

Научная статья/Research Article

УДК 635.72:57.085.2

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-3-62-70

Инна Валерьевна Князева^{1✉}, Оксана Владимировна Вершинина²,Юрий Владимирович Лактионов³^{1,2}Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия³Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Россия¹knyazewa.inna@yandex.ru

БАКТЕРИЗАЦИЯ ШТАММОМ *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АДАПТИВНОСТИ МИКРОКЛОНОВ *MENTHA LONGIFOLIA* И *MENTHA SPICATA* В УСЛОВИЯХ *EX VITRO*

Цель исследования – оценка эффективности применения штамма *Bacillus amyloliquefaciens* для повышения приживаемости микрорастений мяты (*Mentha longifolia* и *Mentha spicata*) на этапе адаптации *ex vitro* в условиях контролируемой среды климатической камеры. Результаты выявили статистически достоверное и видоспецифичное действие биопрепарата. У *M. longifolia* обработка вызывала комплексную стимуляцию роста: длина побега увеличилась на 57,5 %; площадь листьев – на 209; сырая биомасса – на 166,2; сухая биомасса – на 128,4 %. Физиологический статус растений значительно улучшился: содержание хлорофилла *a* повысилось на 21,7 %; хлорофилла *b* – на 9,1, а сумма каротиноидов – на 12,5 % по сравнению с контролем необработанными растениями. В целом отмечено повышение содержания хлорофиллов и каротиноидов на 9–22 % и увеличение индекса NDVI на 39 % (до 0,57), что свидетельствовало об активации фотосинтетического аппарата. У *M. spicata* ответ был избирательным: при аналогичном значительном приросте сырой (195,3 %) и сухой (163,2 %) биомассы и повышении NDVI (22,7 %) зафиксировано снижение концентрации ключевых фотосинтетических пигментов: содержание хлорофилла *a* уменьшилось на 7,2 %, а суммы хлорофиллов (*a* + *b*) – на 6,9 % по сравнению с контролем. Это указывало на иную стратегию адаптации, при которой ресурсы перераспределяются в пользу усиленного роста вегетативной массы, а не синтеза пигментов. Выявлен высокий потенциал целенаправленного использования штамма *B. amyloliquefaciens* S21 в качестве микробиологической биофортификации для управления селекционно-ценными признаками растений. Для *M. longifolia* данный штамм рекомендован в качестве эффективного биостимулятора фотосинтетической продуктивности и общего роста; для *M. spicata* – в качестве агротехнологического приема для интенсификации накопления вегетативной массы. Обоснованы необходимость и целесообразность разработки специализированных, видоспецифичных протоколов применения микробных инокулянтов в современных селекционных программах, направленных на получение высококачественного и адаптивного посадочного материала с заданными хозяйственными характеристиками.

Ключевые слова: мята длиннолистная, мята колосистая, *Bacillus amyloliquefaciens*, адаптация *ex vitro*, климатическая камера

Для цитирования: Князева И.В., Вершинина О.В., Лактионов Ю.В. Бактеризация штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* для повышения адаптивности микроклонов *Mentha longifolia* и *Mentha spicata* в условиях *ex vitro* // Вестник КрасГАУ. 2026. № 3. С. 62–70. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-3-62-70.

Финансирование: исследование проведено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FGUN-2025-0008.

Inna Valerievna Knyazeva^{1✉}, Oksana Vladimirovna Vershinina², Yuri Vladimirovich Laktionov³

^{1,2}Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

³All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Russia

¹knyazewa.inna@yandex.ru

BACTERIZATION WITH A STRAIN OF *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* TO INCREASE THE ADAPTABILITY OF *MENTHA LONGIFOLIA* AND *MENTHA SPICATA* MICROCLONES IN EX VITRO CONDITIONS

