

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 к печати: 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. Dzhatdоеva³

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., Dzhatdоеva 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., Dzhatdоеva 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

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 светодидов 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), «линалоольный» (*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].

Бasilik (*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. Собранный 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 50х100х50 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 точечно 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

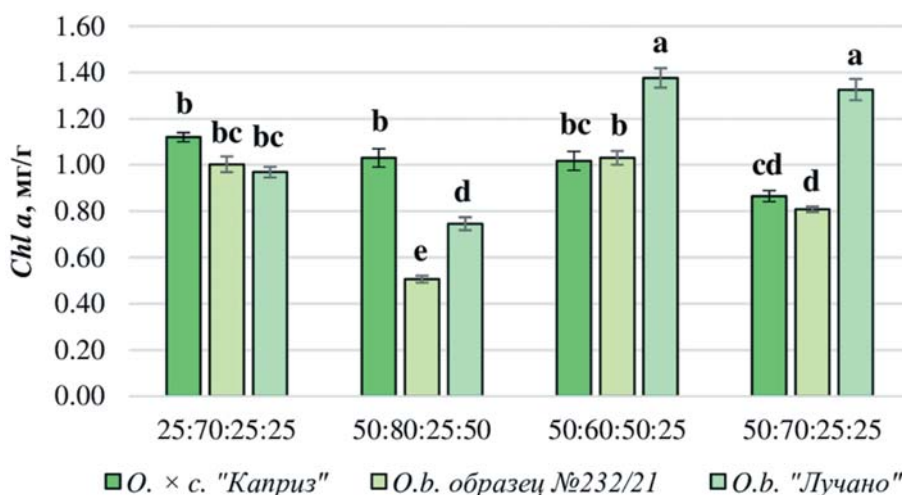


Рис. 1. Содержание Chl *a* (мг/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 1. Content of Chl *a* (mg/g of raw weight) in basil 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)

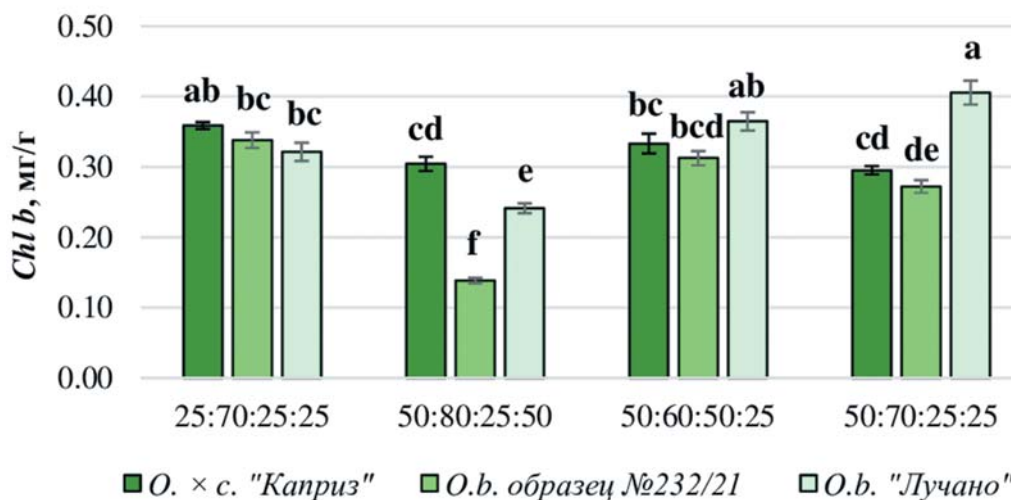


Рис. 2. Содержание Chl *b* (мг/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 2. Content of Chl *b* (mg/g of raw weight) in 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)

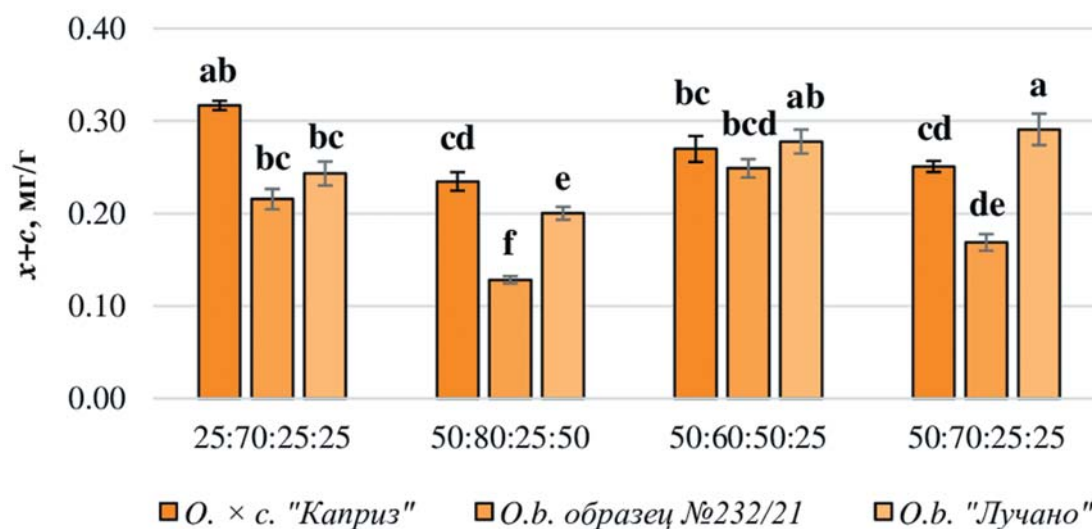


Рис. 3. Содержание х+с (мг/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 3. Content of carotenoids (mg/g of raw weight) in 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

