

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-2-70-81>
УДК: 635.25:581.19:631.524.85

Н.А. Голубкина¹, В.И. Немтинов²,
З.А. Амагова³, А.А. Кошеваров¹

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 Научно-исследовательский
Институт Сельского Хозяйства Крыма
295043, Россия, Республика Крым, Симферополь,
Киевская ул., 150

³ Чеченский научно-исследовательский
институт сельского хозяйства
366021, Россия, г. Грозный

*Автор для переписки: segolubkina45@gmail.com

Вклад авторов: Голубкина Н.А.: концептуализация, изучение литературы, написание текста и редактирование рукописи. Немтинов В.И.: курирование данных, редактирование рукописи. Амагова З.А.: участие в библиографическом поиске и оформлении рукописи. Кошеваров А.А.: библиографический поиск, форматирование рукописи. Все авторы участвовали в написании статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Голубкина Н.А., Немтинов В.И., Амагова З.А., Кошеваров А.А. Лук репчатый. Биологическая активность, антиоксиданты, устойчивость к неблагоприятным факторам среды. *Овощи России*. 2025;(2):70-81. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-2-70-81>

Поступила в редакцию: 19.12.2024

Принята к печати: 20.02.2025

Опубликована: 15.04.2025

Nadezhda A. Golubkina^{1*}, Viktor I. Nemtinov²,
Zarema A. Amagova³, Andrew A. Koshevarov¹

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

² Crimean Agricultural Institute
150, Kievskaya str., Simferopol,
Republic of Crimea, 295043, Russia

³ Chechen Scientific Institute of Agriculture
Grozny, 366021, Russia

*Corresponding Author: segolubkina45@gmail.com

Authors' Contribution: Golubkina N.A.: conceptualization, conceived the review topics and involved in the bibliographic search, as well as writing the draft and final version of the manuscript. Nemtinov V.I.: data curation and critical revision of the manuscript's final version. Amagova Z.A.: was involved in the bibliographic search and manuscript formatting. Koshevarov A.A.: was involved in the bibliographic search and manuscript formatting. All the authors participated in writing the manuscript.

For citation: Golubkina N.A., Nemtinov V.I., Amagova Z.A., Koshevarov A.A. *Allium cepa*. Biological activity, antioxidants, tolerance to unfavourable environmental factors. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(2):70-81. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-2-70-81>

Received: 19.12.2024

Accepted for publication: 20.02.2025

Published: 15.04.2025

Лук репчатый. Биологическая активность, антиоксиданты, устойчивость к неблагоприятным факторам среды

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Производство и использование лука репчатого является важнейшим элементом питания и поддержания здоровья человека. В обзоре рассмотрена совокупность биологически активных соединений лука, определяющих биологическое действие, особенности распределения антиоксидантов и углеводов между внешними и внутренними чешуями, изменения содержания и распределения биологически активных соединений и химических элементов при разных формах абиотического стресса: высоких температурах, засухе, подтоплении, воздействии тяжелых металлов, а также обсуждаются факторы, влияющие на остроту лука репчатого и уровни накопления природных антиоксидантов. Особое внимание уделено соединениям серы- алкенил цистеин сульфоксидам, полифенолам и флавоноидам, стеролам, фруктоолигосахаридам, органическим кислотам, аминокислотам и минералам. Рассмотрены вопросы селекции лука на устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды. Представленные материалы могут явиться основой для направленного получения лука репчатого с высоким урожаем и высокими показателями качества.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Allium cepa*, пищевая ценность, лечебные свойства, устойчивость к оксидантному стрессу

Allium cepa. Biological activity, antioxidants, tolerance to unfavourable environmental factors

ABSTRACT

Production and utilization of *Allium cepa* is the basis of nutritional value and the human health maintenance. The review discusses the main onion biologically active compounds, determining the biological activity of this vegetable, peculiarities of antioxidant and carbohydrate distribution between inner and outer scales, changes in the content and distribution of biologically active compounds and chemical elements in conditions of various abiotic stresses: high temperature, drought, flooding and heavy metal loading. Factors affecting onion pungency and natural antioxidant distribution are included. Special attention is paid to sulphur derivative alkenyl cysteine sulfoxides, and polyphenols and flavonoids, sterols, fructooligosaccharides, organic acids, amino acids, and minerals. Onion selection on tolerance to the unfavorable environmental factors is discussed. The presented data may be the basis for the direct production of *Allium cepa* with high yield and valuable nutritional characteristics.

KEYWORDS: *Allium cepa*, nutritional value, medicinal properties, tolerance to oxidative stress

1. Производство и биологическое действие

Лук репчатый (*Allium cepa* L.) относится к семейству *Amaryllidaceae* и является одним из наиболее древних культивируемых видов. Согласно данным FAOSTAT [1] важными производителями лука репчатого в мире на 2022 год являются Индия (31687000 т/год), Китай (24542011,2 т/год), Египет (3663943,34 т), США (2918958 т), Бангладеш (2517070 т), Турция (2350000 т), Пакистан (2062336 т), Индонезия (1982360,22 т), Иран (1900000 т), Россия (1855900 т) и Алжир (1763117,95 т). В процентном отношении наибольшая доля производства приходится на страны Азии и Африки, в то время как производство лука в Америке, Океании и Европе в 7-21 раз ниже (рис.1).

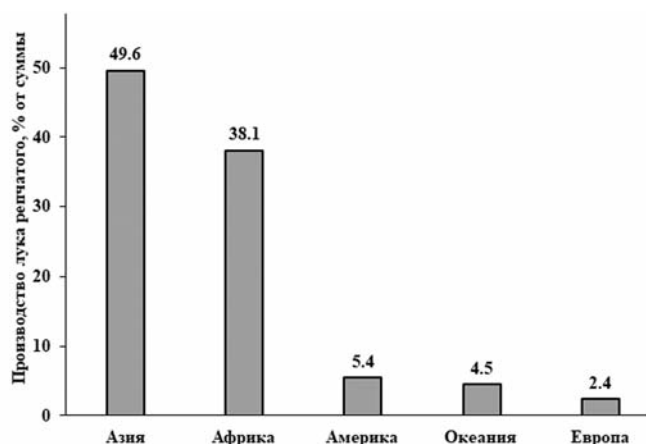


Рис. 1. Доля валового производства лука репчатого по разным регионам и континентам мира [1]
Fig. 1. Total *Allium cepa* production in different regions and continents of the world

Лук репчатый – двулетняя культура. Цвет внешних чешуй варьирует от белых до темно-красных в зависимости от наличия или отсутствия пигментов антиоксидантного действия (антоцианов и полифенолов) [2,3]. Генетические особенности определяют различия в морфо-физиологических характеристиках, фотопериоде, размерах луковицы, ее форме, цвете и биохимическом составе [4].

Пищевая ценность и антиоксидантный статус луковиц определяется совокупностью многочисленных показателей, таких как содержание сухого вещества, растворимых соединений, макро- и микроэлементов, сахаров, аминокислот, лектинов, пировиноградной кислоты, тиосульфидов, сапонинов, полифенолов и флавоноидов [5]. В совокупности эти соединения обеспечивают высокую биологическую и фармакологическую активность лука, известного своими антиоксидантными, противогрибковыми, антиканцерогенными, противовоспалительными свойствами, способностью препятствовать образованию тромбов и снижать уровень холестерина в крови [5] (рис.2). Среди этих соединений тиосульфиды определяют также аромат и вкус лука. Количественный и компонентный состав производных серы определяются как генотипом, так и внешними факторами: температурой, количеством осадков, плодородием почвы [6]. Лук известен своим антимикробным, кардиопротекторным, противогельминтным, гипогликемическим, противоревматоидным, антиспазмолитическим, диуретическим, антисептическим и противоастматическим действием (рис.2). Кроме того, лук репчатый улучшает качество спермы, лечит хронический кашель, а также предотвращает атеросклероз, очищает септические раны и заживляет язвы [7].



Рис. 2. Лечебные свойства лука репчатого
Fig.2. Medicinal properties of *A. cepa*

Эпидемиологические исследования в Западной Европе, выполненные на группе жителей с различным уровнем потребления лука, выявило статистически значимое снижение заболеваний рака полости рта, глотки, гортани, молочной железы, яичников, предстательной железы и почечно-клеточного рака в группе, потреблявшей значительные количества лука репчатого [8].

2. Важнейшие биологически активные соединения

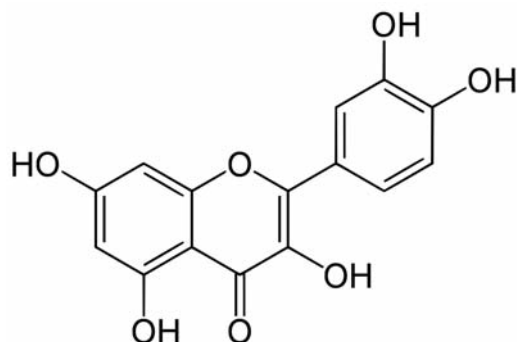
Широкий спектр положительного действия лука на здоровье человека связан с присутствием важных химических соединений, таких как флавоноиды, алкенил цистеин сульфоксиды (ACSO), фрукто-олигосахариды, пищевые волокна, стероидные сапонины [5], а также эссенциальные микроэлементы, включая Se, Mn и Fe (Рис.3).



Рис. 3. Наиболее важные биологически активные соединения и эссенциальные микроэлементы в *Allium cepa*
Fig. 3. The most significant biologically active compounds of *A. cepa*

В последнее время все большее внимание обращают на идентификацию вторичных метаболитов пищи, таких как сапонины, не являющиеся эссенциальными микронутриентами, но влияющие на гомеостаз организма человека и поддержание здоровья [5]. Такой интерес связан с данными эпидемиологических исследований, показавших, что полувегетарианская диета снижает частоту хронических и острых воспалительных заболеваний, в частности, атеросклероза и рака. Луковицы также являются важными источниками диетических полифенолов, включающих огромное количество соединений с высокой антиоксидантной активностью [9]. Они защищают организм человека от разрушения клеток, окисления ДНК, белков и липидов, вызванных воздействием свободных радикалов (ROS), играющих важную роль в процессах старения, развития и возникновения различных заболеваний.