The aim of the study is to evaluate the efficacy of *Bacillus amyloliquefaciens* strain in increasing the survival rate of mint microplants (*Mentha longifolia* and *Mentha spicata*) during ex vitro adaptation in a controlled environment climate chamber. The results revealed a statistically significant and species-specific effect of the biopreparation. In *M. longifolia*, treatment caused complex growth stimulation: shoot length increased by 57.5 %; leaf area – by 209; raw biomass – by 166.2; dry biomass – by 128.4 %. The physiological status of plants improved significantly: the content of chlorophyll a increased by 21.7 %; chlorophyll b – by 9.1, and the total carotenoid content – by 12.5 % compared to the control of untreated plants. Overall, a 9–22 % increase in chlorophyll and carotenoid content and a 39 % increase in the NDVI (to 0.57) were observed, indicating activation of the photosynthetic apparatus. In *M. spicata*, the response was selective: despite a similarly significant increase in wet (195.3 %) and dry (163.2 %) biomass and an increase in NDVI (22.7 %), a decrease in the concentration of key photosynthetic pigments was recorded: chlorophyll a content decreased by 7.2 %, and the sum of chlorophylls (a + b) by 6.9 % compared to the control. This indicated a different adaptation strategy, in which resources are redistributed toward enhanced vegetative growth rather than pigment synthesis. High potential for targeted use of the *B. amyloliquefaciens* S21 strain as a microbiological biofortification for managing valuable plant traits was identified. For *M. longifolia*, this strain is recommended as an effective biostimulant of photosynthetic productivity and overall growth; for *M. spicata*, it is used as an agronomic technique for intensifying vegetative mass accumulation. The necessity and feasibility of developing specialized, species-specific protocols for the use of microbial inoculants in modern breeding programs aimed at producing high-quality and adaptable planting material with desired economic characteristics are substantiated.

Keywords: long-leaved mint, spearmint, *Bacillus amyloliquefaciens*, ex vitro adaptation, climate chamber

For citation: Knyazeva IV, Vershinina OV, Laktionov YuV. Bacterization with a strain of *Bacillus amyloliquefaciens* to increase the adaptability of *Mentha longifolia* and *Mentha spicata* microclones in ex vitro conditions. *Bulletin of KSAU*. 2026;(3):62-70. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-3-62-70.

Funding: the study was conducted under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FGUN-2025-0008.

Введение. Согласно современным исследованиям, целенаправленное использование микробных инокулянтов на основе ризосферных и эндофитных бактерий (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*) представляет собой перспективный биотехнологический подход для повышения продуктивности растений [1, 2]. Эффективность этого подхода подтверждена для различных культур, включая ценные эфиромасличные растения, такие как тимьян обыкновенный, в условиях контролируемых агроэкосистем [3]. Данные биопрепараты показали свою результативность и в других направлениях защищенного грунта, например для стимуляции роста микрозелени кориандра посевного (*Coriandrum sativum* L.) [4].

В отличие от широко культивируемой мяты перечной (*Mentha × piperita*), длиннолистная мята (*Mentha longifolia* L.) представляет значительный интерес как источник специфического эфирного масла с высоким содержанием пулегона и ментола, обладающего выраженными антимикробными, антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, что делает ее ценной для фармацевтики, косметологии и пищевой промышленности [5, 6]. Мята колосистая (*Mentha spicata* L.), в свою очередь, ценится за высокое содержание карвона и лимонена в эфирном масле, что определяет ее мягкий, сладковатый аромат и широкое применение в кондитерской отрасли, производстве напитков и парфюмерии [7, 8]. Однако традиционное веге-

тативное размножение обоих видов ограничено низким коэффициентом размножения, сезонностью и высоким риском накопления вирусных и грибковых инфекций, снижающих выход и качество сырья. Клональное микроразмножение *in vitro* решает эти проблемы, обеспечивая получение генетически однородного, оздоровленного посадочного материала в неограниченных количествах независимо от сезона. Критическим технологическим барьером данной технологии для данных видов является этап адаптации микроклонов к нестерильным условиям (*ex vitro*), на котором наблюдается массовая гибель растений из-за стресса, вызванного резкой сменой влажности, освещения и микробного фона среды [9]. Универсальные протоколы, разработанные для мяты перечной, часто оказываются неэффективными для *M. longifolia* и *M. spicata* из-за их видовой специфики в темпах укоренения, формировании кутикулы, чувствительности к патогенам и реакции на условия.

Разработка эффективных протоколов сохранения *in vitro* является ключевым условием для включения мяты в селекционные программы и поддержания ее генетического разнообразия [10, 11]. Критически важным звеном таких протоколов является этап адаптации микроклональных растений к *ex vitro* условиям, где их выживание напрямую зависит от способности преодолевать абиотический и биотический стресс. В связи с этим исследование потенциала полезных микроорганизмов для повышения стрессоустойчивости растений на данном этапе представляет значительный научный и практический интерес.

Цель исследования – оценка эффективности применения штамма *Bacillus amyloliquefaciens* для повышения приживаемости микрорастений мяты (*Mentha longifolia* и *Mentha spicata*) на этапе адаптации *ex vitro* в условиях контролируемой среды климатической камеры.

