство*. 2008;(5):43–45. <https://www.elibrary.ru/kawdyf>
12. Рыбушкин Н.А., Сафина А.Н., Безменов В.М. Использование NDVI и NDWI индексов в анализе снимков спутников дистанционного зондирования Земли для мониторинга состояния сельскохозяйственных полей. Природно-ресурсный потенциал и экологическая реабилитация деградированных ландшафтов : Материалы Международной научно-практической конференции, Грозный, 17–18 марта 2023 года. Грозный: Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова, 2023. С. 286–290. <https://doi.org/10.36684/86-1-2023-286-290> <https://www.elibrary.ru/gilquu>
13. Ревин Ю.Г. Процесс выравнивания поверхности рисового чека мелиоративным планировщиком. Аналитическое представление. *Природообустройство*. 2010;(5):85–88. <https://www.elibrary.ru/lulovq>

• References (in Russ.)

1. Krutko S.M., Sakvenkov K.M., Tivo P.F., Vysotskaya M.E. The influence of surface planning on the fertility of drained coherent soils. *Land reclamation*. 2012;1(67):128–134. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/tahkfu>
2. Bashnak S.E., Bashnak I. M. Resource-saving technology of preparing the soil of rice fields for sowing in the conditions of the Rostov region. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018;3–1(29):75–82. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/ylqzmt>
3. Revin Yu.G. Characteristics of the rice checkrow microrelief and general recommendations on fulfillment of planning works. *Prirodoobustroystvo*. 2008;(4):96–99. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/jxvgjb>
4. Muradov R.A. Land grading at subsidence soils. *Scientific journal of Russian scientific research institute of land improvement problems*. 2014;3(15):69–81. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/szioez>
5. Bogoslavchik P.M., Batyushko O.A., Seleznev V.I., Vysochenko A.V. Modern experience in designing melioration facilities and reconstruction of melioration systems. *Science and Technology*. 2014;(5):67–74. (In Russ.)
6. Gorokhova I.N., Khitrov N.B., Prokopyeva K.O., Kharlanov V.A. Soil cover of the Svetloyarsk irrigation system through half a century of reclamation impacts. *Pochvovedenie*. 2018;(8):1033–1044. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0032180X18080130> <https://www.elibrary.ru/xzzhdf>
7. Efremov A.N. Importsubstitution the meliorative machines for a planning of the irrigated earths. *Land reclamation and water management*. 2016;(2):32–34. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/whaxbl>
8. Semenenko S.Y. Technogenic optimization of surface runoff in irrigated agriculture. *Proceedings of Lower Volga agro-university complex: science and higher education*. 2022;2(66):388–396. (In Russ.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-02-48> <https://www.elibrary.ru/jloiw1>
9. Sevryugina N.S., Apatenko A.S., Golubev I.G., Gustov Yu.I., Fomin A.Yu. Technologies and technic means of reclamation of fallow lands with regulation of the level of soil moisture. *Prirodoobustroystvo*. 2023;(3):38–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-38-44> <https://www.elibrary.ru/hzkhke>
10. Efremov A.N., Golovinov E.E. Designing and planning of the irrigated and drained earths. *Ecological systems and devices*. 2022;(1):32–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.25791/esip.1.2022.1280> <https://www.elibrary.ru/chgnip>
11. Antonov E.V. Complex technology of planning rice checks with the help of SP-4,0 scraper-planner. *Land reclamation and water management*. 2008;(5):43–45. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/kawdyf>
12. Rybushkin N.A., Safina A.N., Bezmenov V.M. Using NDVI and NDWI indices in the analysis of Earth remote sensing satellite images to monitor the state of agricultural fields. Natural resource potential and ecological rehabilitation of degraded landscapes: Proceedings of the International scientific and practical conference, Grozny, March 17-18, 2023. Grozny: Chechen State University named after Akhmat Abdulhamidovich Kadyrov, 2023. P. 286-290. (In Russ.) <https://doi.org/10.36684/86-1-2023-286-290> <https://www.elibrary.ru/gilquu>
13. Revin Y.G. Process of leveling the surface of a rice check by a land reclamation planner. Analytical representation. *Prirodoobustroystvo*. 2010;(5):85–88. (In Russ.)

Об авторах:

Дмитрий Валерьевич Шуляк – Генеральный директор
Виталий Анатольевич Калягин – исполнительный директор
Дмитрий Михайлович Бенин – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций, <https://orcid.org/0000-0003-1265-4071>; Scopus Author ID: 57216751281; SPIN-код: 6243-0567
Хамзат Арсланбекович Абдулмажидов – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ, <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; Scopus Author ID: 57224176106; Web of Science ResearcherID AAE-5817-2022; SPIN-код: 7201-8282, автор для переписки, Hamzat72@mail.ru
Надежда Владимировна Гавриловская – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов, <https://orcid.org/0000-0001-5060-7837>; Scopus Author ID: 57221617277; SPIN-код: 6622-7736

About the Authors:

Dmitry V. Shulyak – General Director
Vitaly A. Kalyagin – Executive Director
Dmitry M. Benin – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agricultural Water Supply, Sanitation, Pumps and Pumping Stations, <https://orcid.org/0000-0003-1265-4071>; Scopus Author ID: 57216751281; SPIN-code: 6243-0567
Khamzat A. Abdulmazhidov – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Organization and Technologies of Irrigation and Reclamation and Construction Works, <https://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; Scopus Author ID: 57224176106; Web of Science ResearcherID AAE-5817-2022; SPIN-code: 7201-8282, Corresponding Author, Hamzat72@mail.ru
Nadezhda V. Gavrilovskaya – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Acting Head of the Department of Computer-Aided Design Systems and Engineering Calculations, <https://orcid.org/0000-0001-5060-7837>; Scopus Author ID: 57221617277; SPIN-code: 6622-7736

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-225-232>

Kasu Hailu Biru*

Ethiopian Forestry Development Hawassa center,
Plantation Research program
Addis Ababa, Ethiopia

*Correspondence: kasuhailu128@gmail.com

Funding. This review did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial or not for profit sector.

Author's Contribution: Kasu Hailu Biru: conceptualization, formal analysis, visualization, writing – review & editing.

Conflict of interest. I declare that there is no conflict of interest.

For citation: Biru K.H. Agroforestry contribution to livelihood and Carbon sequestration in Ethiopia. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):225-232. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-225-232>

Received: 21.04.2025

Accepted for publication: 25.08.2025

Published: 18.12.2025

Касу Хайлу Биру*

Эфиопский центр развития
лесного хозяйства в Хавассе,
Программа исследований плантаций
Аддис-Абеба, Эфиопия

*Автор для переписки:
kasuhailu128@gmail.com

Финансирование. Данный обзор не получил никакого конкретного гранта от финансирующих организаций государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Вклад автора: Биру К.Х.: концептуализация, формальный анализ, создание рукописи и её редактирование.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Biru K.H. Agroforestry contribution to livelihood and Carbon sequestration in Ethiopia. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):225-232. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-225-232>

Поступила в редакцию: 21.04.2025

Принята к печати: 25.08.2025

Опубликована: 18.12.2025

Agroforestry contribution to livelihood and Carbon sequestration in Ethiopia

Check for updates



ABSTRACT

Agroforestry is a powerful practice for sustainable and regenerative intensification because it promotes multifunctional landscapes that deliver ecological functions that contribute to livelihoods, land productivity, biodiversity conservation, and other ecosystem services. The main idea of this paper is to review Agroforestry contribution to livelihood and carbon sequestration in Ethiopia. Home gardens, farms, woodlots, and coffee farms are the most prevalent forms of agroforestry methods; yet, farmer perceptions and their distribution differed. Amazingly, because agroforestry produces a variety of services from a small unit of land, each technique adds many advantages. The main benefit was diversification of production, which is the optimal approach, especially for smallholder farmers whose livelihoods depend on agricultural systems. In comparison to monocropping, agroforestry is much more acceptable and recommended. As a result, it offers both environmental and socioeconomic benefits, such as reduced soil erosion, increased soil moisture and fertility, coffee shade, and maintenance of the microclimate balance, as well as tree products and income. These and other advantages help rural communities diversify their sources of income and provide protection. Much of the aboveground carbon is held in homegardens ($28.2 \pm 6.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$), perennial tree crop systems ($23.7 \pm 10.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$) and trees on boundaries ($26.7 \pm 14.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$). In general, it's a useful tool for adjusting to and reducing climate change. As a consequence, farmers considered it as essential to maximize the productive potential of their land and enhancing the standard of living for smallholders. Therefore, in order to help farmers improve their standard of living and adapt to the unpredictable nature of climate change, the government should support agroforestry practices.

KEYWORDS:

Agroforestry systems, Carbon sequestration, Socio-economic, Environmental and Livelihood

Вклад агролесоводства в обеспечение средств к существованию и поглощение углерода в Эфиопии

РЕЗЮМЕ

Agroforestry is a powerful practice for sustainable and regenerative intensification because it promotes multifunctional landscapes that deliver ecological functions that contribute to livelihoods, land productivity, biodiversity conservation, and other ecosystem services. The main idea of this paper is to review Agroforestry contribution to livelihood and carbon sequestration in Ethiopia. Home gardens, farms, woodlots, and coffee farms are the most prevalent forms of agroforestry methods; yet, farmer perceptions and their distribution differed. Amazingly, because agroforestry produces a variety of services from a small unit of land, each technique adds many advantages. The main benefit was diversification of production, which is the optimal approach, especially for smallholder farmers whose livelihoods depend on agricultural systems. In comparison to monocropping, agroforestry is much more acceptable and recommended. As a result, it offers both environmental and socioeconomic benefits, such as reduced soil erosion, increased soil moisture and fertility, coffee shade, and maintenance of the microclimate balance, as well as tree products and income. These and other advantages help rural communities diversify their sources of income and provide protection. Much of the aboveground carbon is held in homegardens ($28.2 \pm 6.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$), perennial tree crop systems ($23.7 \pm 10.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$) and trees on boundaries ($26.7 \pm 14.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$). In general, it's a useful tool for adjusting to and reducing climate change. As a consequence, farmers considered it as essential to maximize the productive potential of their land and enhancing the standard of living for smallholders. Therefore, in order to help farmers improve their standard of living and adapt to the unpredictable nature of climate change, the government should support agroforestry practices.

KEYWORDS:

Agroforestry systems, Carbon sequestration, Socio-economic, Environmental and Livelihood

Introduction

It is commonly acknowledged that agroforestry is a land use plan that helps with both adaptation and mitigation of climate change while offering smallholder farmers answers to their problems [1]. Agroforestry helps local populations that are experiencing climatic shocks by producing goods (such as food, fuel, firewood, and medications) and generating revenue for them. Additionally, agroforestry is recognized to support livelihoods by protecting people, places, and property from the effects of climate change, such as floods, and by enhancing crop and animal output by their impact on soil water and light availability [2]. By slowing down water flow, providing windbreaks, and anchoring the soil with their roots, trees stop soil erosion [3,4]. The establishment of a favorable microclimate [5], increased soil fertility [3], control of water [6], and control of agricultural pests [7] are the reasons behind the benefits of agroforestry on crop and livestock production. By fixing nitrogen, increasing the richness and abundance of the microbial population, and boosting soil organic carbon, agroforestry can also make soils more resilient to drought [3]. In order to optimize the benefits of agroforestry, trees' negative impacts on crops namely, shade and competition for water are often handled.