Важнейшим флавоноидом лука является кверцетин.



Формула кверцетина. *Quercetin formula*

Кверцетин способен защищать липиды низкой плотности от перекисного окисления, снижая, таким образом, риск кардиологических заболеваний [5]. Экспериментальные исследования доказали защитный эффект кверцетина в процессах, сопровождающих развития рака: активации канцерогенов, образовании клеточных сигналов, регулировании клеточного цикла, ангиогенезе, оксидантном стрессе, воспалении. Кроме того, кверцетин и другие флавоноиды также оказывают положительное действие на работу желудочно-кишечного тракта благодаря противоязвенному, антиспазмолитическому и антидиарейному действию [10].

Исследование влияния приема флавоноидов добровольцами выявило, что содержание соответствующих гликозидов в плазме крови (кверцетин-3-гликозид и изорамнетин-4-гликозид) значительно повышалось после приема лука и сопровождалось возрастанием устойчивости лимфоцитарной ДНК к разрыву цепи уже через 4 часа после введения флавоноидов и значительным снижением уровня окисления ДНК [7]. Другие исследования выявили эффективный гидролиз моно- и дигликозида кверцетина в малой кишке под действием β -гликозидазы до кверцетина, большая часть которого абсорбировалась. Следует отметить, что абсорбция диетических гликозидов кверцетина у человека составляет 20-50 %, причем, остаток сахара является важным детерминантом биодоступности, поскольку время абсорбции колеблется от менее 0.5 часа до 9 часов, в зависимости от типа гликозида. Для 4'-гликозида кверцетина уровень в плазме максимален через 1–1.5 часа после приема, что составляет всего 0.2% экскреции с мочой. Установлено, что кверцетин абсорбируется у человека из пищи до значимых уровней, повышая антиоксидантную активность плазмы [7,11]. Алкил сульфиды и диаллил дисульфиды проявляют защитный эффект от возникновения и развития рака, путем модуляции ферментов, участвующих в метаболизме канцерогенов. Более того, S-метил-L-цистеин сульфоксид проявляет гиполипидемическое действие, а также антигипергликемическую активность, а α -сульфинил-дисульфиды препятствуют образованию тромбов [7]. Алкенил цистеин сульфоксиды (ACSO) также проявляют противогрибковое и антибактериальное действие [9].

Фруктаны лука стимулируют рост специфических микроорганизмов в прямой кишке (таких как бифидобактерий, лактобактерий) обеспечивая общее положительное действие на работу желудочно-кишечного тракта, а инулин улучшает липидный профиль крови и положительно действует на микрофлору прямой кишки [12].

Сапонины, выделенные из лука, могут действовать как природные лекарственные соединения, эффективные в лечении многочисленных болезней, проявляя противогрибковое, противораковое, анти-спазмолитическое действие, снижая уровень холестерина в крови, защищая от цитотоксичности и препятствуя коагуляции крови [10].

3. Пищевая ценность

3.1. Сухое вещество, пищевые волокна и неструктурированные полисахариды

Содержание сухого вещества в луковицах варьирует в широких пределах от 6 до 25%. При этом при содержании менее 15% лук считается салатным. В то же время следует отметить, что содержание сухого вещества в значительной степени зависит от водного режима [13].

Содержание пищевых волокон (ПВ) в луковицах также значительно варьирует в зависимости от сорта. Тем не менее, общей закономерностью является предпочтительное накопление нерастворимых ПВ во внешних чешуях, где они присутствуют в основном в виде пектин олигосахаридов при небольшом содержании галактозы [12].

Потребление пищевых волокон снижает риск кардиологических и желудочно-кишечных заболеваний, рака прямой кишки, диабета и ожирения. Снижение уровня холестерина в крови в результате потребления пищевых волокон может быть связано со снижением абсорбции липидов, холестерина и желчных кислот.

Содержание водорастворимых пищевых волокон значительно ниже, чем не растворимых, во всех частях луковиц, а предпочтительным углеводом является галактоза. Соотношение растворимых/нерастворимых ПВ для лука репчатого составляет от 3 до 7 и является оптимальным для здоровья человека.

Неструктурированные углеводы лука репчатого включают фруктаны, сахарозу, глюкозу и фруктозу [12]. Степень полимеризации фруктанов низкая [14], содержание фрукто-олигосахаридов составляет около 2.8%, в то время как содержание общих фруктанов достигает 60%, а степень полимеризации фруктанов прямо пропорциональна их содержанию [15].

Как природные пищевые волокна, фрукто-олигосахариды устойчивы к ферментативному гидролизу в желудочно-кишечном тракте и остаются стабильными в процессе транспорта в слепой и прямой кишке. Таким образом, поступление с пищей фрукто-олигосахаридов не изменяет концентрацию глюкозы в крови, и эти соединения безопасны для диабетиков. В прямой кишке фрукто-олигосахариды подвергаются ферментативному гидролизу бифидобактериями до короткоцепочечных карбоновых кислот (ацетатов, пропионатов и бутиратов), которые стимулируют рост полезных бифидобактерий и ингибируют процесс колонизации кишечника патогенами. Эти свойства в совокупности со стимулированием очистки кишки, позволяет классифицировать эти соединения как водорастворимые пищевые волокна. Более того, фрукто-олигосахариды вызывают снижение уровня холестерина, фосфолипидов и триглицеридов в сыворотке крови [12].

В сортах с низким содержанием сухого вещества фруктаны гидролизуются до фруктозы – важного осморегулятора, – в то время как в сортах с высоким содержанием сухого вещества фруктаны не гидролизуются из-за генетической неспособности абсорбировать воду. В целом наиболее высокие концентрации фрукто-олигосахаридов и сахаров

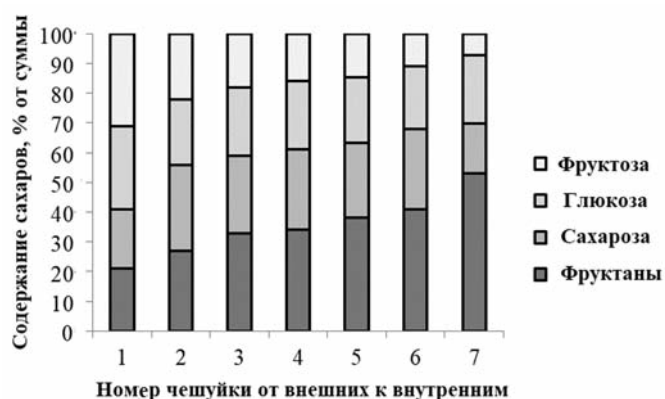


Рис. 4. Распределение углеводов в луковицах А. сепа [16]
Fig. 4. Carbohydrate distribution in A. cepa bulbs

выявлены во внутренних чешуях, и наоборот: наибольшая концентрация фруктозы установлена во внешних чешуях (рис 4) [16-18]. Концентрация глюкозы и сахарозы относительно стабильны, в то время как содержание фрукто-олигосахаридов наименьшее во внешних чешуях луковицы [12].

Таблица 1. Содержание органических кислот в луковицах (мг/100 г сырой м.) [20]
Table 1. Organic acid content in onion bulbs

Органические кислоты Organic acids	Среднее Mean	CV (%)	Интервал концентраций Concentration range
Глутаминовая Glutaminic	325	40,9	192-433
Лимонная Citric	48,5	49,7	31,1-75,3
Яблочная Malic	43,6	23,9	31,1-50,3
Винная Tartaric	18,8	45,7	8,9-25,2
Щавелевая Oxalic	11,3	32,7	6,6-14,6
Аскорбиновая Ascorbic	3,75	30,1	2,03-4,84
Фумаровая Fumaric	0,24	58,3	0,16-0,47
Пировиноградная (мкМ) Pyruvic	3,51	50,1	1,68-4,26
pH	5.55	2.5	5,47-5,67
Общая кислотность Total acidity	0.113	14.2	0,099-0,115
Водорастворимые соединения (° Brix), % Water soluble compounds	6.0	30.0	4,9-8,6

Следует отметить, что существует прямая корреляция между содержанием сухого вещества и содержанием фруктанов [17]. В качестве основных компонентов углеводов луковицы фруктаны ферментативно гидролизуются в процессе хранения до фруктозы, как источника энергии для проростков.

Исследование 22 сортов А. сепа выявило, что общее содержание сахаров существенно более устойчиво (CV=5.9%) [16], чем содержание моносахаров (CV=26%), уровень которых обратно пропорционален содержанию сухого вещества ($r = -0.91$; $P < 0.001$) [19]. Эти взаимосвязи указывают, что наиболее хорошо хранящиеся сорта имеют наименьшее содержание моносахаров, а сорта, пригодные для салатов, наиболее богаты глюкозой и фруктозой.

По данным Shiomai et al. [12], содержание фруктанов непосредственно связано с содержанием сахарозы, остротой

лука и интенсивностью агрегации тромбоцитов. Эти результаты подтверждают гипотезу о том, что луковицы с высоким содержанием фруктанов абсорбируют и удерживают меньше воды, способствуя повышению концентрации водорастворимых углеводов и тиосульфидов, ответственных за остроту лука и подавление агрегации тромбоцитов. Фрукто-олигосахариды с более высоким уровнем полимеризации гидролизуются быстрее, чем фруктаны с меньшей степенью полимеризации, что обеспечивает поддержание градиента сахарозы и фруктозы.