Задачи: разработать и оптимизировать протокол инокуляции микрорастений мяты штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* S21 на этапе адаптации *ex vitro*; оценить влияние бактериализации на морфометрические показатели приживаемости микрорастений (длина побега, количество листьев, сырая и сухая биомасса); исследовать влияние обработки на физиологическое состояние растений: фотосинтетическую активность (например, по индексу NDVI), содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллы a, b, каротиноиды).

Объекты и методы. Исследование проводилось на базе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (ФНАЦ ВИМ). В качестве объекта исследования использовали укорененные микрорастения двух видов мяты длиннолистной (*Mentha longifolia* L.) и колосистой (*Mentha spicata* L.).

На этапе подготовки к адаптации микрорастения извлекали из культуральных сосудов. Их корневую систему тщательно промывали дистиллированной водой и подвергали кратковременному (5 с) обеззараживанию в 0,01 %-м растворе перманганата калия (KMnO₄). После обработки растения высаживали в горшки объемом 0,5 л, заполненные стерильным субстратом. Субстрат представлял собой смесь нейтрализованного торфа «Агробалт-Н» и агроперлита фракции 0,1–1,0 мм в соотношении 3 : 1. Предварительную стерилизацию торфа проводили в сушильном шкафу «Экрос ПЭ-4630М» при температуре 120 °С в течение 2 ч.

Перед размещением в климатическую камеру для всех микрорастений были зафиксированы исходные биометрические параметры. Анализ морфометрических характеристик на данном этапе показал отсутствие статистически значимых различий ($p > 0,05$) между видами по количеству листьев: у мяты длиннолистной данный показатель составил $(9,88 \pm 0,31)$ шт., у мяты колосистой – $(10,45 \pm 0,45)$ шт. В то же время была выявлена достоверная межвидовая разница ($p < 0,05$) по длине побега. Растения мяты колосистой со средним значением $(5,93 \pm 0,18)$ см статистически значимо превосходили по этому показателю растения мяты длиннолистной, имевшие среднюю длину побега $(5,20 \pm 0,21)$ см. Таким образом, исходный адаптационный потенциал видов оценивался на фоне изначально различающегося развития побеговой системы.

Условия адаптации задавали в климатической камере в автоматическом режиме. Температура воздуха поддерживалась на уровне (23 ± 2) °С. Влажность воздуха была запрограммирована на линейное снижение с (96 ± 2) до (50 ± 2) % в течение 15 сут, со средней скоростью снижения 3 % в сут. Режим полива составил один раз в 48 час из расчета 25 мл воды на одно растение. Для фотосинтетически активного облучения использовали светодиодные источники света с интенсивностью фотосинтетического фотонного потока (PPFD) (140 ± 10) мкмоль · (м⁻² · с⁻¹) и спектральным соотношением длин волн (В – си-

ний: G – зеленый: R – красный: FR – дальний красный) 16B:42G:39R:3FR.

В исследовании применяли штамм бактерий *Bacillus amyloliquefaciens* S21, полученный из коллекции (рег. номер в ВКПМ 05969) Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии (ВНИ-ИСХМ, Санкт-Петербург). Штамм *B. amyloliquefaciens* S21 применяли в виде готовой бактериальной суспензии, которую перед использованием разбавляли стерильной водой до конечной рабочей концентрации $1 \cdot 10^5$ КОЕ/мл. Исходная концентрация препарата составляла $2 \cdot 10^9$ КОЕ/мл. Методика приготовления рабочего раствора была адаптирована на основе ранее описанных протоколов [3, 4, 12]. Влияние микроорганизмов на рост и развитие исследуемых видов мяты оценивали после однократного внесения суспензии бактерий *B. amyloliquefaciens* в прикорневую зону методом полива.

В ходе эксперимента на этапе адаптации микрорастений проводили оценку по комплексу морфо-физиологических показателей, включая длину побегов (см), площадь ($\text{см}^2/\text{растение}$) и количество листьев (шт.), биомассу сырую и сухую (г), содержание основных фотосинтетических пигментов (мг/г) и значение вегетационного индекса NDVI.