Agroforestry might potentially be used to mitigate climate change by sequestering carbon in soil and plant biomass. Globally, agroforestry systems store an average of about 21.4 Mg C ha⁻¹ in biomass [8]. In the tropics, agroforestry systems store an average of 9, 21 and 50 Mg C ha⁻¹ in semiarid, sub-humid, humid areas, respectively [9]. For agroforestry systems in Africa, a cautious estimate of 1.0 to 18 Mg C ha⁻¹ in aboveground biomass has been proposed [10]. These approximations are imprecise and only serve to highlight the possibilities of agroforestry. Because some of them are drawn from researches that were based on generalizations or false assumptions, their scientific worth has been called into doubt [10]. We need to improve our understanding of the amount and distribution of biomass carbon in agroforestry systems by conducting a quantitative synthesis of the information from primary investigations. Agroforestry's potential as a carbon sequestration technology is highly anticipated. First, even if the total quantities of climate financing are small, subsistence farmers are the primary practitioners of agroforestry and may profit from it. Second, agroforestry has been recognized by several nations as a means of accomplishing both the Nationally Determined Contributions (NDCs) to the Paris Agreement [11,12] and their restoration objectives [13]. However, agroforestry is not taken into consideration by national measuring, reporting, and verification (MRV) systems, in part due to the difficulty of quantifying carbon emissions. Although there has been considerable improvement in estimating biomass carbon in agricultural landscapes, methodological issues are to blame for the literature's varying estimates [10]. To fully utilize the promise of agroforestry as a climate change mitigation method, this constraint must be overcome. The overarching goal of this review is to provide available evidence and knowledge gaps regarding the contribution of Agroforestry to livelihood and carbon sequestration in Ethiopia.

Major Agroforestry practice in Ethiopia

There is an abundant type of agroforestry practice in Ethiopia. Such as pasture land, farm land and home garden in Northwestern Ethiopia as cited by Ketsela Hailemichael [14]. Also,

coffee shade tree, scattered trees on farmland, home garden, woodlots, farm boundary and grazing lands are types of traditional agroforestry practices in southern Ethiopia [15,16]. The enlargement of tree-based agroforestry land use practice under different landforms is the alternative method of increasing the efficiency of land because planting or maintaining of tree or shrub on farmland, roadsides, pasture land, and farm boundary use to minimize a shortage of wood products and improve the production ability of land simultaneously [17].

Both coffee-enset-based and parkland agroforestry practices are commonly known as an economical eye-catching. However, coffee-enset-based agroforestry practice is the best economical presentation than parkland agroforestry practices and accepted as the best strategy for improving the livelihood of smallholder farmers in Yirgacheffe district of Gedeo Zone, Ethiopia [18]. Woodlot of *Eucalyptus* is also the most agroforestry practice in Ethiopia, because it playing a vital role in improving the livelihood of the farmer [19-21].

Home Garden Agroforestry System

Homegardens referred to a land use near the homestead where a mix of annual and perennial crops are grown with multipurpose trees, and sometimes in association with domestic animals. The plant component includes trees, shrubs, herbs, climbers and food crops that form three to four canopy layers. A prominent type of homegarden in Ethiopia is the 'enset-coffee' home garden typified by a combination of enset (*Enset ventricosum*) and coffee (*Coffea arabica*) [22,23]. Ethiopia also has unique "enset-based" and "coffee-based" home gardens.

Homegardens are characterized by high species diversity with multipurpose trees or fruit tree species as the dominant woody component. In Ethiopia, homegardens are dominated by coffee, enset, khat (*Catha edulis*), avocado, banana (*Musa* spp.) and vegetables [24-26]. These may be left unfenced or encircled by a Living fence made of species of trees with multiple uses [27]. Because home gardens include a variety of plant species and phases of development, the advantages of livelihood in them range. At their initial stages, homegardens provide more vegetables, spices and traditional medicines [28-30] When a home garden is established, it yields fruits and other tree products as well as revenue. Shade tolerant spices such as wild cardamom (*Aframomum angustifolium*), small cardamom (*Elettaria cardamomum*) and wild pepper (*Piper capense*) were frequently reported in homegardens in Ethiopia [31]. While *Grevillea robusta* and *Erythrina brucei* sustain the spices and vines, trees like *Millettia ferruginea* and *Albidia gumminifera* offer shade [31].

Farmland Agroforestry System

This is a kind of agroforestry land use system centered on trees, in which a tree is always growing alongside a grain crop, such sorghum, maize, or teff. Another name for it is a farming method in parklands [18]. This method is planting single *Syzygium guineense* trees in large areas or dispersed over farms, without interfering with the growth of other crops. These kinds of tree species that are widely distributed throughout agriculture may be supported by planting new trees or by protecting and carefully maintaining trees that have naturally regenerated. There is no set strategy for planting trees on fields; in Ethiopia's central highlands,

Acacia albida, *Croton macrostachyus*, and *Ficus species* are the most commonly planted tree species [19]. In addition, the most common tree species found on farmland in the Jabithenan district of Northwestern Ethiopia are *Croton macrostachyus*, *Ficus sure*, *Albizia gummifera*, *Cordia africana*, *Acacia abyssinica*, *Rosa abyssinica*, and *Erythrina abyssinica* [27]. *Eucalyptus spp.* and *Grevillea robusta*, on the other hand, are grown as live fences, boundaries, and small-scale woodlots. In Ethiopia's central highlands, around half (42%) of farmers would like to grow dispersible trees on their property [19]. Common approaches involve intercropping maize with *Cordia africana* in western Ethiopia and *Acacia albida* in the Hararge Highlands and Debrezeit region [32]. The integration of tree species with annual crops is now seen to

be one of the most effective strategies to increase a single land's production capacity by diversifying the crop and achieving greater yields. The farmer is deliberately keeping or growing diverse tree species on their acreage because of their multifunctional advantages. Among its advantages include reducing soil erosion, increasing soil's ability to retain water, and boosting soil fertility by fixing nitrogen [33]. Additionally, farms with trees, especially those with *Croton macrostachyus* Del. and *Cordia africana* Lam., have better soil nutrients because they store more leaves in the soil, which decomposes in Badessa, Eastern Ethiopia, and reduces nutrient loss [34]. Additionally, Southeast Langano, Ethiopia's trees on farms offer socioeconomic advantages such fuel wood, fodder, and medical benefits [35].

Table 1. The most commonly studied Agroforestry practices in Ethiopia and their contribution to livelihood benefit.

Agroforestry systems/practices	Description and example	Livelihood benefit	References
Homegardens	A land use near the homestead where annual and perennial crops are cultivated with trees, and sometimes in association with livestock. Homegardens are characterized by a high diversity of plants, multi-story structure, and primarily function to produce food for household consumption. Specific types of homegardens described are enset, enset-coffee and coffee homegardens.	Food, firewood, medicinal use, fodder, shade, income, construction material, household items and timber	[24-27,31,44]
Perennial tree-crop systems	A system containing plantation (cash) crops such as coffee, tea, cacao.	Food, fodder, firewood, timber, income, poles, medicinal use, construction material	[45,46]
	Coconut, cashew, khat, cardamom and multipurpose trees or shade tolerant herbaceous crops as the main components. Plantation crops can generate value added goods for the international market		[47]
Woodlots	An area on the farm set aside entirely for trees. Single or mixed species stands of trees can be planted on cropland or degraded land for wood production, or to rehabilitate the land. Woodlots can be intercropped, e.g. with vegetables in the first two years early; the trees then grow alone and are harvest around the fifth year; food crops are replanted in the case of rotational woodlots	Wood, firewood, fodder, income, timber, construction material	[48]
Scattered trees on farm	A practice where scattered trees grow on cropland, often from naturally dispersed seeds that germinate and are protected during farm operations, or from seedlings planted by the farmer. The spatial arrangement of trees may be random or linear	Income, firewood, fodder, charcoal, gum arabic, resin, wood	[49]
Silvopastures systems	Integration of trees with livestock. The animals freely roam and graze under natural stands of trees or scattered trees in croplands, or may be stall-fed with forage from fodder trees and shrubs grown on the farm. The trees provide high-quality forage that supplement available feeds	Fodder, shade, firewood, timber, food	[50-52]
Parkland Agroforestry systems	A traditional land use system where scattered multipurpose trees are retained on cultivated land or land that was recently fallowed. Parklands constitute extensive tree-crop intercropping, where crops are grown beneath the crowns of trees such as <i>Faidherbia albida</i> , <i>Ficus vasta</i>	Food, fodder, firewood, income, shade, timber, charcoal, construction material, farm implements / tools	[30,53,54]
Boundary planting	The practice of growing trees on farm boundary. Trees can be planted in rows, initially at a close spacing (e.g. 1 m) and later thinned to 2 or 4 m spacing; trees may also be retained as scattered trees along boundaries. The trees mark farm boundaries or enterprises, and can be pruned or pollarded for various products	Fodder, food, firewood, income, shade, timber, charcoal, wood, poles, bee forage	[55-59]
Fruit tree-based agroforestry	The intentional simultaneous cultivation of annual or perennial crops with fruit producing trees on the same area of land. Fruit tree-based agroforestry may occur as orchards or low intensity homegardens based on apple (<i>Malus domestica</i>), mango (<i>Mangifera indica</i>), avocado (<i>Persea americana</i>); or fruit trees intercropped with staples	Income, food	[47]
Trees on soil conservation structure	Trees planted on soil-conservation structures to control runoff, reduce soil loss, stabilize the structure and maximise utilization of the land use. Examples include tree strips or grass strips with trees; trees planted on bench terraces, progressive terraces	Food, fodder, firewood, green manure, staking material	[58,60]

Coffee Farm Agroforestry System

A coffee farm is a kind of agroforestry land use where different tree species are planted alongside coffee to provide shade [15]. Ethiopian farmers are accustomed to growing coffee under various shade plants. The best trees for coffee shade in southwest Ethiopia include *Albizia schimperiana*, *Albizia gummifera*, *Millettia ferruginea*, *Cordia africana*, and *Erythrina abyssinica*. Apart from providing shade, they also sell a variety of tree products, such as building materials, firewood, and lumber, and they also work to improve soil fertility and lessen soil erosion [36,37]. Furthermore, in Southwestern Ethiopia, *Acacia abyssinica* is the best tree species for providing shade for coffee [38]. This was quite similar to the coffee plantation in Jimma town [39]. The majority of scholars concurred that shade is essential for coffee production, but they disagreed over which tree species was their preference. In the Manasibu District of Ethiopia, where agroforestry was used for the cultivation of coffee, *Croton macrostachyus* is acknowledged as the most beneficial shade tree among other tree species [40].