3.2. Кислотность

Совместно с алкенил цистеин сульфоксидами (ACSO), органические кислоты влияют на органолептические свойства луковиц, участвуя во многих метаболических процессах, регулируя кислотность и pH сока луковицы. Экспериментальные данные показывают, что лук характеризуется широким интервалом концентрации органических кислот, среди которых первое место по содержанию занимает глутаминовая кислота (табл. 1). Показательно, что наименьший коэффициент вариации характерен для яблочной кислоты (23,9%) и наибольший – для фумаровой (58,3%) [20].

Органические кислоты неравномерно распределены в луковице с наибольшим уровнем яблочной кислоты во внешних чешуях и лимонной во внутренних [18], что косвенно подтверждает протекторное действие яблочной кислоты от воздействия разных форм оксидантного стресса [21]. Содержание аскорбиновой кислоты в луковицах относительно низкое и не влияет существенно на антиоксидантные свойства лука. Наибольшие уровни аскорбиновой кислоты характерны для салатных луков с низким уровнем сухого вещества [19]. По данным Hallman и Rembiałkowska [22], красный лук содержит больше аскорбиновой кислоты, чем желтый и белый. Уровни органических кислот взаимосвязаны, что проявляется в значимых коэффициентах корреляции между содержанием пировиноградной кислоты и яблочной, щавелевой и лимонной кислотами, щавелевой и лимонной кислотами ($r=0,71, 0,65$ и $0,66$).

3.3. Минеральный состав

Уровень аккумуляции макро- и микроэлементов определяется генетическими факторами, климатом, гормональным статусом, взаимодействием нутриентов и типом почвы [23].

Для лука, выращенного в Московской области [24], содержание макроэлементов снижалось в ряду: $K > P > Ca > Mg$, в то время как снижение уровня накопления микроэлементов соответствовало ряду: $Fe > Si > Zn > Mn > B > Cu$. Как и для многих других сельскохозяйственных культур, для лука репчатого установлена положительная корреляция между Mn и Fe [24,23]. Высокий коэффициент корреляции между Fe и Mn ($r=0,94$; $P<0,001$) свидетельствует о стабильности соотношения Fe/Mn ($CV = 11\%$), что представляется важным для развития растения [23]. Более того, положительная корреляция между Cu и Mn в луковицах ($r=0,65$; $P<0,001$) находится в хорошем соответствии с данными возрастания уровня накопления Cu при внесении Mn [23]. Установлено, что способность луков аккумулировать макро- и микроэлементы снижается в ряду: желтые сорта > белые сорта > красные сорта [25].

Помимо генетических факторов на абсорбцию химических элементов влияет технология выращивания: Так, в условиях органического земледелия луковицы накапливают больше Mg и Cu , но меньше Mn , Fe , Zn и Co по сравнению с традиционным земледелием [26]. Тем не менее, независимо от условий выращивания потребление лука репчатого обеспечивает поступление в организм человека значительного количества Fe , Mn и Cu (рис. 5); Это обеспечивает возможность использования лука при железо-дефицитной анемии, нарушении развития костной ткани, нарушении активности мозга и для оптимизации кроветворения [7].

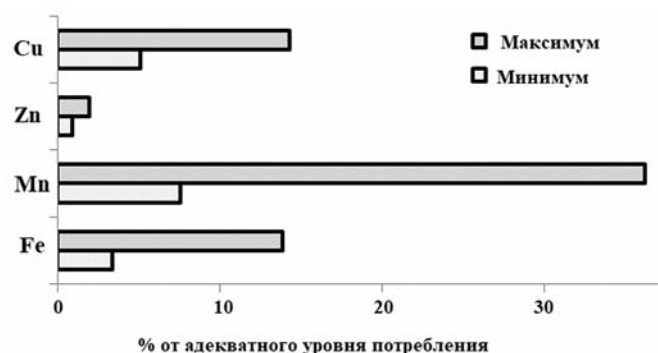


Рис. 5. Уровни поступления Fe , Mn , Zn , Cu с 100 г лука репчатого, выращенного в Московской области [24]
Fig. 5. Consumption levels of Fe , Mn , Zn , Cu with 100 g of onion grown in Moscow region

3.4. Антиоксиданты лука

Важнейшими антиоксидантами лука являются соединения серы, полифенолы, сапонины и органические соединения селена, способные защитить организм человека от воздействия свободных радикалов и других активных форм кислорода [7]. Сравнение антиоксидантной активности экстракта тканей репчатого лука с другими источниками антиоксидантов показало, что в среднем 5,5 порций лука по уровню антиоксидантов эквивалентно 2 чашкам чая, 4 яблокам, 3,5 стаканам сока черной смородины, 7 стаканам апельсинового сока или 20 стаканам яблочного сока [27].

3.4.1. S-Алкенил цистеин сульфоксиды (ACSO)

Содержание органических производных серы в луке возрастает с повышением температуры и практически не зависит от стадии развития растения [28].

S-Алкенил цистеин сульфоксиды (ACSO) локализируются в цитоплазме внутренних чешуй лука и определяют специфический запах при измельчении луковицы. При разрушении клеточных стенок и освобождении аллииназы из вакуолей эти соединения легко гидролизуются (рис. 5) с образованием целой серии соединений: сульфеновых кислот, тиосульфатов, лакриматорного фактора, цепаена и цис-цвибеланов. Все эти соединения ингибируют агрегацию тромбоцитов, проявляют антибиотические свойства и снижают уровень холестерина в крови [7].

В луковицах *A. сера* идентифицированы 4 S-алкенил цистеин сульфоксида (ACSO), из которых наиболее распространенными являются транс-(+)-S-1-пропенил-L-цистеин сульфоксид, (+)-S-метил-L-цистеин сульфоксид и (+)-S-пропил-L-цистеин сульфоксид [29]. В совокупности, аромат лука определяется концентрацией ACSO, присутствием более чем 80 производных серы, а также несколькими водорастворимыми углеводами (рис. 6).

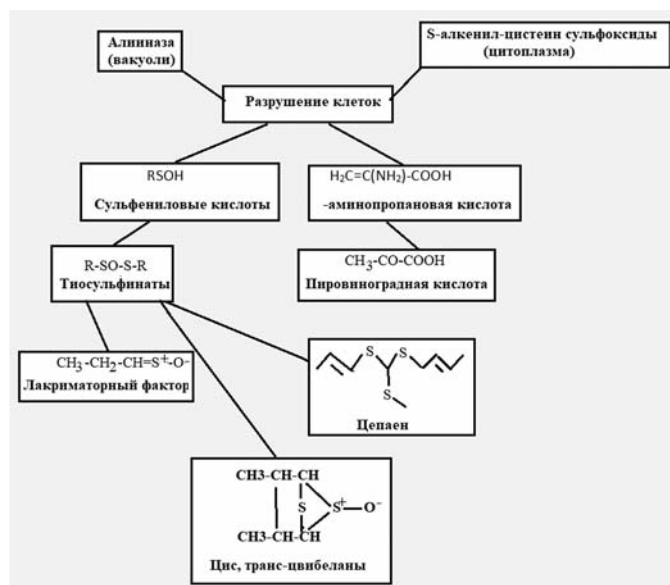


Рис. 6. Образование лакриматорного фактора
Fig. 6. Formation of lachrymator factor

Оценку остроты лука осуществляют путем определения содержания пировиноградной кислоты- побочного продукта деградации ACSO [30]. Содержание пировиноградной кислоты также проявляет положительную корреляцию с водорастворимыми соединениями. Показательно, что концентрация пировиноградной кислоты менее 3 мкМ/г характерна для сладкого лука, уровень 3-7 мкМ/г характерен для лука средней остроты и > 7 мкМ/г для острого лука. Следует отметить, что раннеспелые сорта лука обычно характеризуются малой остротой, а белый лук слаще, чем желтый и красный [30].

Установлено, что острота лука определяется не только генетическими факторами, но также воздействием окружающей среды и технологией возделывания. Так, острота лука возрастает при повышении температуры, в условиях водного стресса, высокой плотности посадки и засолением, а также при использовании серо- содержащих удобрений [6] (рис. 7). Внесение азота также может увеличить синтез ACSO путем образования метил, пропил и 1-пропенил цистеин сульфоксидов [31,32].

Обогащение лука селеном- известным антагонистом серы, снижает остроту лука в результате замещения серы а селен [33].



Рис. 7. Факторы, влияющие на остроту лука репчатого
Fig. 7. Factors affecting onion pungency

3.4.2. Полифенолы и флавоноиды

Полифенолы и флавоноиды- одни из самых важных биологически активных соединений в овощах и фруктах, обеспечивающих положительное действие на здоровье человека [4]. Из 28 овощей и 9 видов фруктов лук занимает первое место по концентрации кверцетина [34] среди сельскохозяйственных культур [35].

Высокие концентрации кверцетина обеспечивают хелатирование ионов переходных металлов, улавливание свободных радикалов и защиту клеточных стенок от перекисного окисления липидов. Оптимизация антиоксидантной защиты организма под действием кверцетина обеспечивает повышение иммунитета и снижение рисков кардиологических и онкологических заболеваний. Известно, что кверцетин снижает канцерогенную активность некоторых мутагенов пищи и ингибирует ферментативную активность, связанную с некоторыми формами рака [36]. Кверцетин проявляет также антитромбоцитарную и противовоспалительную активность. Уровень потребления кверцетина населением обратно пропорционален смертности от ишемической болезни сердца [37]. Описано положительное действие кверцетина при лечении больных аллергией, астмой, артритом, раком, осложнениями диабета, нейродегенеративными заболеваниями и остеопорозом [36]. Внешние чешуи красного лука проявляют высокую АОА, ингибируют активность фосфодиэстеразы 5А, оказывая положительное действие при лечении сексуальной дисфункции [38]. С другой стороны, несмотря на свои антиканцерогенные, противовирусные и антиоксидантные свойства, флавоноиды, и кверцетин в том числе, при аномально высоких концентрациях могут выступать в роли мутагенов, прооксидантов и ингибиторов активности ключевых ферментов [36]. Дозозависимый эффект кверцетина был установлен на репродуктивной активности крыс, что объясняет хорошо известный факт возможности снижения фертильности при приеме высоких доз флавоноидов, имитирующих природные эстрогены [39].