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов a, b и суммы каротиноидов) определяли спектрофотометрически. Навеску свежих листьев массой 0,1 г экстрагировали 100 %-м ацетоном. Оптическую плотность полученного экстракта измеряли на двухлучевом спектрофотометре UV-2200 UV/VIS (Китай) при длинах волн 662, 644 и 440,5 нм для хлорофилла a, хлорофилла b и каротиноидов соответственно. Концентрации пигментов рассчитывали по уравнениям Лихтенталера [13]. Конечное содержание пигментов в растительной ткани, выраженное в миллиграммах на грамм сырой массы, вычисляли с учетом объема экстракта и массы навески по стандартной формуле [14]. Все измерения проводили в трех биологических повторностях.

Морфометрический анализ включал определение основных ростовых параметров. Длину побегов измеряли с использованием технической линейки с точностью до 0,1 мм. Площадь листовой поверхности и количество листьев на

растение определяли с помощью фотопланиметра LI-3100 AREA METER (LI-COR, США).

Для оценки биопродуктивности определяли сырую и сухую биомассу. Сырую (надземную) биомассу фиксировали непосредственно после отбора растений для исключения потерь влаги. Массовую долю сухого вещества определяли методом высушивания навески до постоянной массы в сушильном шкафу Memmert UN-450 (Германия) при температуре 105°C в соответствии с ГОСТ 28561-90. Взвешивание проводили на аналитических весах Ohaus EX224/AD (ОНАУС, США). Сухую биомассу рассчитывали по разнице между массой навески до и после высушивания.

Статистическую обработку результатов проводили с применением дисперсионного анализа (ANOVA) в программе MS Excel. В качестве post hoc теста использовали тест Дункана. Количество анализируемых растений (n) составило десять образцов, каждый из которых был представлен тремя повторами.

Результаты и их обсуждение. Статистический анализ данных позволил оценить влияние инокуляции ризобактерией *Bacillus amyloliquefaciens* S21 на морфометрические показатели микрорастений двух видов рода *Mentha* в критический период адаптации к нестерильным условиям. Анализ морфометрических показателей растений мяты длиннолистной (*Mentha longifolia*) и мяты колосистой (*Mentha spicata*) на 15-е сутки адаптации *ex vitro* выявил статистически достоверное ($p \leq 0,05$) стимулирующее влияние инокуляции по всем изученным параметрам в сравнении с контролем. У растений мяты длиннолистной в варианте с бактериями длина побега увеличилась на 57,5 %, достигнув 13,23 против 8,40 см в контроле. Площадь листьев возросла наиболее значительно – на 209,0 % (с 121,67 до 376,00 $\text{см}^2/\text{растение}$). Количество листьев увеличилось на 82,7 % по сравнению с контролем (необработанными растениями) (табл. 1).

Аналогичный положительный эффект был зарегистрирован и для мяты колосистой. Под действием бактериализации длина побега увеличилась на 23,9 % (с 11,30 до 14,0 см). Площадь листовой поверхности возросла на 208,4 % (с 104,83 до 323,30 $\text{см}^2/\text{растение}$). Количество листьев увеличилось на 107,2 % по сравнению с контролем.

Влияние *Bacillus amyloliquefaciens* S21 на морфометрические показатели мяты длиннолистной и колосистой на 15-е сутки адаптации *ex vitro*
The effect of *Bacillus amyloliquefaciens* S21 on the morphometric parameters of long-leaved and spearmint on the 15th day of *ex vitro* adaptation

| Вид | Вариант опыта | Длина побега, см | Площадь листьев, см ² /растение | Количество листьев, шт |
|-------------------|---------------|------------------|--|------------------------|
| Мята длиннолистая | Контроль | 8,40 ± 0,26с | 121,67 ± 4,24с | 92,33 ± 3,17с |
| | Бактерии | 13,23 ± 0,52а | 376,00 ± 16,32а | 168,67 ± 8,84а |
| Мята колосистая | Контроль | 11,30 ± 0,57b | 104,83 ± 3,23d | 56,30 ± 2,11d |
| | Бактерии | 14,00 ± 0,64а | 323,30 ± 13,25b | 116,67 ± 3,32b |

Здесь и далее: разные буквы в столбцах указывают на статистически значимые различия ($p \leq 0,05$)

Помимо стимуляции морфогенеза, инокуляция штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* S21 достоверно увеличила биомассу у обоих изучаемых видов мяты в период адаптации *ex vitro* (рис. 1). У мяты длиннолистной сырая биомасса возросла в 2,7 раза, а прирост сухой массы достиг 0,86 г. У мяты колосистой эффект был выражен

сильнее: сырая биомасса возросла почти в 3 раза, а количество сухого вещества – в 2,6 раза, что в абсолютных значениях соответствует приросту на 0,62 г. Результаты подтверждают высокую эффективность штамма для усиления накопления вегетативной биомассы растений в критический период адаптации *ex vitro*.