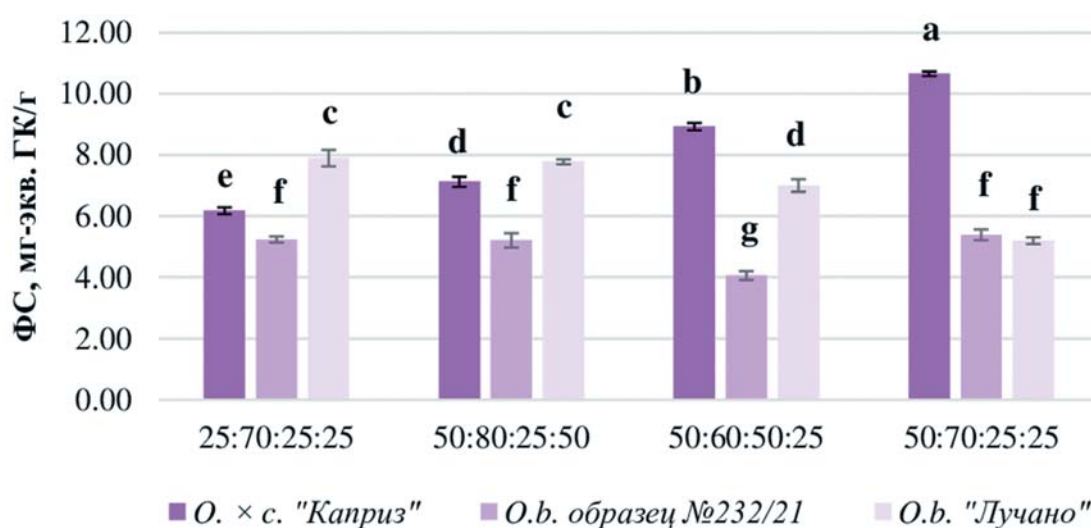


Рис. 4. Содержание ФС (мг-экв. ГК/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f, g) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 4. Content of phenolic compounds (mg-eq. 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)

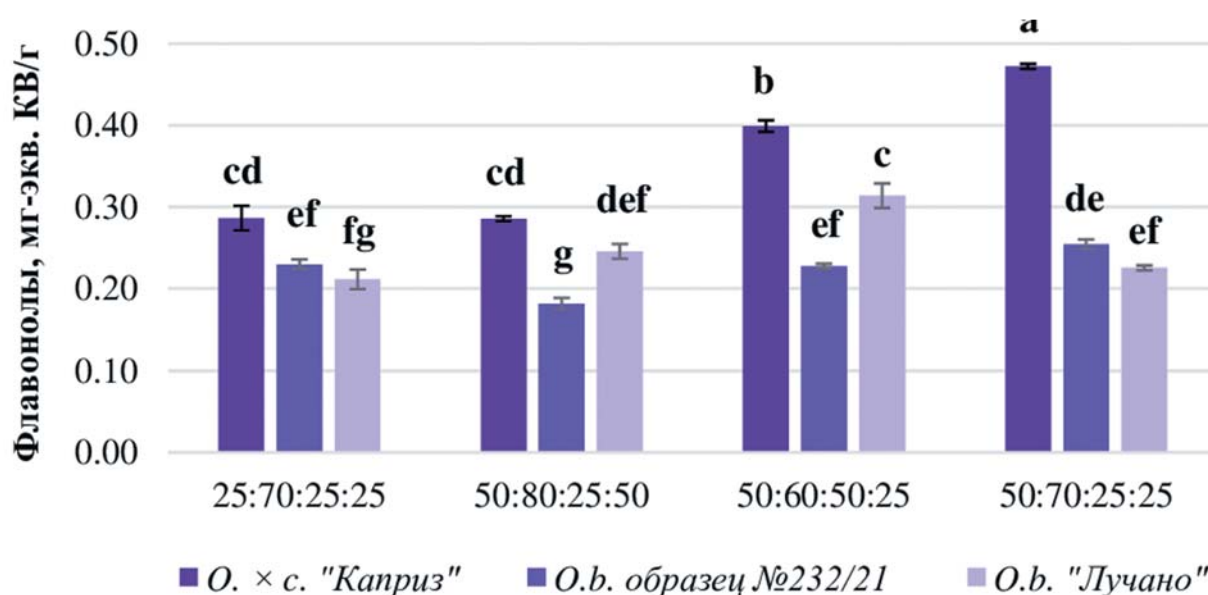


Рис. 5. Содержание флавонолов (мг-экв. КВ/г сырого вещества) в листьях базилика при использовании вариативных режимов LED-освещения (С:Б:К:Р). Разные буквы (a, b, c, d, e, f, g) указывают на статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами (тест Тьюки)
Fig. 5. Content of flavonols (mg-eq. 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 содержаний, 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., Yattoo 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., Krämer 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., Krämer 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., Cizauskaitė 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. Dzatdоеva – 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