Woodlot Agroforestry

A woodlot is an area of forest land used for building and other uses, such as the production of firewood [21]. They also verified that many farmers were separately planting tree as the greatest substitutes for conventional land use techniques on a small-scale woodlot. Because, it provides firewood, construction materials, and income, which reversely help smallholder farmers to meet their family's needs in Eza district of Ethiopia [41].

In Ethiopia, particularly in rural areas, woodlot tree-based agroforestry land use is cultivated by smallholder farmer [20,21]. The primary goals of introducing *eucalyptus* into Ethiopia were to decrease natural forest degradation and increase the availability of tree products. But, currently this perception is gradually changed to more benefits market-oriented [42]. The greatest way to help smallholder farmers in the Arsi Zone of Oromia improve their standard of living is to plant *eucalyptus* woodlots, which provide both revenue and wood products for domestic use [43]. Furthermore, in the central highlands of Oromia, Ethiopia, the revenue from *Eucalyptus* woodlots contributes comparatively more income (e.g., 50%) than that from cattle and grain crops [20]. Due to this fact reason, the farmers are allocated their land for *Eucalyptus* cultivation. In the woodlot agroforestry practice surrounding Jimma town, the most trained tree species are *Cupressus lusitanica* and *Eucalyptus camaldulensis* [39].

Socio-economic Benefits

The majority of the rural population depends on rain-fed agriculture, which leaves an agroforestry footprint. Fruit, firewood, honey, spices, lumber, poles, and charcoal are examples of both non-timber forest products (NTFP) and timber forest products (TFP) that are used to compute income derived from tree products [61,62]. Farmers' lifestyles are greatly improved by the additional revenue, even though the amount varies depending on the location, especially during some risks occurred related to crop production due to climate changes [63]. Furthermore, the farmer obtains 47% income from NTFPs in Kaffa Zone (62), 800 to 1500 ETB in Wolaita Zone [64] and 1683 ETB an annual average income from home garden agroforestry in southwest Ethiopia's Jimma Zone [63]. However, the amount of income derived from tree product is

influenced by various factors. Experiences with planting trees, the age of the farmer, the wealth status of the family, the size of the land, and the degree of education are all factors that have been found to favorably influence household income [65,66].

Numerous literary works demonstrate the advantages of trees or shrubs for traditional medicine in diverse regions of Ethiopia [67,68]. For example, *Euphorbia candelabrum* for ringworm, *Millettia ferruginea* for fungal infection, *Vernonia amygdalina* for diarrhea and stomach discomfort, *Croton macrostachyus* for malaria, diarrhea, epilepsy, ringworm, and skin rash. As a result, over 52 species of medicinal plants were discovered in the Boosat region in central-eastern Ethiopia [69], while 39 species of medicinal plants that are used to cure a variety of illnesses were distinguished in the Jimma zone in southwest Ethiopia [68]. Agroforestry land use practices centered around trees offer shade. In Southwestern Ethiopia, people congregate under a shade tree for religious purposes, such as playing, and social matters [70].

Environmental Benefit

Improved soil fertility, decreased soil and water erosion, increased soil moisture retention, and enhanced environmental health may all be achieved with an environmentally friendly agroforestry system [71]. Agroforestry can mitigate climate change through various techniques. For instance, it is significantly reducing the adverse effects of climate change on agricultural productivity [72]. Because combining trees with annual crops can boost yield and diversify products [72,73]. Additionally, it helps to slow down environmental deterioration and offers smallholder farmers several advantages [74]. This outcome will improve rural farmers' ability to adapt to climate change. Agroforestry land use practices based on trees are effective in achieving food security, particularly in subsistence agricultural farming systems where the farmer receives income to buy cereal crops for domestic use [63]. Agroforestry practice contributes incredible service in watershed management. For example, the indigenous expertise of the local people on agroforestry management (fertilizer application, pruning, regulated burning, thinning, pollarding, protection against animal and human damage, etc.) in the Wolaita Zone of the Gununo Watershed, grass mulch, crop residue, watering and coppicing) was accepted as the option in reducing land degradation through modifying micro-climate and reducing soil erosion, improving soil fertility and increasing soil moisture, which in turn raises agricultural production [75]. Besides, it has huge advantages in rehabilitating the degraded land in highlands of Ethiopia [76]. The most effective substitute method for addressing environmental issues is agroforestry. Degradation of environmental health quality is put the world under serious challenges especially in developing countries. This environmental deterioration is more accurately described as land degradation, which is brought on by increased population expansion, deforestation, over-exploitation, overgrazing, and soil erosion.

Carbon sequestration in Agroforestry systems in Ethiopia

In agroforestry systems, carbon is sequestered in both above-ground biomass such as stem, branch, and foliage and below-ground biomass such as soil and roots. In particular, agroforestry systems' substantial aboveground biomass and deep tree root systems have drawn more attention for mitigating and adapting to climate change [77].

Table 2. Estimates of above- and below ground biomass carbon (Mg C ha⁻¹) and soil organic carbon (0–60 cm depth, Mg C ha⁻¹) in major agroforestry practices in Ethiopia.

Agroforestry practice	Aboveground carbon	Belowground carbon	Soil organic carbon	References
Boundary planting	26.7 ± 14.1		112.7	[58,59]
Fodder bank	9.2 ± 4.2		14.5 ± 1.4	[31,50]
Homegarden agroforestry	28.2 ± 6.0	9.6 ± 2.8	115.7 ± 15.1	[22,23,25,26,59,78]
Parkland systems	4.9 ± 2.5	1.9 ± 0.8	41.6 ± 11.3	[59,80-82]
Perennial tree crop systems	23.7 ± 10.0	8.2 ± 4.8	110.9 ± 30.3	[25,83]
Scattered trees on farm	8.2 ± 1.4	2.9 ± 1.0	52.5 ± 23.4	[84-86]
Silvopasture	2.1 ± 0.01		73.0 ± 35.6	[79,80]
Woodlot	25.0 ± 5.6	4.559	58.6 ± 8.5	[23,59]

The values are mean ± standard error. *

Further, between 30 and 300 mg C ha⁻¹ may be stored in agroforestry soils up to 1-m depth [87]. Aboveground biomass estimated by CO2FIX model for enset-tree (73.2 mg ha⁻¹), enset coffee (105.7 mg ha⁻¹) and tree-coffee system (116.2 mg ha⁻¹), translating to biomass carbon of 96.6, 139.5, 153.4 mg ha⁻¹, respectively [22] was excluded from the computation of mean carbon storage since it was greater than estimates published in the area. Comparable system estimates for enset (34.9 mg ha⁻¹), enset-coffee (59.2 mg ha⁻¹), and fruit-coffee (58.3 mg ha⁻¹) yield half that amount [88]. Although it was not measured, small-scale *eucalyptus*-based woodlots in Ethiopia would have increased aboveground carbon [23,48,57]. Aboveground carbon in fodder banks with *S.micratha*, *S.rostrata*, *S.quadrata* and *S.seban* stored 5.4 mg C ha⁻¹ in the same carbon pool in Ethiopia [50].

Increases in biomass C returned to the soil, improvements in soil organic matter (SOM) stabilization, and/or reductions in the rate of biomass decomposition and SOM destabilization are the main ways to attain higher SOC pools in agroforestry systems [89,90]. Agroforestry systems are more effective than monocultures in harnessing the resources on the site for biomass development, and the greater growth might lead to higher soil C inputs. Certain approaches in agroforestry may also have the effect of increasing direct carbon inputs into the soil. These include: (a) composting woody species prunings back into the soil as mulch and letting copious amounts of tree litter break down naturally; (b) letting cattle graze on the land and add manure; (c) letting woody species grow and contribute surface and subsurface litter during crop fallow phases; (d) incorporating trees and their litter input into animal production systems; (e) allowing shade-tolerant species to grow beneath trees and contribute litter to the soil; and (f) reaping the benefits of the soil carbon inputs from agricultural crops planted in the early phases of forestry plantations.

Even in intricate agroforestry systems where yearly crops and tree products are continuously harvested, soil organic carbon is predicted to be steady. Complex agroforestry systems are distinguished by the creation of copious amounts of

litter and prunings, which enhance the organic matter content of the soil. In these environments, the buildup of SOC is further facilitated by organic debris resulting from root breakdown. For example, the rate of annual loss of SOC was three times higher in areas converted (from forest) to khat monoculture than to agroforestry systems with both khat and coffee [78]. The soil organic carbon (SOC) in agroforestry plots aged 32–54 years was 117.3 mg C ha⁻¹, which was lower than the 94.1 mg C ha⁻¹ in a khat monoculture aged 15–27 years and the 171.8 mg C ha⁻¹ in the forest (78). Compared to khat monocropping, agroforestry has more carbon in its trash and roots [78].

Conclusion

Although Ethiopia's agroforestry system is the oldest traditional practice, it is now recognized as the country's current land use system. The reviewed literature showed that agroforestry systems are multifunctional and supports livelihoods by increasing farmer's capacity to acquire food, firewood, fodder and income, and provides other products are used by communities facing climate-related threats. The primary uses of trees and tree products are for revenue and subsistence; smaller uses include insurance and asset building for rural communities. Agroforestry systems also store substantial amounts of carbon in plant biomass and in the soil. Homegardens are the most multifunctional agroforestry practice with the highest number of livelihood benefits and largest amount of carbon stocks in above-ground biomass and in the soil.

As a co-benefit, agroforestry can generate income from sequestering carbon. The fact that there aren't many studies on the carbon benefits of agroforestry raises the possibility that issues like carbon rights, land tenure, tree tenure rights, and the possible effects of climate change on the expanding niches of tree species should be addressed in order to fully realize the benefits of carbon sequestration. Additionally, laws and institutional structures governing the region's participation in the carbon market must be developed.