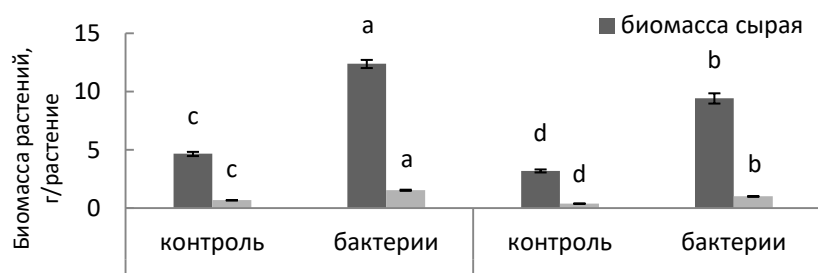


Рис. 1. Влияние *Bacillus amyloliquefaciens* S21 на сырую и сухую биомассу мяты длиннолистной и колосистой на 15-е сут адаптации *ex vitro*
Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* S21 on wet and dry biomass of long-leaved and spearmint on day 15 of *ex vitro* adaptation

Исследования показали, что инокуляция штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* S21 оказывала выраженное положительное влияние на морфобиологические показатели обоих видов мяты в период адаптации к условиям *ex vitro*. Наибольший относительный прирост наблюдался по площади листовой поверхности и накопленной биомассе, что указывает на усиление фотосинтетической активности и общей продуктивности растений. При этом мята длиннолистная демонстрировала более выраженный прирост по длине побега и сухой биомассе, тогда как у мяты колосистой наибольшее увеличение наблюдалось по количеству листьев и сырой биомассе.

Для комплексной оценки влияния бактериализации на физиологическое состояние растений был проведен анализ фотосинтетического аппарата, включая определение содержания хлорофиллов и каротиноидов (табл. 2).

У мяты длиннолистной бактериализация оказала комплексное стимулирующее действие, достоверно повысив содержание всех исследованных пигментов относительно контроля. Наибольший прирост отмечен для хлорофилла а (на 21,7 %), за которым следовало увеличение суммы хлорофиллов (а + b) на 17,6 %, каротиноидов на 12,5 % и хлорофилла b на 9,1 % по сравнению с контролем. Напротив, у мяты колосистой инокуляция привела к угнетению синтеза ключевых фотосинтетических пигментов. Наблюдалось статистически значимое снижение содержания хлорофилла а на 7,2 % и, как следствие, суммы хлорофиллов (а + b) на 6,9 %. При этом концентрация хлорофилла b и каротиноидов в варианте с бактериями достоверно не отличалась от контроля, что указывает на избирательный характер воздействия штамма.

Влияние *Bacillus amyloliquefaciens* S21 на фотосинтетические пигменты мяты длиннолистной и колосистой на 15-е сут адаптации *ex vitro*
 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* S21 on photosynthetic pigments of long-leaved and spearmint on day 15 of *ex vitro* adaptation

| Вид | Вариант опыта | Содержание, мг/г сырой биомассы | | | |
|-------------------|---------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | Хл. a | Хл. b | Хл. (a+b) | Каротиноиды |
| Мята длиннолистая | Контроль | 0,92 ± 0,03b | 0,44 ± 0,01b | 1,36 ± 0,04b | 0,32 ± 0,01b |
| | Бактерии | 1,12 ± 0,03a | 0,48 ± 0,01a | 1,60 ± 0,04a | 0,36 ± 0,01a |
| Мята колосистая | Контроль | 1,66 ± 0,04a | 0,65 ± 0,02a | 2,31 ± 0,06a | 0,50 ± 0,02a |
| | Бактерии | 1,54 ± 0,06b | 0,61 ± 0,02a | 2,15 ± 0,08b | 0,47 ± 0,01a |

Выявленная четкая видовая (генотипическая) специфичность реакции на обработку штаммом S21 проявлялась в противоположных эффектах. Для мяты длиннолистной штамм выступал эффективным биостимулятором фотосинтетического аппарата, тогда как для мяты колосистой его применение вызывало стрессовую реакцию, вы-

ражавшуюся в угнетении синтеза основных хлорофиллов.