Благодаря присутствию гидроксильных групп в молекуле кверцетина, его метилированные производные и гликозиды широко распространены в природе. В луке репчатом идентифицировано около 16 различных флавоноидов, включая агликоны (соединения со свободными гидроксильными группами, например, кверцетин), гликозилированные производные кверцетина, изорамнетин (метильный эфир кверцетина) и его гликозиды, рутин и кемпферол. В луке репчатом до 93%

общего количества флавоноидов представлено кверцетин 4'-моно- и 3,4'-ди-гликозидами [40]. Аналогичные производные кемпферола и изорамнетина присутствуют в существенно меньших концентрациях. Производные дигидрокверцетина, такие как таксифолин и его 3-, 7- и 4'-гликозиды, также были идентифицированы в *Allium sera*. Несмотря на ограничения в структурных вариациях производных дигидрокверцетина, уровень таксифолина и его 7-гликозида в ряде случаев может достигать 98.1 и 5.9 мг/кг на сырую массу соответственно (итальянский сорт "Тропеа") [41]. Средний уровень кверцетина в луковицах *A. sera* составляет около 300 мг/кг сырой массы, что существенно выше, чем в других овощах. Показано, что *A. sera* может обеспечить до 70% всех флавоноидов для организма человека при использовании обычной диеты. Среди флавоноидов моно- и дигликозиды кверцетина проявляют одинаковую биологическую активность [41] а величина их антиоксидантной активности вдвое выше, чем антиоксидантная активность кверцетина чая; более того, абсорбция гликозидов кверцетина в желудочно-кишечном тракте вдвое выше, чем абсорбция кверцетина яблок [36].

Наибольшее количество кверцетина и его производных локализовано во внешних чешуях луковицы [42,2,43,44]. При этом свободный кверцетин присутствует в основном во внешних сухих чешуях, где его концентрация составляет до 53.2% от общего количества флавоноидов [45], и его концентрация постепенно снижается к центру луковицы. Более того, кверцетин 4'-β-О-моноголикозид накапливается как во внутренних, так и внешних чешуях, в то время как 3,4' β-О-дигликозид обнаружен только во внутренней части луковицы. Биодоступность кверцетина внешних чешуй вдвое выше, чем внутренних. Кроме того, количество флавоноидов во внешних чешуях превышает соответствующую величину для внутренних чешуй в 5-7,5 раз [45].

Поскольку существует прямая корреляция между содержанием флавоноидов и общей антиоксидантной активностью [46], очевидно, что внешние чешуи имеют также и наибольшую величину антиоксидантной активности [9]. Антиоксидантная активность красных луков в основном определяется наличием антоцианов, представленных преимущественно цианидином и его гликозидами [41].

Внешние чешуи лука также богаты протокатеховой кислотой (Рис. 8), проявляющей сильные антиоксидантные, противовоспалительные, антигипергликемические, антибактериальные, антиканцерогенные, антиспазматические и нейрологические свойства [47].

Протокатеховая кислота ингибирует химически индуцированный канцерогенез и проявляет анти-пролиферативный

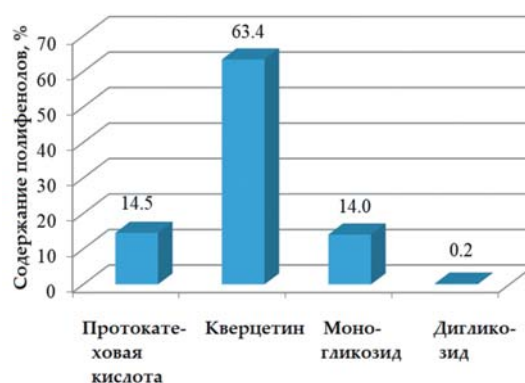


Рис. 8. Средние уровни накопления важнейших полифенолов внешних чешуй лука репчатого [48]
Fig. 8. Mean accumulation levels of the most important polyphenols in the outer scales of onion [48]

эффект в различных тканях [47]. Эта кислота считается одной из важнейших метаболитов сложных полифенолов, таких как антоцианы, процианины и кверцетин, и проявляет мощный синергизм с кверцетином против *Pseudomonas aeruginosa* [49].

Уровни флавоноидов и антоцианов могут значительно варьировать в луке. Так, уровни аккумуляции антоцианов находятся в интервале от 39 до 240 мг/кг сырой массы, а в некоторых сортах концентрации этих соединений могут достигать 10% от общего содержания флавоноидов.

Еще выше вариабельность содержания полифенолов в луковичах по сравнению с вариабельностью флавоноидов и антоцианов. По данным Kavalkova et al [50], 6 сортов лука содержали полифенолов от 143 (белые сорта) до 1083 мг-экв ГК/кг (красные сорта), что находится в хорошем соответствии с данными других авторов [51,46]. Интервал концентрации кверцетина в луковичах 85 сортов лука репчатого (55 желтых, 3-розовых, 6 красных и 11 белых) также оказался велик: от 0.2 до 286.0 мг/кг сырой массы [52]. Другие исследователи отмечают интервал концентраций от 18 до 1495 мг кверцетина/кг [53,42,52,34]. Результаты показывают, что белые луки содержат следы кверцетина, а наибольший уровень кверцетина характерен для красных сортов. Концентрация кверцетина в 22 сортах лука, выращенного в Московской области, составила интервал от 2,29 до 15,58 мг/г сухой массы при коэффициенте вариации 21,4% [19].

3.4.3. Сапонины

Несмотря на то, что полифенолы, фруктоолигосахариды и ACSO являются важнейшими биологически активными соединениями лука, отдельные исследования указывают на то, что сапонины также играют важную роль в общей биологической активности луков [54]. Эти соединения широко распространены в растениях и часто используются как субстраты для производства стероидных гормонов и лекарственных препаратов.

Стероидные сапогенины и сапонины идентифицированы более чем в 40 различных видов *Allium*, при этом *Allium sepa* содержал высокие уровни этих соединений: диосгенин, сенагенон, аллилспирозиды A-D, аллилфуриозид A, сепарозиды A-D, сепазиды A, B1, C1. Большинство этих соединений содержат линейную или разветвленную цепь полисахаридов с остатками глюкозы, рамнозы, галактозы, ксилозы и арабинозы [55]. Сорта белого лука содержат сепазиды A, B и C [5] с выраженной противогрибковой активностью, уменьшающейся в ряду: сепазид A > сепазид B > сепазид C. Наблюдался также эффект синергизма между этими соединениями в отношении противогрибковой активности к *Botrytis cinerea* и *Trichoderma atroviride*. Напротив, указанные сепазиды проявляли низкую эффективность против *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, *Sclerotium cepivorum* и *Rhizoctonia solani*. Стероидные гликозиды из итальянского красного лука 'Торпеа' (тропеозиды A₁, A₂, B₁, B₂) проявляли спазмолитическое действие на изолированной подвздошной кишке морских свинок, и это явление объясняет традиционное использование лука в лечении желудочно-кишечных заболеваний [10].

Несмотря на сравнительно низкое содержание стероидных гликозидов в *Allium sepa*, предполагают, что они вносят существенный вклад в биологическую актив-

ность благодаря высокой стабильности в отличие от неустойчивых серу-содержащих соединений. Действительно, высокая цитотоксичность сапонинов лука делает их потенциальными кандидатами для разработки антираковых препаратов. Более того, отдельные сапонины проявляют противовоспалительное, антигрибковое, антипаразитическое, антибактериальное, антимикробное и противовирусное действие. Установлено, что сапонины также способны стимулировать абсорбцию желчных кислот пищевыми волокнами в кишечнике, выводя их с фекалиями, и снижать уровень холестерина в крови [54]. Эти соединения защищают также организм человека от рака, разрушая раковые клетки, богатые холестерином.

3.5. Аминокислоты

При созревании луковича аминокислоты переносятся из листьев в луковичу. Аргинин и глутамин, активно участвующие в метаболизме, составляют основные свободные аминокислоты лука. Следует отметить, что свободные аминокислоты играют ключевую роль в биосинтезе летучих соединений, определяющих аромат лука, поскольку цистеин и глутатион являются предшественниками нескольких γ-глутамил пептидов, которые в свою очередь служат предшественниками ACSO [31].

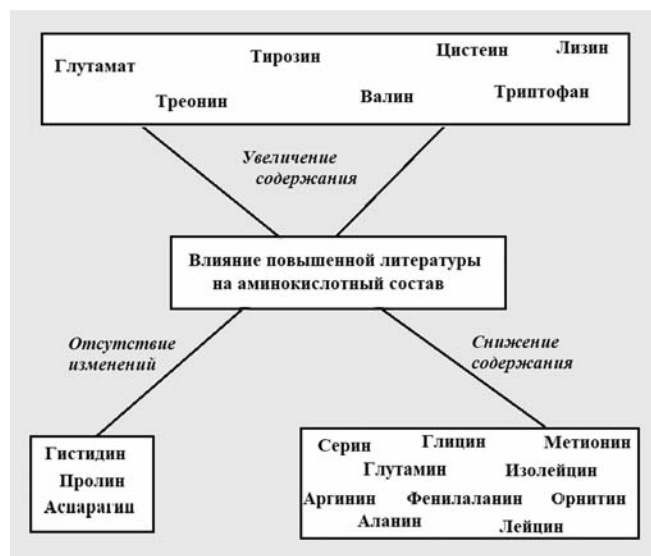


Рис. 9. Влияние повышенных температур на аминокислотный профиль лука репчатого
Fig. 9. Effect of elevated temperature on amino acid profile of *A. sepa*

В связи с этим обращает внимание факт, что повышенные температуры оказывают разное влияние на различные аминокислоты. Так, с повышением температуры воздуха возрастает содержание глутамата, треонина, тирозина, валина, цистеина, лизина и триптофана и снижается уровень серина, глицина, глутамина, аргинина, метионина, изолейцина, орнитина, лейцина, фенилаланина и аланина (рис. 9), а содержание аспарагиновой кислоты, гистидина и пролина не изменяется. Поскольку, согласно литературным данным, содержание аминокислот коррелирует с интенсивностью вкуса лукович, выбор времени посадки и сбора урожая является важным фактором, определяющим вкус и качество продукции [2].