• References / Литература

1. van Noordwijk M., Catacutan D.C., Duguma L.A., Pham T.T., Leimona B., Dewi S., et al. Agroforestry matches the evolving climate change mitigation and adaptation agenda in Asia and Africa. *Agroforestry for Sustainable Intensification of Agriculture in Asia and Africa*: Springer; 2023. p. 21-52.
2. Muthuri C., Ong C., Black C., Mati B.M., Ngumi V., van Noordwijk M. Modelling the effects of leafing phenology on growth and water use by selected agroforestry tree species in semi-arid Kenya. *Land Use and Water Resources Research*. 2004;4(1732-2016-140280).
3. Muchane M.N., Sileshi G.W., Gripenberg S., Jonsson M., Pumariño L., Barrios E.. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agr. Ecosyst. Environ.* 2020;295:106899.
4. Quandt A., Neufeldt H., Gorman K. Climate change adaptation through agroforestry: Opportunities and gaps. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2023;60:101244.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>
5. Bayala J., Sanou J., Teklehaimanot Z., Kalinganire A., Ouédraogo S. Parklands for buffering climate risk and sustaining agricultural production in the Sahel of West Africa. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2014;6:28-34. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.004>
6. Kuyah S., Whitney C.W., Jonsson M., Sileshi G.W., Öborn I., Muthuri C.W., et al. Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 2019;39:1-18.
<https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>
7. Pumariño L., Sileshi G.W., Gripenberg S., Kaartinen R., Barrios E., Muchane M.N., et al. Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic Appl. Ecol.* 2015;16(7):573-582.
8. Zomer R.J., Neufeldt H., Xu J., Ahrends A., Bossio D., Trabucco A., et al. Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Sci. Rep.* 2016;6(1):29987.
<https://doi.org/10.1038/srep29987>
9. Montagnini F., Nair P.R., editors. Carbon sequestration: an under-exploited environmental benefit of agroforestry systems. *New Vistas in Agroforestry: A Compendium for 1st World Congress of Agroforestry, 2004*; 2004: Springer.
10. Nair P.R., Nair V.D. 'Solid-fluid-gas': the state of knowledge on carbon-sequestration potential of agroforestry systems in Africa. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2014;6:22-27.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.014>
11. Rosenstock T.S., Wilkes A., Jallo C., Namoi N., Bulusu M., Suber M., et al. Making trees count: Measurement and reporting of agroforestry in UNFCCC national communications of non-Annex I countries. *Agr. Ecosyst. Environ.* 2019;284:106569.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106569>
12. Duguma L.A., Minang P.A., Watson C., Nath A.J., Muthee K.W., van Noordwijk M., et al. Agroforestry as a key intervention to achieve nationally determined contribution (NDC) targets. *Agroforestry for Sustainable Intensification of Agriculture in Asia and Africa*: Springer; 2023. p. 641-664.
13. Mansourian S., Berrahmouni N. Review of forest and landscape restoration in Africa 2021: Food & Agriculture Org.; 2021.
14. Ketsela Hailemichael B. The contribution of *Eucalyptus* woodlots to the livelihoods of small scale farmers in tropical and subtropical countries with special reference to the Ethiopian highlands. 2012.
15. Abebe T. Diversity in homegarden agroforestry systems of Southern Ethiopia: Wageningen University and Research; 2005.
16. Asfaw Z., Ågren G.I. Farmers' local knowledge and topsoil properties of agroforestry practices in Sidama, Southern Ethiopia. *Agroforestry Systems*. 2007;71:35-48.
<https://doi.org/10.1007/s10457-007-9087-0>
17. Duguma, Hager H. Woody plants diversity and possession, and their future prospects in small-scale tree and shrub growing in agricultural landscapes in central highlands of Ethiopia. *Small-scale Forestry*. 2010;9:153-174. <https://doi.org/10.1007/s11842-009-9108-0>
18. Ayele Y., Ewnetu Z., Asfaw Z. Economic evaluation of coffee-enset-based agroforestry practice in Yirgachefe Woreda, Ethiopia: Comparative analysis with parkland agroforestry practice. *Journal of Economics and Sustainable Development*. 2014;5(27):72-82.
19. Duguma, Hager H. Forest products scarcity perception and response by tree planting in the rural landscapes: farmers' views in central highlands of Ethiopia. *Ekológia (Bratislava)*. 2009;28(2):1581-69.
20. Kebebew Z. Profitability and household income contribution of growing *Eucalyptus globulus* (Labill.) to smallholder farmers: the case of the Central Highlands of Oromia, Ethiopia. 2002.
21. Duguma L.A., Hager H. Forest products scarcity perception and response by tree planting in the rural landscapes: farmers' views in central highlands of Ethiopia. *Ekológia (Bratislava)*. 2009;28(2):158-169.
22. Negash M., Kanninen M. Modeling biomass and soil carbon sequestration of indigenous agroforestry systems using CO2FIX approach. *Agr. Ecosyst. Environ.* 2015;203:147-155.
<https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2015.02.004>
23. Lulu M., Lemma B., Melese A. Soil organic carbon and nutrients in smallholding land uses in southern Ethiopia. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2020;183(1):69-79.
https://doi.org/10.1002/jpln.201900243?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
24. Sahle M., Saito O., Fürst C., Yeshitela K. Quantification and mapping of the supply of and demand for carbon storage and sequestration service in woody biomass and soil to mitigate climate change in the socio-ecological environment. *Science of the total environment*. 2018;624:342-354.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.033>
25. Betemariam M., Negash M., Worku A. Comparative analysis of carbon stocks in home garden and adjacent coffee based agroforestry systems in Ethiopia. *Small-Scale Forestry*. 2020;19:319-334. <https://doi.org/10.1007/s11842-020-09439-4>
26. Birhane E., Ahmed S., Hailemariam M., Negash M., Rannestad M.M., Norgrove L. Carbon stock and woody species diversity in homegarden agroforestry along an elevation gradient in southern Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2020;94:1099-1110.
27. Linger E. Agro-ecosystem and socio-economic role of homegarden agroforestry in Jabithenan District, North-Western Ethiopia: implication for climate change adaptation. *SpringerPlus*. 2014;3(1):1-9. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-154>
28. Mekonen T., Giday M., Kelbessa E. Ethnobotanical study of homegarden plants in Sebeta-Awas District of the Oromia Region of Ethiopia to assess use, species diversity and management prac-

- tices. *J. Ethnobiol. Ethnomed.* 2015;11:1-13.
<https://doi.org/10.1186/s13002-015-0049-8>
29. Sahle M., Saito O., Demissew S. Characterization and mapping of enset-based home-garden agroforestry for sustainable landscape management of the Gurage socioecological landscape in Ethiopia. *Env. Sci. Poll. Res.* 2022;29(17):24894-910.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17605-0>
30. Tadesse E., Abdulkedir A., Khamzina A., Son Y., Noulékoun F. Contrasting species diversity and values in home gardens and traditional parkland agroforestry systems in Ethiopian sub-humid lowlands. *Forests.* 2019;10(3):266. <https://doi.org/10.3390/f10030266>
31. Furo G., Manaye A., Negasa A. Identification of spice shade and support tree species, south western Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2020;94(1):95-102. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00372-w>
32. Hoekstra D., Torquebiau E., Bishaw B. Agroforestry: potentials and research needs for the Ethiopian highlands: ICRAF; 1990.
33. Yadessa A., Itanna F., Olsson M. Contribution of indigenous trees to soil properties: the case of scattered *Cordia africana* lam. Trees in croplands of western Oromia. *Ethiop. J. Nat. Resour.* 2001;3(2):245-70.
34. Gindaba J., Rozanov A., Negash L. Trees on farms and their contribution to soil fertility parameters in Badessa, eastern Ethiopia. *Biol.Fertil. Soils.* 2005;42:66-71.
35. Biruk A. Woody species composition and socio-economic roles of traditional agroforestry practices across different agro-ecological zones in South Eastern Langano, Oromiya: M. Sc. Thesis, Hawassa University, Wondo Genet, Ethiopia; 2006.
36. Nigussie A., Taye E., Bukero G. Survey on potentials and constraints of shade tree species for arabica coffee production in South Ethiopia. *Int. J. Recent Res. Life Sci.* 2014;1(1):1-11.
37. Hundera K., Honnay O., Aerts R., Muys B. The potential of small enclosures in assisting regeneration of coffee shade trees in South-Western Ethiopian coffee forests. *Afr. J. Ecol.* 2015;53(4):389-397. <https://doi.org/10.1111/aje.12203>
38. Muleta .D, Assefa F., Nemomissa S., Granhall U. Socioeconomic benefits of shade trees in coffee production systems in Bonga and Yayuhurumu districts, southwestern Ethiopia: farmers' perceptions. *Ethiop. J. Educ. Sci.* 2011;7(1):39-55.
39. Endale B. Environmental Contribution of Agroforestry Systems to Smallholder Farmers around Jimma town, southwestern Ethiopia, unpublished MSc: Thesis; 2017.
40. Ebisa L. Effect of dominant shade trees on coffee production in Manasibu District, West Oromia, Ethiopia. *Science, Technology and Arts Research Journal.* 2014;3(3):18-22.
<https://doi.org/10.4314/STAR.V3I3.3>
41. Zerga B. Ecological impacts of *Eucalyptus* plantation in eza wereda, Ethiopia. *Int Inv J Agric Soil Sci.* 2015;3(4):47-51.
42. Pohjonen V., Pukkala T. *Eucalyptus* globulus in Ethiopian forestry. *For. Ecol. Manag* 1990;36(1):19-31.
43. Mekonnen Z. Community opinion, marketing and current debates on *eucalyptus* in Huruta District, Arsi Zone of Oromia Region, Ethiopia. *Eucalyptus* Species Management, History, Status and Trends in Ethiopia. 2010:15-7.
44. Reyes T., Luukkanen O., Quiroz R. Small cardamom—precious for people, harmful for mountain forests. *MRD.* 2006;26(2):131-137.
45. Teketay D, Tegineh A. Traditional tree crop based agroforestry in coffee producing areas of Harerge, Eastern Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 1991;16:257-267.
46. Biazin B., Hailelassie A., Zewdie T., Mekasha Y., Gebremedhin B., Fekadu A., et al. Smallholders' avocado production systems and tree productivity in the southern highlands of Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2018;92:127-137. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0020-2>
47. Admasu T.G., Jenberu A.A. TheImpacts of Apple-based Agroforestry Practices on the Livelihoods of Smallholder Farmers in Southern Ethiopia. *Trees, Forests and People.* 2022;7:100205.
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100205>
48. Gebreegziabher Z., van Kooten G.C. Does community and household tree planting imply increased use of wood for fuel? Evidence from Ethiopia. *Forest Policy and Economics.* 2013;34:30-40. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.03.003>
49. Mekonnen M., Worku T., Yitafaru B., Cerda A., Keesstra S. Economics of agroforestry land use system, Upper Blue Nile Basin, northwest Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2021:1-13.
50. Mengistu S., Keftasa D., Yami A. Productivity of four *Sesbania* species on two soil types in Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2002;54:235-244.
51. Balehegn M., Eik L.O., Tesfay Y. Silvopastoral system based on *Ficus thonningii*: an adaptation to climate change in northern Ethiopia. *Afr. J. Range Forage Sci.* 2015;32(3):183-191.
<https://doi.org/10.2989/10220119.2014.942368>
52. Yaebiyo G., Birhane E., Tadesse T., Kiros S., Hadgu K.M. Evaluating woody species composition and regeneration in controlled and free grazing systems for scaling up agroforestry in the highlands of northern Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2021;95(6):1229-1244.
53. Birhane E., Teklay R., Gebrehiwet K., Solomon N., Tadesse T. Maintaining *Acacia polyacantha* trees in farmlands enhances soil fertility and income of farmers in North Western Tigray, Northern Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2019;93:2135-2149.
54. Tadele M., Birhane E., Kidu G., G-Wahid H., Rannestad M.M. Contribution of parkland agroforestry in meeting fuel wood demand in the dry lands of Tigray, Ethiopia. *J. Sustain. For.* 2020;39(8):841-53. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1738946>
55. Kassa A.W., Nigussie Z.A. Management and Woody Species Diversity in Boundary Agroforestry of Banja District, Northwestern Ethiopia. *Small-scale Forestry.* 2022;21(3):393-415.
<https://doi.org/10.1007/s11842-022-09503-1>
56. Kidanu S., Mamo T., Stroosnijder L. Biomass production of *Eucalyptus* boundary plantations and their effect on crop productivity on Ethiopian highland Vertisols. *Agrofor. Syst.* 2005;63:281-90.
57. Duguma. Financial analysis of agroforestry land uses and its implications for smallholder farmers livelihood improvement in Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2013;87:217-231.
58. Nigatu A., Wondie M., Alemu A., Gebeyehu D., Workagegnehu H. Productivity of highland bamboo (*Yushania alpina*) across different plantation niches in West Amhara, Ethiopia. *For. Sci. Technol.* 2020;16(3):116-122.
<https://doi.org/10.1080/21580103.2020.1791260>
59. Manaye A., Tesfamariam B., Tesfaye M., Worku A., Gufi Y. Tree diversity and carbon stocks in agroforestry systems in northern Ethiopia. *Carbon Balance Manag.* 2021;16(1):14.
<https://doi.org/10.1186/s13021-021-00174-7>
60. Abdelkdair A., Schultz R.C. Water harvesting in a 'runoff-catchment' agroforestry system in the dry lands of Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2005;63:291-298.