В отличие от биохимических показателей, интегральный вегетационный индекс NDVI продемонстрировал положительную реакцию на обработку у обоих видов (рис. 2).

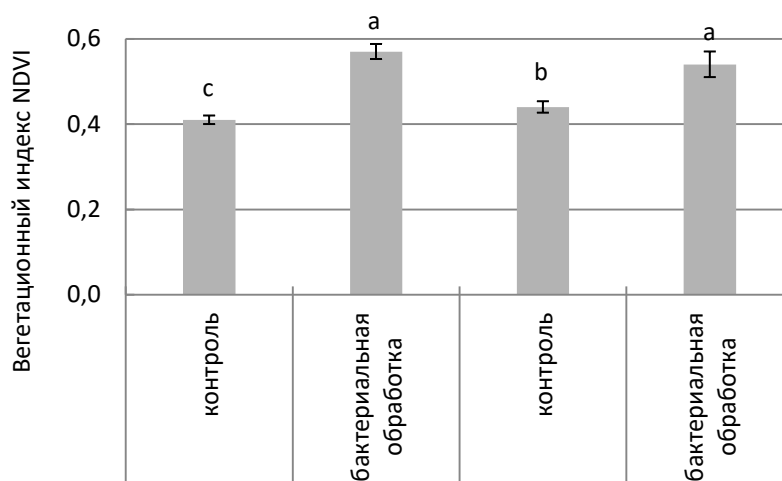


Рис. 2. Вегетационный индекс NDVI микрорастений мяты длиннолистной и колосистой при обработке *Bacillus amyloliquefaciens* S21 на 15-е сут адаптации *ex vitro*
 NDVI vegetation index of long-leaved and spearmint microplants treated with *Bacillus amyloliquefaciens* S21 on the 15th day of *ex vitro* adaptation

Под действием инокулянта значение вегетационного индекса NDVI статистически достоверно увеличилось у обоих видов, однако выраженность эффекта демонстрировала четкую генотипическую зависимость. Наибольший отклик наблюдался у мяты длиннолистной: показатель NDVI возрос на 39,0 %, достигнув значения 0,57 против 0,41 в контроле. Для мяты колосистой стимуляция была менее выраженной – прирост составил 22,7 % (до 0,54 относительно контрольных значений 0,44).

Полученные результаты согласуются с данными об эффективности бактериализации для мяты длиннолистной и мелиссы лекарственной на других этапах онтогенеза, в частности при укоренении черенков [14]. Так, исследования показали, что инокуляция бактериями рода *Bacillus* (*B. subtilis*, штаммы 10-4 и 26D) стимулировала морфогенез и фотосинтетический аппарат этих видов, причем эффективность строго зависела от конкретного штамма и генотипа растения [14]. В настоящей работе продемонстрирована схожая закономерность: инокуляция штаммом

B. amyloliquefaciens S21 достоверно повышала морфометрические показатели и индекс NDVI у обоих видов мяты, однако его влияние на биохимию фотосинтетических пигментов оказалось противоположным и генотипически зависимым.

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что штамм *Bacillus amyloliquefaciens* S21 проявлял выраженный биостимулирующий потенциал в отношении микрорастений двух видов мяты в период адаптации *ex vitro*, однако характер его физиологического воздействия был видоспецифичным. У мяты длиннолистной (*Mentha longifolia*) инокуляция вызывала комплексную положительную реакцию, достоверно повышая ключевые ростовые (длина побега, количество листьев), биометрические (площадь листовой поверхности) и фотосинтетические показатели (содержание пигментов, индекс NDVI). Ключевым результатом стало значительное увеличение как сырой, так и, что наиболее важно, сухой биомассы (на 128 %). Сочетание максимальных значений индекса NDVI (0,57) и высокого прироста сухой биомассы (на 128 %) свидетельствовало об усилении продукционного процесса и повышении эффективности фотосинтетического аппарата. Данные результаты определяют мяту длиннолистную как высокоперспективную ис-

ходную форму для селекции на общую продуктивность и фотосинтетическую активность с применением микробиологических технологий.

У мяты колосистой инокуляция штаммом S21 вызвала разнонаправленную реакцию: при значительном увеличении биомассы (сырой – на 195 %, сухой – на 163 %) и индекса NDVI (на 23 %) наблюдалось снижение содержания ключевых фотосинтетических пигментов (хлорофилла а и суммы хлорофиллов). Это указывает на возможное перераспределение ресурсов в пользу аккумуляции вегетативной массы, а не синтеза фотосинтетических пигментов.