4. Лук в условиях стресса

4.1. Тяжелые металлы

При значительных межсортовых различиях в накоплении Cd и Pb [56, 57] распределение тяжелых металлов по органам лука является не однородным. Подробная оценка интенсивности накопления тяжелых металлов луком репчатым в условиях гидропоники [58] выявила разный характер отзывчивости корней, листьев и луковиц растения на используемую нагрузку. Так, из 10 металлов Mn, Sr, Zn в наибольшей степени накапливались листьями. Напротив, луковицы оказались наиболее отзывчивыми к Mn, Pb и Cd, в то время как корни лука в наибольшей степени накапливали Mn, Zn, Cd (рис. 10).

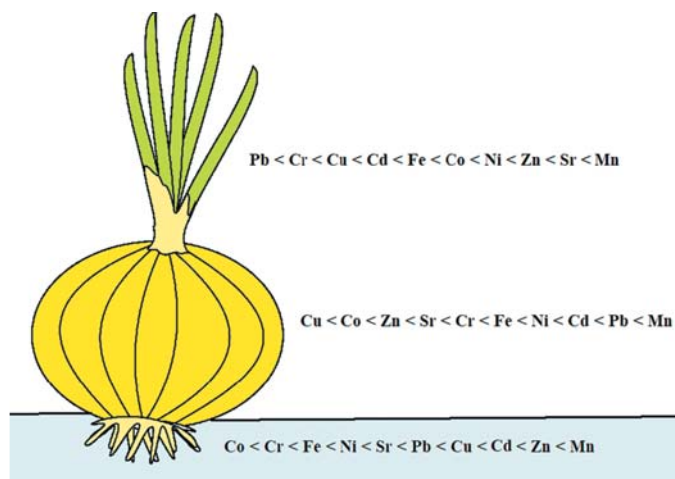


Рис. 10. Накопление тяжелых металлов листьями, луковицами и корнями лука репчатого в условиях гидропоники [58]

Fig. 10. Heavy metal accumulation by onion leaves, bulbs and roots in hydroponic conditions

Для защиты лука репчатого от хрома показана перспективность использования наночастиц меди как мощного адсорбента и ростостимулятора [59].

Следует отметить, что лук репчатый широко используется также в лабораторном тесте оценки токсичности различных соединений (пестициды, ароматические углеводороды, тяжелые металлы) на основе ДНК анализа [60,61].

Более того, исследования китайских ученых выявили, что семена лука репчатого являются отличным сорбентом тяжелых металлов, позволяя абсорбировать до 99% свинца, меди и кадмия из водного раствора [62], что открывает новые возможности как для очистки сточных вод, так и практического использования невсхожих семян. Установлено, что фито- и цито- токсический потенциал семян лука падает в ряду: Cd>Cu>Pb>Ni>Al и Cu>Al>Ni>Pb>Cd соответственно [63].

4.2. Засоление

Среди овощных культур лук репчатый наиболее чувствителен к засолению [64], приводящему к осмотическому стрессу, снижению биодоступности воды и минералов, таких как K и Ca, замедлению роста и фотосинтеза [65], а также усилению негативного действия *Fusarium oxysporum* [66], снижению аккумуляции серы и усилению остроты лука [65].

Исследование на 36 сортаобразцах лука репчатого, выращенных в условиях засоления, позволило выделить 7 сортаобразцов, характеризовавшихся наименьшим снижением урожая (не более 20%) вследствие засоления [67]. Регрессионный анализ позволил авторам установить важ-

нейшие показатели, определяющие чувствительность лука к солевому стрессу: диаметр луковицы, высота растения, активность аскорбат пероксидазы (APX), величина устьичной проводимости, активность пероксидазы (POX), уровни накопления малонового диальдегида (MDA), индекс стабильности мембран (MSI) и Na/K соотношение в луковице [67]. Авторами было показано, что солеустойчивые сортаобразцы характеризовались более высокими уровнями накопления пролина, высоким антиоксидантным статусом и повышенным индексом стабильности мембран [67]. Исследованиями Venancio et al. [68] было установлено, что применение кремнивого удобрения снижает солевой стресс у репчатого лука, повышает урожай и качество продукции, а также увеличивает содержание органических кислот.

4.3. Засуха

Слабо развитая неглубокая корневая система репчатого лука определяет высокую чувствительность этой культуры к дефициту воды. Снижение интенсивности фотосинтеза, замедление роста, уменьшение размера луковиц, снижение урожая и качества продукции являются типичными характеристиками влияния засухи на рост и развитие репчатого лука. Механизм защиты от дефицита воды включает интенсивный биосинтез пролина, сахаров, малонового диальдегида (MDA) и перекиси водорода [69], а также ферментов антиоксидантного действия, таких как каталазы (CAT), супероксид дисмутаза (SOD) и аскорбат пероксидазы (APX) [70]. Установлено, что устойчивые к засухе генотипы аккумулируют больше пролина и проявляют более высокую активность каталазы и других ферментов антиоксидантного действия [71,72]. Исследование путей защиты лука от оксидантного стресса, вызванного засухой, позволило выявить несколько путей, обеспечивающих нормальное развитие растений, улучшающее абсорбцию нутриентов и препятствующих развитию оксидантного стресса [73] (рис. 11).



Рис. 11. Пути защиты лука репчатого от засухи

Fig. 11. Methods of onion protection against drought

Среди представленных на рисунке 11 данных арбускулярно-микоризные грибы (АМГ) стимулируют рост путем увеличения площади листовой поверхности, содержания сухого вещества в листьях, содержания фотосинтетических пигментов и путем ускорения образования луковиц, что приводит к увеличению урожая и эффективности использования воды, как в отсутствии стресса, так и в условиях засухи. Благодаря образованию гифов и увеличению площади корневой поверхности усиливается усвоение нутриентов, азота и фосфора, в частности, и воды [74-76]. Установлено, что использование актинобактерий улучшает прорастание семян лука в условиях засухи [77]. Биокар стимулирует фотосинтез и оптимизирует минеральное питание, а также увеличивает активность ферментов антиоксидантного дей-

ствия [78]. Гидрогель обеспечивает сохранение воды [79]. Гуминовые кислоты ускоряют рост растений, увеличивают содержание растворимых сахаров и белков, а также активируют ферменты антиоксидантного действия [78]. Высокоэффективным является воздействие фитогормонов: гиббереллина и салициловой кислоты [80-82].

В последние годы все большее значение в защите растений от оксидантного стресса, вызванного засухой, приобретает использование соединений селена [74] и кремния [83,84]. Если селен выступает в роли природного антиоксиданта, то растворимые соединения кремния влияют на гормональный статус растений, улучшают эффективность питания, приводят к морфологическим изменениям в корневой системе, снижают образование малонового диальдегида, повышают урожай и качество продукции.

4.4. Подтопление

Значительное снижение урожайности и качества лука может быть вызвано также наводнениями и повышенной влажностью. Степень негативного воздействия затопления зависит от интенсивности и продолжительности осадков, фенологической стадии растений и чувствительности генотипа. При этом потери урожая при интенсивных осадках в период формирования луковиц могут достигать 50-70% [85]. С физиологической точки зрения негативное влияние избытка воды связано с дефицитом кислорода в почве и снижением аэробного дыхания корней. Эти факторы приводят к задержке роста, замедлению фотосинтеза, снижению способности накапливать питательные вещества, уменьшению содержания сухого вещества и потере урожая [86].

Сравнение биометрических и биохимических показателей 5 сортов лука репчатого, выращенных в Московской и Амурской областях с контрастными условиями доступности воды (перевлажнение в конце (А) и в начале (В) вегетационного периода) выявило значительное снижение массы, высоты и диаметра луковицы, возрастание показателей оксидантной актив-

сти и содержания полифенолов, моносахаров, пролина и малонового диальдегида в условиях подтопления в конце вегетационного периода (А) [84] (рис.12).

Участие пролина, моносахаров, полифенолов и общей антиоксидантной активности в защите растений от гипоксии, вызванной подтоплением, было доказано наличием высоких коэффициентов корреляции между параметрами внутренних чешуй с урожаем (рис. 13).

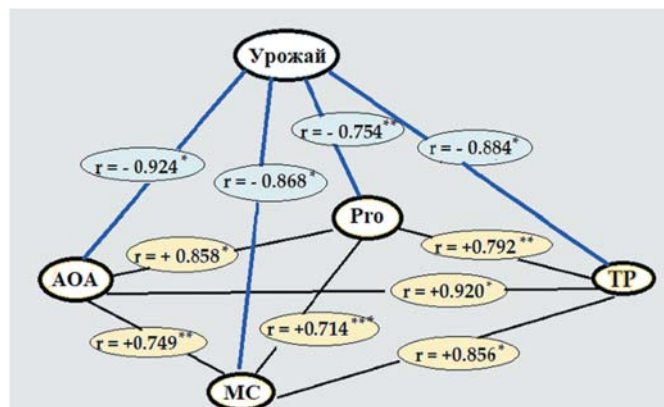


Рис. 13. Взаимосвязь массы луковицы лука репчатого и показателями антиоксидантного статуса (AOA: общей антиоксидантной активности; TP: total содержанию полифенолов; Pro: пролина; MC: моносахаров); * $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.05$
Fig. 13. Relationship between onion yield and antioxidant status (AOA-total antioxidant activity; TP-total phenolics; Pro- proline; MC- monosaccharides)

5. Факторы, влияющие на пищевую ценность и содержание антиоксидантов

Генетические факторы в значительной степени определяют содержание в луковицах сухого вещества, сахаров, водорастворимых соединений, остроту лука, содержание антиоксидантов. Действительно, способность абсорбировать сульфаты из почвы и синтезировать предшественники аромата различаются между сортами, и генетическая наследственность признака, связанного с ферментативным производством пировиноградной кислоты варьирует от 48 до 53% [88]. Интересно отметить, что острые сорта лука способны синтезировать более высокие уровни ACSOs из того же количества соединений серы в тканях [89]. Напротив, вариабельность остроты лука и общего содержания сахаров не различаются значительно между сортами (8 - 10%) [6]. Содержание антиоксидантов в луках также зависит от генотипа [90]. Качество луковиц определяется как генетическими факторами, так и особенностями взаимодействия между генотипом, окружающей средой и технологией возделывания. Так, острота лука может быть функцией как особенностей сорта, так и температурными условиями выращивания, типа и плодородия почвы и доступности воды [6].