61. Kebebew Z., Garedew W., Debela A. Understanding homegarden in household food security strategy: case study around Jimma, Southwestern Ethiopia. *Res. J. Appl. Sci.* 2011;6(1):38-43.
62. Melaku E., Ewnetu Z., Teketay D. Non-timber forest products and household incomes in Bonga forest area, southwestern Ethiopia. *J. For. Res.* 2014;25:215-223. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0447-0>
63. Kebebew Z., Urgessa K. Agroforestry perspective in land use pattern and farmers coping strategy: experience from southwestern Ethiopia. *World J. Agric. Sci.* 2011;7(1):73-77.
64. Agize M., Chama E., Shonga A. Income Generating Activities of Women on Home Garden Farming in Damot Gale District (Woreda) of Wolaita Zone, Southern Ethiopia. *International Journal of African and Asian Studies.* P. 2016;23.
65. Jama B., Zeila A. Agroforestry in the drylands of Eastern Africa. A call for action World Agro-forestry Center. 2005.
66. Gebreegziabher Z., Mekonnen A., Kassie M., Köhlin G. Household tree planting in Tigray, northern Ethiopia: Tree species, purposes, and determinants. 2010.
67. Mesfin F., Demissew S., Teklehaymanot T. An ethnobotanical study of medicinal plants in Wonago Woreda, SNNPR, Ethiopia. *J. Ethnobiol. Ethnomed.* 2009;5(1):1-18.
68. Abera B. Medicinal plants used in traditional medicine by Oromo people, Ghimbi District, Southwest Ethiopia. *J. Ethnobiol. Ethnomed.* 2014;10:1-15. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-40>
69. Hunde D., Asfaw Z., Kelbessa E. Use of traditional medicinal plants by people of 'Boosat' sub district, Central Eastern Ethiopia. *Ethiop. J. Health Sci.* 2006;16(2).
70. Negash M. Trees management and livelihoods in Gedeo's agroforests, Ethiopia. *Forests, Trees and Livelihoods.* 2007;17(2):157-68.
71. El Tahir B.A., Vishwanath A. Estimation of economic value of agroforestry systems at the local scale in Eastern Sudan. *Journal of Geoscience and Environment Protection.* 2015;3(09):38. <https://doi.org/10.4236/gep.2015.39005>
72. Mbaw C., Van Noordwijk M., Luedeling E., Neufeldt H., Minang P.A., Kowero G. Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2014;6:61-67. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.014>
73. Bishaw B., Neufeldt H., Mowo J., Abdelkadir A., Muriuki J., Dalle G., et al. Farmers' strategies for adapting to and mitigating climate variability and change through agroforestry in Ethiopia and Kenya. 2013.
74. Muleta D., Assefa F., Nemomissa S., Granhall U. Composition of coffee shade tree species and density of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) spores in Bonga natural coffee forest, southwestern Ethiopia. *For. Ecol. Manag.* 2007;241(1-3):145-54.
75. Madalcho A., Tefera M. Management of traditional agroforestry practices in Gununo Watershed in Wolaita Zone, Ethiopia. *For. Res.* 2016;5(1):1-6. <https://doi.org/10.4172/2168-9776.1000163>
76. Bishaw B., Abdelkadir A. Agroforestry and community forestry for rehabilitation of degraded watersheds on the Ethiopian highlands. 2003.
77. Nair P. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agrofor. Syst.* 2012;86:243-53. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9434-z>
78. Negash M., Kaseva J., Kahiluoto H. Perennial monocropping of khat decreased soil carbon and nitrogen relative to multistrata agroforestry and natural forest in southeastern Ethiopia. *Reg. Environ. Change.* 2022;22(2):38. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01905-3>
79. Gelaw A.M., Singh B., Lal R. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia. *Agr. Ecosyst. Environ.* 2014;188:256-63.
80. Gurmesa B., Demessie A., Lemma B. Dynamics of soil carbon stock, total nitrogen, and associated soil properties since the conversion of Acacia woodland to managed pastureland, parkland agroforestry, and treeless cropland in the Jido Komolcha District, southern Ethiopia. *J. Sustain. For.* 2016;35(5):324-37. <https://doi.org/10.1080/10549811.2016.1175950>
81. Chiemela S.N., Noulékoun F., Chiemela C.J., Zenebe A., Abadi N., Birhane E. Conversion of degraded agricultural landscapes to a smallholder agroforestry system and carbon sequestration in drylands. *Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag.* 2018;10(3):472-87. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-08-2015-0116>
82. Dilla A.M., Smethurst P.J., Barry K., Parsons D. Preliminary estimate of carbon sequestration potential of *Faidherbia albida* (Delile) A. Chev in an agroforestry parkland in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Forests, Trees and Livelihoods.* 2019;28(2):79-89.
83. Toru T., Kibret K. Carbon stock under major land use/land cover types of Hades sub-watershed, eastern Ethiopia. *Carbon Balance Manag.* 2019;14:1-14. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0122-z>
84. Gebrewahid Y., Gebre-Egziabher T.-B., Teka K., Birhane E. Carbon stock potential of scattered trees on farmland along an altitudinal gradient in Tigray, Northern Ethiopia. *Ecol. Proc.* 2018;7:1-8. <https://doi.org/10.1186/s13717-018-0152-6>
85. Gebremeskel D., Birhane E., Rannestad M.M., Gebre S., Tesfay G. Biomass and soil carbon stocks of *Rhamnus prinoides* based agroforestry practice with varied density in the drylands of Northern Ethiopia. *Agrofor. Syst.* 2021;95(7):1275-93.
86. Hagos H., Tesfay G., Brhane E., Abrha H., Bezabh T., Tesfay B., et al. Comparison of carbon stock potential of farmland trees in the midlands of Hawzen, Northern Ethiopia. *Sust. Environ.* 2021;7(1):1973696. <https://doi.org/10.1080/27658511.2021.1973696>
87. Nair P.R., Nair V.D., Kumar B.M., Showalter J.M. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv. Agron.* 2010;108:237-307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
88. Negash M., Starr M. Biomass and soil carbon stocks of indigenous agroforestry systems on the south-eastern Rift Valley escarpment, Ethiopia. *Plant Soil.* 2015;393:95-107. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2469-6>
89. Lai R. Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. *J. Sustain. For.* 2004;21(1):1-30.
90. Sollins P., Swanston C., Kramer M. Stabilization and destabilization of soil organic matter—a new focus. *Biogeochemistry.* 2007;85:1-7.

About the Author:

Kasu Hailu Biru – Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2549-8736>, Corresponding Author, kasuhailu128@gmail.com

Об авторе:

Касу Хайлу Биру – исследователь, <https://orcid.org/0000-0002-2549-8736>, автор для переписки, kasuhailu128@gmail.com

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-233-239>

Alemitu Worku Beyi*

Ethiopian Forestry Development Mekelle center,
Production forestry and urban forestry Research
Division
Ethiopia

*Correspondence: alemituworku13@gmail.com

Author's Contribution: Alemitu Worku Beyi: conceptualization, formal analysis, visualization, writing – review & editing.

Conflict of interest. Author declare that there is no conflict of interest.

For citation: Worku A.B. A Review of Opportunity and Challenge in Growing Street Trees in Paved Urban Environments. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):233-239. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-233-239>

Received: 21.04.2025

Accepted for publication: 25.08.2025

Published: 18.12.2025

Алемиту Ворку Бейи*

Центр развития лесного хозяйства Эфиопии
в Мекеле, Отдел исследований в области
производственного и городского лесоводства
Эфиопия

*Автор для переписки:

alemituworku13@gmail.com

Вклад автора: Ворку А.Б.: концептуализация, формальный анализ, создание рукописи и её редактирование.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Worku A.B. A Review of Opportunity and Challenge in Growing Street Trees in Paved Urban Environments. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):233-239. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-233-239>

Получено: 16.04.2025

Принято к публикации: 25.08.2025

Опубликовано: 18.12.2025

A Review of Opportunity and Challenge in Growing Street Trees in Paved Urban Environments

Check for updates



ABSTRACT

Street trees have long been recognized as a contributing factor to increased residential property values and offer numerous environmental, economic, and social benefits in both residential and commercial areas. This review article aims to examine the opportunities and challenges associated with planting street trees in urban environments. However, the rapid pace of urbanization has resulted in a significant rise in impermeable surfaces, which can intensify the environmental pressures faced by street trees. Street trees play a crucial role in urban life by delivering a wide array of advantages in residential and commercial zones, and they contribute to the well-being of communities by offering environmental, economic, and social benefits. Nevertheless, the expansion of impermeable surfaces can exacerbate the strains placed on urban ecosystems and urban forests. These strains often force tree roots to proliferate in areas that provide more favorable conditions for growth, but unfortunately, these areas also cause damage to infrastructure and uplift pavements. This damage incurs substantial costs, prompting the exploration of various preventive measures aimed at preserving tree health and minimizing pavement damage. This paper presents a comprehensive review of the benefits provided by street trees, their perceived value within communities, the expenses associated with uncontrolled root growth and pavement damage, and, most importantly, by implementing these preventive measures, urban areas can maintain the numerous benefits provided by street trees while mitigating the negative consequences associated with their growth, the latest research on proven measures to prevent pavement damage and enhance street tree growth.

KEYWORDS:

Green infrastructure; Ecosystem service; Global change; Infrastructure; Urbanization

Обзор возможностей и проблем выращивания уличных деревьев в условиях мощеных городских территорий

РЕЗЮМЕ

Уличные деревья давно признаны фактором, способствующим повышению стоимости жилой недвижимости, и предлагают многочисленные экологические, экономические и социальные преимущества как в жилых, так и в коммерческих районах. Цель данной обзорной статьи — изучить возможности и проблемы, связанные с посадкой деревьев в городских условиях. Однако быстрые темпы урбанизации привели к значительному увеличению непроницаемых поверхностей, что может усилить экологическое давление на деревья. Уличные деревья играют решающую роль в городской жизни, предоставляя широкий спектр преимуществ в жилых и коммерческих зонах, и способствуют благополучию сообществ, предлагая экологические, экономические и социальные выгоды. Тем не менее, расширение непроницаемых поверхностей может усугубить нагрузку на городские экосистемы и городские леса. Эта нагрузка часто заставляет корни деревьев разрастаться в местах, обеспечивающих более благоприятные условия для роста, но, к сожалению, эти места также наносят ущерб инфраструктуре и поднимают дорожное покрытие. Этот ущерб влечет за собой значительные затраты, что побуждает к изучению различных профилактических мер, направленных на сохранение здоровья деревьев и минимизацию повреждений дорожного покрытия. В данной статье представлен всесторонний обзор преимуществ, предоставляемых уличными деревьями, их ценности в сообществах, расходов, связанных с неконтролируемым ростом корней и повреждением дорожного покрытия, и, что наиболее важно, путем внедрения этих профилактических мер городские территории могут сохранить многочисленные преимущества, предоставляемые деревьями, одновременно смягчая негативные последствия, связанные с их ростом. Представлены последние исследования проверенных мер по предотвращению повреждения дорожного покрытия и стимулированию роста деревьев.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Зеленая инфраструктура, Экосистемные услуги, Инфраструктура, Урбанизация, Глобальные изменения

1. Introduction

Urbanization is the main elements of global change that dramatically influences biological and environmental patterns, affecting human well-being at all spatial scales [1]. Decreased vegetation cover is a hallmark of urbanization, and urban environments are on the cusp of having greater impervious surface than tree cover worldwide [2]. This trend toward increasing imperviousness has dramatic consequences for the environmental conditions experienced by urban populations locally and at regional-to-global scales. Tree canopy is related to better air quality and correspondingly lower cardiovascular and respiratory disease [3,4]. Areas with more tree canopy cover may have lower rates of violent crime [5,6]. Additionally, there is a correlation between a higher presence of trees and positive mental health outcomes [7], as well as improved perceptions of the environment by residents [8]. From a physical standpoint, the shade provided by trees effectively cools urban areas with low reflectivity [9], resulting in lower perceived temperatures [10] and a decrease in heat-related deaths [11,12]. Furthermore, trees serve as important habitats for urban wildlife [13] and help mitigate flooding and water quality issues by intercepting rainwater.

As climate change drives rising summer temperatures in cities worldwide, the value of urban trees will only increase, and it is particularly important to understand nuances between different types of urban trees to best support and manage equitable urban environments. Urban parks and the planting of trees along streets contribute to the development of engaging and lively public areas in cities. However, the growth of trees in these locations can be constrained if the design of tree plots does not effectively address the issue of water stress. In the past three decades, the main objective of street trees has shifted from a focus solely on aesthetics, aimed at enhancing the visual appeal and decorative aspects, to a broader purpose that encompasses providing various services. These services include reducing stormwater runoff, conserving energy, and enhancing the quality of air [14]. However, the advantages mentioned above are not fully experienced due to significant landscape design challenges that restrict the access of tree roots to vital resources such as water, air, and nutrients. The growth of trees is influenced by various non-living factors, including soil moisture, soil volume, soil permeability, soil composition, amount of sunlight reaching the canopy, and air quality [15]. Changes in soil moisture and nutrient availability in urban environments can lead to expensive infrastructure damage. For instance, tree roots tend to flourish beneath impermeable sidewalks and roads, where they can find sufficient water and nutrients for survival and growth [16].

Recent studies have focused on the use of permeable surfaces, which allow water to penetrate through the pavement and reach the soil [17,18]. According to various international literature, there are several factors related to the environment, econ-

omy, maintenance, and aesthetics that form the basis for selecting species and can influence the process of planting and selecting street trees [19,20] have proposed dividing the criteria for species selection into three categories that define the essential characteristics of urban trees: (i) "basic features" (such as adaptability to climate, tolerance to diseases and pests) [21]; (ii) "urban stress tolerance"[22]; and (iii) "amenity and functional features" (such as high aesthetic value, sturdy branches, autumn leaf color, dense foliage)[23]. This review provides an overview of the advantages of street trees, the difficulties encountered in cultivating trees in urban settings, and potential approaches to enhance the health of street trees and mitigate pavement damage. The main emphasis of the review is on the interactions between tree roots and pavements, although it acknowledges that other parts of the trees, such as trunks and branches, can also pose challenges to urban infrastructure. While the majority of the literature examined in the review originates from temperate regions like the United States and Europe, it also includes studies conducted in tropical areas.

2. The Importance of Street Tree in Urban

Cities can be seen as intricate settings influenced by various factors that can either contribute to their success or lead to their failure. These factors encompass the local economy, social cohesion and safety, city identity, infrastructure, and the overall health and well-being of the residents. While economic, environmental, and social influences are significant, the level of involvement and commitment demonstrated by city leaders plays a crucial role in shaping the outcomes. This becomes especially evident when examining the historical development of municipal policies and political engagement in relation to the physical structure and design of a city [24]. Urban street trees offer a wide range of advantages to cities and their inhabitants, contributing to the overall quality of urban environments and providing both measurable economic and environmental value. Extensive research has shown that these trees enhance local and regional air quality, raise property values, mitigate the urban heat island effect, reduce energy consumption for heating and cooling, and contribute to the visual appeal and distinctiveness of urban spaces [4]. Moreover, street trees play a crucial role in fostering healthy urban communities and have significant social impacts. They promote human well-being by improving public health [25], lowering crime rates, facilitating social interactions within communities [26], and increasing property values [27]. While these benefits are typically classified as environmental, economic, or social, it is important to note that some benefits overlap multiple categories.

2.1. Environmental importance of street tree in Urban

Street trees enhance the livability of towns and cities by offer-

ing several benefits. They reduce stormwater runoff, enhance air quality, store carbon, provide shade, and mitigate the urban heat island effect. Additionally, street trees promote biodiversity by serving as a food source, habitat, and landscape connectivity for urban wildlife [28]. Urban trees cool the environment through shading and transpiration. However, the extent of this cooling effect depends on the amount of canopy cover in the vicinity [29,10]. While some studies have found a linear relationship between canopy cover and cooling [30], emerging evidence suggests that the relationship is often nonlinear. It indicates that limited cooling occurs until canopy cover reaches 25%–50%, after which the cooling effect becomes more significant [30]. Nevertheless, further research is necessary to comprehend the underlying reasons for this nonlinearity and its applicability across different climate zones. Moreover, the strength of the correlation between canopy cover and cooling depends on the scale of observation [10]. The exact extent of the influence zone of street trees is not well-defined and is likely to vary with the time of day.

Increases in impervious surface area and soil compaction, due to urbanization, reduce water infiltration into soil and increase storm water runoff and peak flow rates. For example, urban runoff from summer rainfall is much higher from asphalt (62%) than from surfaces with tree pits (20%) or turf (<1%), highlighting the effect that trees can have on storm water reduction [31]. Leaves and branches intercept, absorb and temporarily store water before it evaporates from tree surfaces or gradually infiltrates into the soil. Mature deciduous trees, such as sweetgum, intercept between 1.89 and 2.65 kiloliter (kL) of water per year [32], while evergreen trees including pines can intercept more than 15.41 kiloliter (kL) per year [33]. Emissions and noise from road traffic can be a serious health issue but trees are particularly effective at diminishing noise and capturing airborne pollutants including ozone, nitrogen oxides, sulphur oxides, sulphur dioxides, carbon monoxide, carbon dioxide (CO₂) and particles less than 10µm in size [34]. Large healthy trees can remove between 60 and 70 times more air pollution than smaller trees [35]. Trees remove CO₂ from the atmosphere through photosynthesis, and they decrease the consumption of fuel for heating and cooling by providing shade and insulation [36]. The inner-city tree population of Melbourne, Australia (~100,000 trees) is estimated to have sequestered one million tons of carbon [37]. The cooling effect provided by trees is directly related to tree size, canopy cover, tree location, and planting density. As much as 80% of the cooling effect of trees results directly from shading [38]. Street trees can reduce daytime temperatures by between 5°C and 20°C, making everyday activities more pleasurable and healthier [39].

2.2. Social Importance of Street Tree in Urban

The presence of green spaces in urban areas has numerous positive effects on the community. It fosters interaction among residents, promotes physical activity, reduces stress, and enhances social cohesion [40]. Research suggests that urban areas with abundant street trees tend to experience lower crime rates and increased public safety. Studies have shown that building areas with a high amount of vegetation can lead to around 50% lower crime levels compared to areas with low vegetation, and a 10% increase in tree cover is associated with a 12% decrease in crime [6]. Moreover, larger street trees have been linked to a decrease in both the occurrence and fear of crime [40]. The reduced crime rates in well-maintained vegetation areas are often attributed to a stronger sense of community care among residents. Another social benefit of street trees is their ability to serve as a visual and physical barrier between pedestrians and motorists. By creating a vertical wall between the sidewalk and the road, street trees provide a clear boundary that helps guide motorists' movements and allows them to assess their speed, ultimately enhancing community safety [40]. Additionally, trees act as a physical defense for pedestrians, offering protection against vehicle-related injuries.

The economic advantages of urban street trees are not as straightforward to measure as those of traditional forestry or fruit trees, primarily because street trees typically lack a direct market value [27]. However, it is possible to estimate the economic benefits associated with street trees, which can provide a measurable basis for supporting municipal tree care programs and promoting tree planting initiatives. Expressing these benefits in monetary terms allows policymakers and decision-makers to easily comprehend and evaluate them. Unfortunately, there is often a tendency to remove trees without replacing them, as they are sometimes perceived as liabilities rather than assets due to misconceptions [42]. Street trees have the potential to provide various economic benefits, including reducing energy costs and increasing business income and property values. Extensive research has demonstrated the significant energy savings that can be achieved by planting street trees [27]. Moreover, the benefits of energy savings, carbon sequestration, stormwater management, and improved air quality can be estimated directly and evaluated in economic terms. The functional advantages of trees, such as their ability to remove air pollution through leaf absorption and their capacity to reduce stormwater runoff through root uptake and canopy interception, become more pronounced as the tree canopy cover increases.