Синтез и аккумулялирование флавоноидов определяется как генотипом, так и экзогенными факторами, такими как интенсивность освещения, температура, влажность и технология возделывания [91,48]. Особенно важным представляется воздействие света как стресс фактора, стимулирующего биосинтез вторичных метаболитов высокой антиоксидантной активности [91,92]. Ко и др. [91] установил наибольший по интенсивности эффект голубого света ($\lambda = 450$ нм), значительно увеличивающего содержание кверцетина во внутренних чешуях и снижающего его концентрацию в коже. Красный свет проявляет такую же способность, но интенсивность воздействия значительно

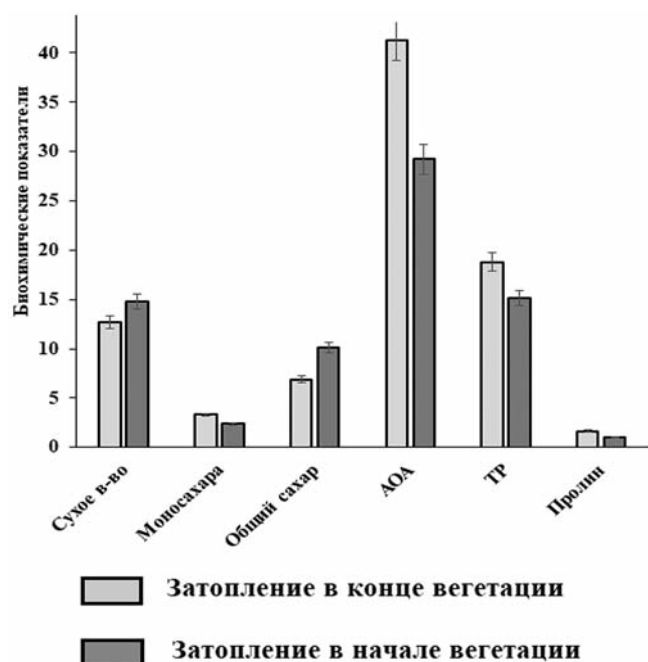


Рис. 12. Изменения биохимических показателей луковиц в результате затопления посадок лука в начале и в конце вегетации (сухое вещество, моносахара, общий сахар, в %, общая антиоксидантная активность, AOA, и полифенолы, TP- в мг/эке галловой кислоты/г сухой массы, пролин, мг/г) [87]
Fig. 12. Changes in onion bulb biochemical parameters in flooding conditions at the beginning and at the end of vegetation [87]

ниже; белый свет показывал противоположный эффект, вызывая предпочтительное аккумулятивное кверцетина в кожуре и снижающего его концентрацию во внутренних чешуях. Наибольшее влияние на аккумулятивное кверцетина оказывает УФ-свет, и этот эффект можно использовать для регулирования накопления флавоноидов в луке

Внешние факторы влияют также на содержание сухого вещества, что непосредственно связано с температурой выращивания [28]. Так красный лук теряет большую часть своей окраски при низких температурах воздуха и почвы и высокой влажности [93]. Общее содержание водорастворимых соединений значительно возрастает с увеличением влажности почвы, возможно, чтобы восполнить потребность культуры к воде и максимально использовать нутриенты при оптимальной доступности влаги почвы, в то время как противоположная закономерность характерна для накопления белка [94].

Абсорбция серы луками и соответственно интенсивность аромата лукович усилится с повышением температуры. В частности, сера абсорбируется растениями в виде сульфатов, которые восстанавливаются до цистеина, использующегося в синтезе метионина и глутатиона, участвующих в формировании аромата [95]; более того, взаимодействие генетических особенностей сорта и внесения серы может значительно повлиять на накопление сахаров луковичами. Общее содержание сахаров в луко-

вицах определяется местом произрастания растения и может быть выше у лука, выращенного на суглинистой почве, чем на глине [6]. Взаимодействие лука с гуминовыми соединениями и арбускулярно-микоризными грибами благоприятствует качеству лука, поскольку способствует наибольшему аккумулятивному листьями растворимых сахаров и белков, которые затем переносятся в луковичы [96].

Заклучение

Исследование биохимических характеристик и биологической активности лука репчатого является важнейшим аспектом оптимизации качества продукции лука, как источника важнейших природных соединений. Высокая пищевая и фармакологическая ценность этой сельскохозяйственной культуры базируется на присутствии многочисленных соединений серы, полифенолов, и кверцетина, в частности, сапонинов, фруктоолигосахаридов и минеральных веществ. Представленный обзор свидетельствует о возможности и необходимости направленного безотходного производства продукции с прогнозируемыми антиканцерогенными, кардиопротекторными и антиоксидантными свойствами, а также указывает на перспективность селекционных исследований с целью создания сортов, устойчивых к неблагоприятным абиотическим факторам (засолению, подтоплению, засухе и т.п.).

References / Литература

1. Faostat. Production, superficie et productivité de l'oignon. 2023. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
2. Caruso G., Conti S., Villari G., Borrelli C., Melchionna G., Minutolo M., Russo G., Amalfitano C. Effects of transplanting time and plant density on yield, quality and antioxidant content of onion (*Allium cepa* L.) in southern Italy. *Sci. Hortic.* 2014;(166):111–120.
3. Golubkina N., Caruso G. *Allium cepa*. Chapter 5 in "Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables" ed. Jaiswal, A. Academic press, 2020, Dublin.
4. Yang J., Meyers K.J., Van der Heide J., Liu R.H. Varietal differences in phenolic content and antioxidant and antiproliferative activities of onions. *J. Agric. Food Chem.* 2004;(52):6787–6793.
5. Lanzotti V. The analysis of onion and garlic. Review. *J. Chromatography A*. 2006;(1112):3–22.
6. Hamilton B.K., Pike L.M., Yoo K.S. Clonal variations of pungency, sugar content, and bulb weight of onions due to sulphur nutrition. *Sci. Hortic.* 1997;(71):131–136.
7. Griffiths G., Trueman L., Crowther T., Thomas B., Smith B. Onions—a global benefit to health. *Phytotherapy Research*. 2002;16(7):603–615. <https://doi.org/10.1002/ptr.1222>
8. Galeone C., Pelucchi C. Onion and Garlic Use and Human Cancer. American Society for Nutrition. *Am. J. Clin. Nutr.* 2007;84(5):1029–1030.
9. Kim S. J., Kim G.H. Quantification of quercetin in different parts of onion and its DPPH radical scavenging and antibacterial activity. *Food Sci. Biotechnol.* 2006;(15):39–43.
10. Corea G., Fattorusso E., Lanzotti V., Capasso R., Izzo A.A. Antispasmodic saponins from bulbs of red onion, *Allium cepa* L. var. *Tropea*. *J. Agric. Food Chem.* 2005;53(4):935–940.
11. Aghababaei F., Hadidi M. Recent Advances in Potential Health Benefits of Quercetin. *Pharmaceuticals*. 2023;(16):1020. <https://doi.org/10.3390/ph16071020>
12. Shiomi N., Benkeblia N., Onodera, S. The metabolism of the fructooligosaccharides in onion bulbs: a comprehensive review. *J. Appl. Glycosci.* 2005;(52):121–127.
13. Biswas S.K., Khair A., Sarker P.K., Alom M.S. Yield and storability of onion (*Allium cepa* L.) as affected by various levels of irrigation. *Bangladesh J. Agric. Res.* 2010;35(2):247–255.
14. Muir J.G., Shepherd, S.J., Osella O., Rose R., Barrett J.S., Gibson P.R. Fructan and free fructose content of common Australian vegetables and fruit. *J. Agric. Food Chem.* 2007;(55):6619–6627.
15. Benitez V., Molla E., Martin-Cabrejas M.A., Aguilera Y., Lopez-Andreu F.J., Cools K., Terry L.A., Esteban R.M. Characterization of industrial onion wastes (*Allium cepa* L.): dietary fiber and bioactive compounds. *Plant Food Hum. Nutr.* 2011;(66):48–57.
16. Darbyshire B., Henry R.J. The distribution of fructans in onions. *New Phytol.* 1978;(81):29–34.
17. Darbyshire B., Henry R.J. The association of fructans with high percentage dry weight in onion cultivars suitable for dehydrating. *J. Sci. Food Agr.* 1979;(30):1035–1038.
18. Salamal A.M., Hicks J.F. Nock sugar and organic acid changes in stored onion bulbs treated with maleic hydrazide. *Hort. Sci.* 1990;25(12):1625–1628.
19. Golubkina N.A., Kekina H.G., Antoshkina M.S., Agafonov A.F., Nadezhkin S.M. Intervarietal differences in accumulation of biologically active compounds by *Allium cepa* L. *Messenger of Russian Agric. Sci.* 2016;(2):51–55.
20. Galdon, B.R., Rodriguez, C.T., Rodriguez, E.R., & Ronero, C.D. Organic acid contents in onion cultivars (*Allium cepa* L.). *J. Agric. Food Chem.* 2008;56(15):6512–6519.
21. X Sun; Guoliang Hana; Zhe Meng; Lin Lin Na Sui Roles of malic enzymes in plant development and stress responses. *Plant Signal. Behav.* 2019;14(10):e1644596/ <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1644596>
22. Hallmann E., Rembialkowska E. Antioxidant compounds content in selected onion bulbs from organic and conventional cultivation. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2006;51(2):42–46.
23. Kabata-Pendías, A. Trace Elements in Soils and Plants. Kabata-Pendías A., Pendías H. – 2001. 3rd Edition, CRC Press LCL, Boca Raton.
24. Golubkina, N.A., Agafonov, A.F., Nadezhkin, S.M., Antoshkina, M.S., & Koshevarov, A.A. Element composition of *Allium cepa*. *Vestnik Ulyanovskiy Agr. Acad.* 2015;(3):11–17.
25. Jurgiel-Malecka G., Gibczynka M., Nawrocka-Pezik M. Comparison of chemical composition of selected cultivars of white, yellow and red onions. *Bulg. J. Agric. Sci.* 2015;21(4):736–741.