3. Challenges of Growing Street Trees in Urban Environments

Street trees offer numerous advantages to the environment, society, and economy. However, they can also lead to disruptive

and expensive damage to pavement infrastructure. To mitigate these issues and minimize costs associated with pavement and tree replacement, researchers have explored preventive measures aimed at reducing damage and enhancing tree health.

3.1. Impact of Street Tree in urban environment

Despite their numerous benefits, street trees can also cause certain negative impacts on ecosystems [43]. One significant issue is the physical damage caused by tree roots to surrounding surfaces and underground structures, commonly referred to as root damage [44]. In urban areas, some street trees pose a gradual threat to public properties by compromising the structural integrity of sidewalks, curbs, and underground pipes. Above ground, root damage leads to sidewalk protrusions, and pedestrians may trip over buttress roots [45]. The scale of infrastructural problems caused by roots is evident in the annual expenditures allocated from government budgets for urban forestry or greening purposes. For example, a study conducted in Beijing estimated that the total value of ecosystem disservices, including root damage, was around 10.54 billion renminbi (RMB) in 2019, placing a financial burden on local governments. Additionally, both regional and national costs are incurred due to tree maintenance, infrastructure repairs, and compensatory payments to injured pedestrians. Older and larger tree species in urban areas are often responsible for footpath uplift and cracking [46].

4. Selection and Management of Street Tree in Urban Area

Street trees play a crucial role in urban landscapes and offer psychological, social, and economic benefits [47]. However, there are several challenges associated with the planting and selection of street trees. Firstly, the roots of street trees often damage sidewalk infrastructure, posing safety concerns for pedestrians. The extent of sidewalk damage depends on various factors such as tree characteristics, height, diameter at breast height, and the size of the planting hole [19]. Secondly, common issues in street tree management and maintenance include inadequate water supply, nutrient deficiencies, vandalism, soil compaction, mechanical injuries, pruning, and fertilization [48]. Thirdly, certain tree characteristics can contribute to environmental health problems, including the accumulation of fallen flowers, leaves, fruits, and an increase in insect populations [19]. Consequently, the selection of suitable street trees becomes crucial in order to avoid these problems. Several studies have identified criteria for street tree selection based on expert opinions or the input of managers. For example, [49], suggested considering visual, spatial, physical, biological, and functional factors when selecting tree species. [50], highlighted climatic adaptation, disease resistance, phenotypic plasticity, aesthetic fac-

tors, growth form, growth potential, and resistance to limb breakage as key considerations. [51], emphasized the importance of factors such as resistance to urban environments, landscape effects, ecological impacts, and economic considerations in the process of street tree selection.

Street trees play a crucial role in urban green infrastructure as they provide various ecosystem services, including air purification [52], microclimate regulation, and noise reduction, which contribute to improving human well-being [53]. However, street trees can also present certain challenges such as obstructing views and dropping litter. These negative impacts can be mitigated through the implementation of effective management plans that involve careful tree variety selection, establishment and care programs, and the support of the local municipality in terms of finances and expertise [52]. Currently, there is limited knowledge about street trees in sub-Saharan Africa, with most studies focusing on larger green spaces such as parks [54]. Previous studies conducted in northern cities have revealed that street trees were often uniform and comprised of a single species, with specialized public services responsible for their planting, maintenance, and protection [55-57]. While similar public services exist in many African cities, additional financial support and human resources are necessary. As a result, the few street trees that do exist are typically protected and maintained by local residents rather than formal institutions [58].

Uncontrolled Street tree harvesting has led to an increased interest among local populations in exploiting and diversifying their use, as noted by [59]. It has been observed that preferred tree species are being introduced into these plantations by the local communities resulting in changes to the composition of the plantations and posing challenges to tree viability and management approaches [60] discovered that urban street trees are susceptible to various stresses, such as pollution, as well as accidents caused by trampling, grazing, and vandalism. These factors hinder the growth and development of the trees. To mitigate these issues, protective equipment is sometimes installed around street trees during their growth. However, in many developing countries, including the cities of the Democratic Republic of the Congo (DR Congo), the condition of tree equipment is often not assessed before installation. In summary, uncontrolled access to street tree harvesting has heightened local interest in their abusive use and diversification. Local populations introduce preferred species into the plantations, leading to changes in floristic composition and management approaches. Urban street trees face stress and accidents, which impede their growth, and the assessment of tree equipment condition is often overlooked in developing countries like the DR Congo.

When selecting street trees, it is crucial to take maintenance and management into account [61]. A global study highlighted the importance of choosing trees that are easy to maintain, require minimal watering, need less frequent maintenance, align with availability and requirements, and have lower maintenance costs [61]. Local studies

Table 1. Roadside tree species selection [65]:

Site	Characteristics to consider
Social factor	Purpose of the trees: beauty, fruit, shade, serving as windbreaks, a filter of pollutants Functional utility: medicinal, nutritional, economic
Economic factors	Establishment costs Maintenance and management costs
Tree characteristic factors/ Resistance to urban environments	Flowering, adaptability, diversity, tolerance, structure, wind tolerance; resistance to termites, drought, poor soil, cold, high temperatures, diseases and pests, and mechanical damage; crown, height, and canopy density Selected trees should have a good canopy, providing Shade to cool the area along the road, making it more comfortable for the pedestrians
Educational factor	Knowledge, skills, experience, expertise
Environmental Constraints	Climatic conditions (heat, drought, and waterlogging tolerance), soil conditions The selected trees should be adaptable to various Conditions such as drought.
Cultural constraints	Utilities such as structures (buildings) and power lines (The selected trees should not grow tall enough to disrupt power lines, but if that is the case there must be a pollarding strategy
Limitation constraints	Space and planting location

have also emphasized the significance of engineering, budget, and human resources in street tree management [51]. To effectively manage street trees in the long term, it is essential to gather data on their distribution, including species composition, size and age structure, and spatial inventories. This information is valuable for urban managers who aim to maximize the environmental benefits provided by street trees, as factors such as species composition; size, canopy, and age structure significantly influence the environmental functions of these trees [62].

5. Tree species most suitable for urban growth

This part outlines particular criteria to consider when choosing appropriate tree species for planting alongside roads and details the methodology for assessing the suitability of streets for such planting. Additionally, this section highlights general factors in tree selection that reflect the needs and preferences of the community. The fundamental concept in street tree planting is selecting the correct tree for the appropriate location [50]. Due to the tough conditions along roadsides, planting requires special consideration. To maximize the advantages of street trees, it is crucial to choose tree species based on the characteristics of the site, the resilience of the trees, a thorough analysis of both the above and below ground conditions, and the potential of the tree species to enhance drainage, capture dust, and minimize surface runoff. The criteria for selection are grounded in the medicinal, nutritional, economic, and ecological importance of the trees, along with their adaptability, the cultural significance tied to particular species, and their capacity to absorb carbon dioxide [63]. The selected trees should be evergreen in order to capture dust year-round, particularly during the dry season when dust becomes problematic for farms and homes near the road [64]. Certain trees serve as a food source, notably those that yield fruit for nearby communities and passersby, including school children. Providing shade is also crucial for travelers who walk long distances under the relentless sun

on their way home. Table 1 details the factors to consider when selecting trees.

6. Conclusions and Recommendations

In conclusion, street trees and vegetation in urban areas offer valuable ecosystem services and contribute to the overall well-being of communities. They provide numerous environmental, social, and economic benefits, including shade, storm water reduction, improved air quality, habitat creation, and enhanced aesthetic appeal. While some costs associated with tree damage exist, the positive impacts of street trees are generally perceived as outweighing the negatives by city residents. However, the economic value of street trees is often underestimated. Therefore, it is important to quantify the environmental benefits of street trees in monetary terms to facilitate better understanding and decision-making by policymakers. To ensure the effective management of street trees, it is crucial to follow planting guidelines that promote appropriate tree selection and suitable spacing. This proactive approach can prevent future problems and minimize any potential harm to residents. Furthermore, fostering communication, coordination, and cooperation between urban forest managers and users is essential. This collaborative effort improves understanding and cultivates a more productive working relationship, ultimately enhancing the quality and reliability of the urban forest as a valuable resource.

It is worth noting that the literature available on street trees is geographically limited, which restricts the scope and generalizability of the conclusions drawn. Thus, further research on street trees, particularly in tropical regions, is necessary. Additional studies focusing on street tree benefits, infrastructure damage prevention, and strategies for managing urban trees would be highly valuable in guiding effective tree management practices in urban environments. Overall, increasing knowledge and awareness of the benefits and potential challenges associated with street trees will contribute to their successful integration and management within urban landscapes.