26. Ekholm P., Reinivuo H., Mattila P., Pakkala H., Koponen J., Happonen A., Hellstrom J., Ovaskainen M.-L. Changes in the mineral and trace element content of cereals, fruits and vegetables in Finland. *J. Food Comp. Anal.* 2007;(20):487-495.
27. Paganga G., Miller N., & Rice-Evans, C. The polyphenolic content of fruit and vegetables and their antioxidant activities. What does a serving constitute? *Free Rad.* 1999;(30):153-162.
28. Coolong T.W., Randle W.M. Temperature influences flavor intensity and quality in 'Granex 33' onion. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 2003;128(2):176-181.
29. Mallor C, Thomas B. Resource allocation and the origin of flavor precursors in onion bulbs. *J. Hort. Sci. Biotech.* 2008;83(2):191-198.
30. Gallina P.M., Cabassi G., Maggioni A., Natalini A., Ferrante A. Changes in the pyruvic acid content correlates with phenotype traits in onion clones. *Austral. J. Crop Sci.* 2012;6(1):36-40.
31. Randle W.M. Increasing nitrogen concentration in hydroponic solutions affects onion flavor and bulb quality. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 2000;(125):254-259.
32. Marinozzi M., Sardella R., Scorzoni S., Ianni F., Lisanti A, Natalini B. Validated pungency assessment of three Italian onion (*Allium cepa* L.) cultivars. *Agr. Food*, 2014;2(1):532-541.
33. Kopsell D.A., Randle, W.M. Selenate concentration affects selenium and sulfur uptake and accumulation by 'Granex 23' onions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 1997;122(5):721-726.
34. Hertog M.G., Hollman P.C.H., Katan M.B. Content of potentially anticarcinogenic flavonoids of 28 vegetables and 9 fruit commonly consumed in the Netherlands. *J. Agric. Food Chem.* 1992;(40):2379-2383.
35. Brown P., Blake M., Eagling D., Sterling S.. Therapeutic compounds as an onion quality parameter. Final report Project No VG99054 Horticultural Australian Ltd. 2001.
36. Alrawaiq N.S., Abdullah A.A Review of flavonoid quercetin: metabolism, bioactivity and antioxidant properties. *Int. J. Pharm. Tech. Res.* 2014;6(3):933-941.
37. Hu F.B., Willett W.C. Optimal diets for prevention of coronary heart disease. *J. Am. Med. Assoc.* 2002;(288):2569-2578.
38. Lines T.C., Ono M. FRS 1000, an extract of red onion peel, strongly inhibits phosphodiesterase 5A (PDE 5A). *Phytomedicine.* 2006;13(4):236-239. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2004.12.001>
39. Ranawat P., Kaushik G., Saikia U.N., Pathak C.M., Khanduja K.L. Quercetin impairs the reproductive potential of male mice. *Andrologia.* 2013;45(1):56-65.
40. Lachman J., Pronek D., Hejtmankova A., Dudjak J., Pivec V., Faitova K. Total polyphenol and main flavonoid antioxidants in different onion (*Allium cepa* L.) varieties. *Hort. Sci.* 2003;30(4):142-147.
41. Slimestad R, Fossen T., Vågen I.M. Onions: a source of unique dietary flavonoids. *J. Agric. Food Chem.* 2007;55(25):10067-10080.
42. Patil B.S., Pike L.M., Hamilton B.K. Changes in quercetin concentration in onion (*Allium cepa* L.) owing to location, growth stage and soil type. *New Phytol.* 1995;(130):349-355.
43. Gülşen A., Makris D.P., Kefalas P. Biomimetic oxidation of quercetin: isolation of a naturally occurring quercetin heterodimer and evaluation of its *in vitro* antioxidant properties. *Food Res. Int.* 2007;(40):7-14.
44. Ly T.N., Hazama C., Shimoyamada M., Ando H., Kato K., Yamauchi R. Antioxidative compounds from the outer scales of onion. *J. Agric. Food Chem.* 2005;(53):8183-8189.
45. Wiczowski W., Németh K., Buciński A., Pisku M. K. Bioavailability of quercetin from scales and dry skin of onion in rats. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* 2003;(12):95-99.
46. Lu X., Wang J., Hamzaf M., Ross C.F., Powers J.R., Tang J., Rasco B.A. Determination of total phenolic content and antioxidant capacity of onion and shallots using infrared spectroscopy. *Food Chem.* 2001;(129):637-644.
47. Abida K. K., Rhana R., Nighat F., Sadaf M., Sadullah M., Sara K., Nyla J., Ghulam, M. Pharmacological activities of protocatechuic acid. *Acta Polon. Pharm. Drug Res.* 2015;72(4):643-650.
48. Mogren L.M., Olsson M.E., Gertsson U.E. Quercetin content in field-cured onions (*Allium cepa* L.): effects of cultivar, lifting time, and nitrogen fertilizer level. *J. Agric. Food Chem.* 2006;54(17):6185-6191.
49. Sakharkar M.K., Jayaraman P., Soe W.M., Chow V.T., Sing L.C., Sakharkar K.R. *In vitro* combinations of antibiotics and phytochemicals against *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Microbiol. Immunol. Infect.* 2009;42(5):364-370.
50. Kavalcová P., Bystrická J., Tóth T., Trebichalský P., Hrstková M., Lenková M., Šiatkovský, O. Content of total polyphenols and antioxidant activity in selected varieties of onion (*Allium cepa* L.). *Sci. J. Food Ind.* 2015;9(1):494-500.
51. Andrejiová A., Kóna J., Barátová, S. Effect of fertilization and cultivar on total polyphenol content in onion (*Allium cepa* L.). *Nutr. Health, Proceeding from the Conference, SPU, Nitra.* 2011. 12-17.
52. Patil B.S., Pike L.M. Distribution of quercetin content in different rings of various coloured onion (*Allium cepa* L.). *J. Hort. Sci.* 1995;(70):643-650.
53. Bilyk A., Cooper P.L., Saper G.M. Varietal differences in distribution of quercetin and kaempferol in onion (*Allium cepa* L.) tissue. *J. Agric. Food Chem.* 1984;(32):274-276.
54. Sobolewska D., Michalska K., Podolak I., Grabowska K. Steroidal saponins from the genus *Allium*. *Phytochem. Rev.* 2016;15(1):1-35.
55. Challinor V.L., De Voss J.J. Open-chain steroidal glycosides, a diverse class of plant saponins. *Nat. Prod. Rep.* 2013;(30):429-454.
56. Čeryová N., Lidiková J., Šnirc M., Harangozo L., Pintér E., Bobko M., Vollmannová A. Heavy metals in onion (*Allium cepa* L.) and environmental and health risks. *Food Additives & Contaminants: Part B.* 2023;17(1):66-76. <https://doi.org/10.1080/19393210.2023.2291369>
57. Opris O., Lung I., Gmélung K., Stegarescu A., Buczkó N., Culicov O., Soran M.-L. Responses of the *Allium cepa* L. to Heavy Metals from Contaminated Soil. *Plants.* 2024;(13):2913. <https://doi.org/10.3390/plants13202913>
58. Czarnek K., Tatarczak-Michalewska M., Szopa A., Klimek-Szczykutowicz M., Jaferník K., Majerek D., Blicharska E. Bioaccumulation Capacity of Onion (*Allium cepa* L.) Tested with Heavy Metals in Biofortification. *Molecules.* 2023, 29(1), 101. <https://doi.org/10.3390/molecules29010101>
59. Naseem Z., Naveed M., Asif M. et al. Enhancing chromium resistance and bulb quality in onion (*Allium cepa* L.) through copper nanoparticles and possible health risk. *BMC Plant Biol* 2024;(24):777. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05460-3>
60. Alias C., Ferretti D., Viola G.V.C., Zerbini I., Bisceglie F., Pelosi G., Zani C., Buschini A., Carcelli M., Rogolino D., Restivo F.M., Degola F. *Allium cepa* tests: A plant-based tool for the early evaluation of toxicity and genotoxicity of newly synthesized antifungal molecules, Mutation Research/*Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis.* 2023;(889):503654. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503654>
61. Cabuga C.C., Abelada J.J.Z., Apostado R.R.Q., Hernando B.J.H., Lador J.E.C., Obenza O.L.P., Presilda C.J.R., Havana H.C. *Allium cepa* test: An evaluation of genotoxicity. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences.* 2017;7(1):12-19.
62. Sheikh Z., Amin M., Khan N., Khan M.N., Sami S.K., Khan S.B., Hafeez I., Khan S.A., Bakhsh E.M., Cheng C.K. Potential application of *Allium cepa* seeds as a novel biosorbent for efficient biosorption of heavy metals ions from aqueous solution, Chemosphere. 2021;(279):130545. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130545>
63. da Cunha Neto A.R., da Silva I.G., Calvelli J.V.B. Toxicity of Heavy Metals that Affect Germination, Development and Cell Cycle of *Allium cepa* L. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2023;(111):22. <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03775-9>
64. Beinşan, Carmen Sumalan, Radu Vătcă, Sorin. Influence of Salt Stress on Quality of Some Onion (*Allium cepa* L.) Local Landraces. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture.* 2015;(72):4-6.
65. Ratnaajah V.R., Gnanachelvama N.G. Effect of Abiotic Stress on Onion Yield: A Review. *Adv. Technol.* 2021;1(1):147-160.
66. Mansha M.Z., Aatif H.M., Ikram K., Hanif C.M.S., Sattar A., Iqbal R., Zaman Q.U., Al-Qahtani S.M., Al-Harbi N.A., Omar W.A. Impact of Various Salinity Levels and Fusarium oxysporum as Stress Factors on the Morpho-Physiological and Yield Attributes of Onion. *Horticulturae.* 2023;(9):786. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070786>