• References / Литература

1. Haase D., Guneralp B., Dahiya B., Bai X., Elmqvist T. Global urbanization. *The Urban Planet: Knowledge Towards Sustainable Cities*. 2018;(19):326-339.
2. Nowak D.J., Greenfield E.J. The increase of impervious cover and decrease of tree cover within urban areas globally (2012–2017). *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020;(49):126638.
3. Namin S., Xu W., Zhou Y., Beyer K. The legacy of the Home Owners' Loan Corporation and the political ecology of urban trees and air pollution in the United States. *Social Science & Medicine*. 2020;(246):112758.
4. Nowak D.J., Hirabayashi S., Bodine A., Greenfield E. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental pollution*. 2014;(193):119-129.
5. Gilstad-Hayden K., Wallace L.R., Carroll-Scott A., Meyer S.R., Barbo S., Murphy-Dunning C., Ickovics J.R. Research note: Greater tree canopy cover is associated with lower rates of both violent and property crime in New Haven, CT. *Landscape and Urban Planning*. 2015;(143):248-253.
6. Troy A., Grove J.M., O'Neil-Dunne J. The relationship between tree canopy and crime rates across an urban–rural gradient in the greater Baltimore region. *Landscape and urban planning*. 2012;106(3):262-270.
7. Willis K.J., Petrokofsky G. The natural capital of city trees. *Science*. 2017;356(6336):374-376.
8. Suchy A.K., Anderson E.C., Fork M.L., Lin L., Locke D.H., Groffman P.M., Grove J.M., LaDeau S.L., Rosi E.J., More green, fewer problems: landcover relates to perception of environmental problems. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2023;21(3):124-130.
9. Alonzo M., Baker M.E., Gao Y., Shandas V. Spatial configuration and time of day impact the magnitude of urban tree canopy cooling. *Environmental Research Letters*. 2021;16(8):084028.
10. Ziter C.D., Pedersen E.J., Kucharik C.J., Turner M.G. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019;16(15):7575-7580.
11. Hoffman J.S., Shandas V., Pendleton N. The effects of historical housing policies on resident exposure to intra-urban heat: a study of 108 US urban areas. *Climate*. 2020;(1):12.
12. Sinha P., Coville R.C., Hirabayashi S., Lim B., Endreny T.A., Nowak, D.J. Modeling lives saved from extreme heat by urban tree cover☆. *Ecological modelling*. 2021;(449):109553.
13. Le Roux D.S., Ikin K., Lindenmayer D.B., Manning A.D., Gibbons P. The value of scattered trees for wildlife: Contrasting effects of landscape context and tree size. *Diversity and Distributions*. 2018;24(1):69-81.
14. Seamans G.S. Mainstreaming the environmental benefits of street trees. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2013;12(1):2-11.
15. Morgenroth J., Buchan G., Scharenbroch B.C. Belowground effects of porous pavements—Soil moisture and chemical properties. *Ecological engineering*. 2013;(51):221-228.
16. D'Amato N.E., Sydnor T.D., Knee M., Hunt R., Bishop B. Which comes first, the root or the crack? *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*. 2002;28(6):277-282.
17. Mullaney J., Lucke T., Johnson T., Cameron D., Moore G. Pervious paving systems: potential use for promoting street tree health, reducing pavement damage and reducing stormwater flows. In SUDSnet International Conference. 2012.
18. Mullaney J., Lucke T. Practical review of pervious pavement designs. *CLEAN–Soil, Air, Water*. 2014;42(2):111-124.
19. Wang C.W., Tu H.M. Evaluating criteria weights of street tree selection between residents and experts. *Landscape and Ecological Engineering*. 2023;19(4):633-646.
20. Saebo A., Borzan Ž., Ducatillion C., Hatzistathis A., Lagerström T., Supuka J., García-Valdecantos J.L., Rego F., Van Slycken J. The selection of plant materials for street trees, park trees and urban woodland. *Urban forests and trees: A reference book*, 2005. pp.257-280.
21. Roloff A., Korn S., Gillner S. The Climate-Species-Matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2009;8(4):295-308.
22. Sjöman H., Nielsen A.B. Selecting trees for urban paved sites in Scandinavia—A review of information on stress tolerance and its relation to the requirements of tree planners. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2010;9(4):281-293.
23. Kirkpatrick J.B., Davison A., Daniels G.D. Resident attitudes towards trees influence the planting and removal of different types of trees in eastern Australian cities. *Landscape and urban planning*. 2012;107(2):147-158.
24. Galenicks A. Importance of urban street tree policies: A Comparison of neighbouring Southern California cities. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017;(22):105-110.
25. Donovan G.H., Butry D.T., Michael Y.L., Prestemon J.P., Liebhold A.M., Gatzolis D., Mao M.Y., The relationship between trees and human health: evidence from the spread of the emerald ash borer. *American journal of preventive medicine*. 2013;44(2):139-145.
26. Donovan G.H., Prestemon J.P. The effect of trees on crime in Portland, Oregon. *Environment and behavior*. 2012;44(1):3-30.
27. Pandit R., Polyakov M., Sadler R. The importance of tree cover and neighbourhood parks in determining urban property values. 2012.
28. Rhodes J.R., Ng C.F., de Villiers D.L., Preece H.J., McAlpine C.A., Possingham H.P. Using integrated population modelling to quantify the implications of multiple threatening processes for a rapidly declining population. *Biological conservation*. 2011;144(3):1081-1088.
29. Shiflett S.A., Liang L.L., Crum S.M., Feyisa G.L., Wang J., Jenerette G.D. Variation in the urban vegetation, surface temperature, air temperature nexus. *Science of the Total Environment*. 2017;(579):495-501.
30. Logan T.M., Zaitchik B., Guikema S., Nisbet A. Night and day: The influence and relative importance of urban characteristics on remotely sensed land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*. 2020;(247):111861.
31. Armson D., Stringer P., Ennos A.R. The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2013;12(3):282-286.
32. Escobedo F.J., Seitz J. Urban forests in Florida: Trees control stormwater runoff and improve water quality. 2011.
33. Capiella K. Urban Watershed Forestry Manual: Part 1: Methods for Increasing Forest Cover in a Watershed (Vol. 4, No. 5). United States Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry. 2005.
34. Tallis M., Taylor G., Sinnett D., Freer-Smith P.. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban

- tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*. 2011;103(2):129-138.
35. McPherson E.G. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project (Vol. 186). US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 1994.
36. Ferrini F., Fini A. Sustainable management techniques for trees in the urban areas. 2011.
37. Moore G.M. September. Urban trees: worth more than they cost. In Proc. 10 the National Street Tree Symp., Univ. Adelaide/Waite Arboretum, Adelaide. 2009. pp. 7-14.
38. Shashua-Bar L., Pearlmutter D., Erell E. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and urban planning*. 2009;92(3-4):179-186.
39. Tosti F., Bianchini Ciampoli L., Brancadoro M.G., Alani A. GPR applications in mapping the subsurface root system of street trees with road safety-critical implications. *Advances in transportation studies*. 2018;(44).
40. Tarran J. September. People and trees, providing benefits, overcoming impediments. In Proceedings of the 10th National Street Tree Symposium (pp. 63-82). Adelaide University Adelaide, Australia. 2009.
41. Donovan G.H., Prestemon J.P. The effect of trees on crime in Portland, Oregon. *Environment and behavior*. 2012;44(1):3-30.
42. McHale, Melissa R. Gregory McPherson E., Burke Ingrid C. "The potential of urban tree plantings to be cost effective in carbon credit markets. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2007;6(1):49-60.
43. Von Döhren P., Haase D. Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological indicators*. 2015;(52):490-497.
44. Shi F., Meng Q., Pan L., Wang J.. Root damage of street trees in urban environments: An overview of its hazards, causes, and prevention and control measures. *Science of the Total Environment*. 2023. p.166728.
45. Smiley E.T. Root pruning and stability of young willow oak. *Arboriculture and Urban Forestry*, 2008;34(2):123.
46. Gul A., Kamil O., Eraslan S.. Design of the Urban Street Trees and Problems in Turkey. *Miestų želdynų formavimas*. 2012;1(9):43-53.
47. Nagendra H., Gopal D. (Street trees in Bangalore: Density, diversity, composition and distribution. *Urban forestry & urban greening*. 2010;9(2):129-137.
48. Nowak D.J., McBride J.R., Beatty R.A. Newly planted street tree growth and mortality. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*. 1990;16(5):124-129.
49. Amir S., Misgav A. A framework for street tree planning in urban areas in Israel. *Landscape and Urban Planning*. 1990;19(3):203-212.
50. Saebo A., Benedikz T., Randrup T.B. Selection of trees for urban forestry in the Nordic countries. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2003;2(2):101-114.
51. Li Y.Y., Wang X.R., Huang C.L. Key street tree species selection in urban areas. *African Journal of Agricultural Research*. 2011;6(15):3539-3550.
52. McHale, Melissa R., Gregory McPherson E., Burke Ingrid C. "The potential of urban tree plantings to be cost effective in carbon credit markets." *Urban Forestry & Urban Greening*. 2007;6(1):49-60.
53. Makumbelo E., Paulus S., Luyindula N., Lukoki L. Apport des arbres fruitiers à la sécurité alimentaire en milieu urbain tropical: cas de la commune de Limete-Kinshasa, République Démocratique du Congo. *Tropicultura*. 2005.
54. Kadiata B.D., Ndamiyehe J.B. Richness of Forest Stands and Atmospheric Carbon Dioxide Storage in Urban Institutional Lands of Bukavu, DR Congo. *Journal of forest and environmental science*. 2017;33(2):79-90.
55. Toussaint A., de Meerendre V.K., Delcroix B., Baudoin J.P. Analyse de l'impact physiologique et économique de l'élégage des arbres d'alignement en port libre. BASE. 2002.
56. Fernandes C.O., da Silva I.M., Teixeira C.P., Costa L. Between tree lovers and tree haters. Drivers of public perception regarding street trees and its implications on the urban green infrastructure planning. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019;(37):97-108.
57. Stas M., Aerts R., Hendrickx M., Dendoncker N., Dujardin S., Linard C., Nawrot T., Van Nieuwenhuysse A., Aerts J.M., Van Orshoven J., Somers B. An evaluation of species distribution models to estimate tree diversity at genus level in a heterogeneous urban-rural landscape. *Landscape and Urban Planning*. 2020;(198):103770.
58. Gwedla N., Shackleton C.M. Perceptions and preferences for urban trees across multiple socio-economic contexts in the Eastern Cape, South Africa. *Landscape and Urban Planning*. 2019;(189):225-234.
59. Richardson E., Shackleton C.M. The extent and perceptions of vandalism as a cause of street tree damage in small towns in the Eastern Cape, South Africa. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2014;13(3):425-432.
60. Useni Sikuzani Y., Mpibwe Kalenga A., Yona Mleci J., N'Tambwe Nghonda D., Malaisse F., Bogaert J. Assessment of street tree diversity, structure and protection in planned and unplanned neighborhoods of Lubumbashi City (DR Congo). *Sustainability*. 2020;14(7):3830.
61. Roy S., Davison A., Östberg J. Pragmatic factors outweigh ecosystem service goals in street tree selection and planting in South-East Queensland cities. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017;(21):166-174.
62. Maco S.E., McPherson E.G. A practical approach to assessing structure, function, and value of street tree populations in small communities. *Journal of Arboriculture*. 2003;29(2):84-97.
63. Baldauf R. Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality. *Transportation research part D: Transport and environment*. 2017;(52):354-361.
64. Singh O. Species Selection in *Urban Forestry—Towards Urban Metabolism*. In *Urban Metabolism and Climate Change: Perspective for Sustainable Cities* (pp. 275-293). Cham: Springer International Publishing. 2023.
65. Gilman E.F., Sadowski L. *Choosing suitable trees for urban and suburban sites: site evaluation and species selection*. University of Florida, IFAS Extension. 2007.

About the Author:

Alemitu Worku Beyi – Researcher, <https://orcid.org/0009-0006-8825-6933>,
Corresponding Author, alemituworku13@gmail.com

Об авторе:

Алемиту Ворку Бейи – исследователь, <https://orcid.org/0009-0006-8825-6933>,
автор для переписки, alemituworku13@gmail.com



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН СЕМЯН
ФГБНУ ФНЦО

Наши сорта и технологии - гарантия урожая и качества

БОЛЬШОЙ ВЫБОР СЕМЯН от ведущего производителя в России

КОНТАКТЫ:

Отдел продаж ФГБНУ ФНЦО: +7(495)594-77-17, +7(903)190-46-55

E-mail: info@vniissok.com

Интернет-магазин: www.vniissok.com

Магазин "Семена ВНИССОК":

Адрес: 143080, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИССОК, ул. Липовая, д.2

График работы: понедельник-пятница 9.00-18.00, суббота 9.00-17.00, воскресенье 9.00-14.00

В нашем магазине Вы всегда можете самостоятельно купить семена, свежие овощи, рассаду, цветы, а также сопутствующие товары.



на правах рекламы

МАСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ СЕЛЕКЦИИ

www.vniissok.com