67. Sanwal S.K., Kesh H., Kumar A., Dubey B.K., Khar A., Roupael Y., Kumar P. Salt Tolerance Potential in Onion: Confirmation through Physiological and Biochemical Traits. *Plants*. 2022;11(23):3325. <https://doi.org/10.3390/plants11233325>.
68. Verâncio J.B., da Silva Dias N., de Medeiros J.F., de Moraes P.L.D., do Nascimento C.W.A., de Sousa Neto O.N., da Silva Sá F.V. Yield and Morphophysiology of Onion Grown under Salinity and Fertilization with Silicon. *Sci. Hort.* 2022;(301):111095. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111095>
69. Ali Fuat Gökçe, Zahide Neslihan Öztürk Gökçe, Muhammad Daniyal Junaid, Usman Khalid Chaudhry, Evaluation of biochemical and molecular response of onion breeding lines to drought and salt stresses. *Sci. Hort.* 2023;(311):111802. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111802>.
70. Chaudhry U.K., Gokce Z.N.O., Gokce A.F. Drought and salt stress effects on biochemical changes and gene expression of photosystem II and catalase genes in selected onion cultivars. *Biologia*. 2021;76(10):3107–3121.
71. Pál M., Tajti J., Szalai G., Peeva V., Végh B., Janda T. Interaction of polyamines, abscisic acid and proline under osmotic stress in the leaves of wheat plants. *Sci. Rep.* 2018;8(1):12839. doi: 10.1038/s41598-018-31297-6
72. Gedam P.A., Shirsat D.V., Arunachalam T., Ghosh S., Gawande S.J., Mahajan V., Gupta A.J., Singh M. Screening of onion (*Allium cepa* L.) genotypes for waterlogging tolerance. *Front. Plant Sci.* 2022;(12):727262. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.727262>
73. Golubkina N., Amagova Z., Matsadze V., Zamana S., Tallarita A., Caruso G. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Yield, Biochemical Characteristics, and Elemental Composition of Garlic and Onion under Selenium Supply. *Plants*. 2020;9(1):84. <https://doi.org/10.3390/plants9010084>
74. Shinde S. Effect of arbuscular mycorrhizal glomus species on drought tolerance of onion (*Allium cepa* L.). *International Journal of Researches in Biosciences. Agriculture and Technology*. 2021;(17):287–294.
75. Ilyas U., du Toit L.J., Hajibabaei M., McDonald M.R. Influence of plant species, mycorrhizal inoculant, and soil phosphorus level on arbuscular mycorrhizal communities in onion and carrot roots. *Front. Plant Sci.* 2024;(14):1324626. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1324626>
76. Selvakumar G., Bhatt R.M., Upreti K.K., Bindu G.H., Shweta K., Citricoccus zhacaiensis B-4 (MTCC 12119) a novel osmotolerant plant growth promoting actinobacterium enhances onion (*Allium cepa* L.) seed germination under osmotic stress conditions. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2015;31(5):833–839.
77. Abdelrasheed K.G., Mazrou Y., Omara A.E.D. Soil amendment using biochar and application of K-humate enhance the growth, productivity, and nutritional value of onion (*Allium cepa* L.) under deficit irrigation conditions. *Plants*. 2021;10(12):2598.
78. El Bergui O., Abouabdillah A., Bouriou M. Innovative solutions for drought: evaluating hydrogel application on onion cultivation (*Allium cepa*) in Morocco. *Water*. 2023;15(11):1972.
79. Yousefvand P., Sohrabi Y., Heidari G., Weisany W., Mastinu A. Salicylic Acid Stimulates Defense Systems in *Allium hirtifolium* Grown under Water Deficit Stress. *Molecules*. 2022;27(10):3083. <https://doi.org/10.3390/molecules27103083>
80. Mugwanya M., Kimera F., Abdelnaser A., Sewilam H. Coping with Water Stress: Ameliorative Effects of Combined Treatments of Salicylic Acid and Glycine Betaine on the Biometric Traits and Water-Use Efficiency of Onion (*Allium cepa*) Cultivated under Deficit Drip Irrigation. *Biomolecules*. 2023;13(11):1634. <https://doi.org/10.3390/biom13111634>.
81. Purbajanti E.D., Bintang A.S. Yield and component yield of onion (*Allium cepa* L.) effect of salicylic acid under drought stress in Indonesia. *J. Appl. Nat. Sci.* 2023;15(2):505–511.
82. Rangwala T., Bafna A., Vyas N., Gupta R. Beneficial Role of Soluble Silica in Enhancing Chlorophyll Content in Onion Leaves *Current Agric. Res. J.* 2019;7(3):358–367.
83. Verma K.K., Song X.P., Lin B. Silicon Induced Drought Tolerance in Crop Plants: Physiological Adaptation Strategies. *Silicon*. 2022;(14):2473–2487. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01071-x>
84. Tian L., Zhang Y., Chen P., Zhang F., Li J., Yan F., Dong Y., Feng B. How does the waterlogging regime affect crop yield? A global meta-analysis. *Front. Plant Sci.* 2021;(12):634898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634898>
85. Dubey S., Kuruwanshi V.B., Bhagat K.P., Ghodke P.H. Impact of Excess Moisture in Onion Genotypes (*Allium cepa* L.) under Climate Change Scenario *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 2021;10(03):166–175. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1003.023>.
86. Golubkina N., Romanova O., Romanov V., Krivenkov L.; Shevchenko T., Murariu O.C., Vecchiatti L., Hamburda S.B., Caruso G. Varietal Differences of Yield, Morphological, and Biochemical Parameters of *Allium cepa* L. under Precipitation Excess in Different Phenological Phases. *Stresses*. 2023;(3):541–554. <https://doi.org/10.3390/stresses3030038>
87. Lin M.-W., Watson J.F., Baggett J.R. Inheritance of soluble solids and pyruvic acid content of bulb onions. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 1995;(120):119–122.
88. Lee E.J., Yoo K.S., Jifon J., Patil B.S. Characterization of shortday onion cultivars of 3 pungency levels with flavor precursor, free amino acid, sulphur, and sugar contents. *J. Food Sci.* 2009;(74):475–480.
89. Marotti M., Piccaglia R. Characterization of flavonoids in different cultivars of onion (*Allium cepa* L.). *J. Food Sci.* 2002;(67):1229–1232.
90. Ko E.Y., Nile S.H., Kavita S., Li G. H., Park S.W. Effect of different exposed lights on quercetin and quercetin glucoside content in onion (*Allium cepa* L.). *Saudi J. Biol. Sci.* 2015;22(4):398–403.
91. Shirley B.W. Biosynthesis of flavonoids and effects of stress. *Curr. Opinion Plant Biol.* 2002;5(3):218–223.
92. Rodrigues A.S., Pérez-Gregorio M.R., García-Falcón M.S., Simal-Gándara J., Almeida D.P.F. Effect of meteorological conditions on antioxidant flavonoids in Portuguese cultivars of white and red onions. *Food Chem.* 2011;(124):303–308.
93. Kumar S., Imtiyaz M., Kumar A. Effect of differential soil moisture and nutrient regimes on postharvest attributes of onion (*Allium cepa* L.). *Sci. Hort.* 2007;(112):121–129.
94. Randle W.M., Lancaster J.E. Sulphur compounds in alliums in relation to flavor quality. In: Rabinowitch H.D., Currah L. (eds): *Allium crop sciences: recent advances*. Wallingford, U.K., CAB International. 2002; 329–356.
95. Bettoni M.M., Mogor A.F., Pauletti V., Goicoechea N. Growth and metabolism of onion seedlings as affected by the application of humic substances, mycorrhizal inoculation and elevated CO₂. *Sci. Hort.* 2014;(180):227–235.

Об авторах:

Надежда Александровна Голубкина – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник лабораторно-аналитического отдела, SPIN-код: 9284-3454, <https://orcid.org/0000-0003-1803-9168>, автор для переписки, segolubkina45@gmail.com

Виктор Илларионович Немтинов – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник, Отдел селекции и семеноводства овощных и бахчевых культур, SPIN-код: 1458-2218, <https://orcid.org/0000-0002-2020-200X>, nemtin2@mail.ru

Зарема Ахметовна Амагова – научный сотрудник, SPIN-код: 8755-5814, amman1999@mail.ru

Андрей Александрович Кошеваров – научный сотрудник, zato@inbox.ru,

About the Authors:

Nadezhda A. Golubkina – Dr. Sci. (Agriculture), Head Researcher of Laboratory-Analytical Department, SPIN-code: 9284-3454, <https://orcid.org/0000-0003-1803-9168>, Corresponding Author, segolubkina45@gmail.com

Viktor I. Nemtinov – Dr. Sci. (Agriculture), Head Researcher of Department of selection and seed production of vegetable and melon crops, SPIN-code: 1458-2218, <https://orcid.org/0000-0002-2020-200X>, nemtin2@mail.ru

Zarema A. Amagova – Researcher, SPIN-code: 8755-5814, amman1999@mail.ru

Andrew A. Koshevarov – Researcher, zato@inbox.ru,