Полученные результаты служат основой для разработки целевых агротехнологических приемов микробиологической биофортификации посадочного материала на этапе адаптации *ex vitro*. Рекомендована однократная инокуляция микрорастений штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* S21 в прикорневую зону на начальном этапе адаптации. Цели применения являются видоспецифичными: для мяты длиннолистной – комплексная стимуляция фотосинтетического аппарата и повышение общей продуктивности; для мяты колосистой – преимущественно направленное увеличение выхода общей биомассы, в особенности сырой массы.

Список источников

1. Железняков С.В., Калинина Т.В., Деева В.К., и др. Изучение фосфатмобилизующей способности штаммов *Agrobacterium radiobacter* 10 и *Pseudomonas chlororaphis* ПГ7 *in vitro* // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57, № 1. С. 158–170.
2. Etesami H., Jeong B.R., Glick B.R. Potential Use of *Bacillus* spp. as an Effective Biostimulant Against Abiotic Stresses in Crops: A Review // Current Research in Biotechnology. 2023. Vol. 5. P. 100128.
3. Титенков А.В., Князева И.В., Вершинина О.В., и др. Оценка влияния биопрепаратов и светодиодного облучения на растения тимьяна обыкновенного в закрытых агроэкосистемах // Вестник КрасГАУ. 2024. № 9. С. 26–35.
4. Ловецкая Н.Д., Амонаријева А.А., Пухальский Я.В., и др. Выращивание микрозелени кориандра посевного (*Coriandrum sativum* L.) в условиях защищенного грунта с использованием микробных биопрепаратов. В сб.: V Международная научно-практическая конференция «Научный и инновационный потенциал развития производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений». Симферополь, 2023. С. 102–110.
5. Shahar B., Chongtham N. Traditional uses and advances in recent research on wild aromatic plant *Mentha longifolia* and its pharmacological importance // Phytochemistry Reviews. 2024. Vol. 23, N 2. P. 529–550.
6. Маланкина Е.Л., Кузьменко А.Н., Евграфов А.А., и др. Химические особенности разновидностей мяты длиннолистной (*Mentha longifolia* L.) // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2025. Т. 66, № 1. С. 72–80.

7. Маланкина Е.Л., Ткачева Е.Н., Кузьменко А.Н., и др. Некоторые особенности биохимического состава сырья мяты колосковой (*Mentha spicata* L.) // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2022. Т. 63, № 6. С. 422–429.
8. El Menyiy N., Mrabti H.N., El Omari N., et al. Medicinal uses, phytochemistry, pharmacology, and toxicology of *Mentha spicata* // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2022. Vol. 2022, N 1. Art. 7990508. DOI: 10.1155/2022/7990508.
9. Voicu D., Cioboiu O. Improvement of the In Vitro Development of *Mentha piperita* L. and *Mentha longifolia* (L.) Huds. Varieties // Oltenia, Studii și Comunicări. Științele Naturii. 2024. Vol. 40, N 1. P. 191–196.
10. Benahmed A., Harfi B., Belkhiri A. Biological activity of essential oils of *Mentha pulegium* from field-grown and acclimated in vitro plants // Current Science. 2019. Vol. 116, N 11. P. 1897–1904.
11. Егорова Н.А., Загорская М.С., Абдурашитов С.Ф. Особенности длительного хранения мяты сортов Ажурная и Бергамотная в коллекции in vitro // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12, № 1. С. 64–75. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-64-75.
12. Панферова Т.В., Пухальский Я.В., Митюков А.С., и др. Оценка применения биопрепарата комплексного действия Агрофил и полигуматов сапропеля на интенсификацию физиологических процессов *Allium cepa* L. при росте в омагниченной гидропонике // Аграрный научный журнал. 2021. № 3. С. 38–44. DOI: 10.28983/asj.y2021i3pp38-44.
13. Князева И.В. Влияние бактерий *Bacillus subtilis* на рост и развитие мяты длиннолистной (*Mentha longifolia* L.) и мелиссы лекарственной (*Melissa officinalis* L.) при гидропонном выращивании // Вестник КрасГАУ. 2025. № 7. С. 86–94.

References

1. Zheleznyakov SV, Kalinina TV, Deeva VK, et al. Study of phosphate-mobilizing ability of *Agrobacterium radiobacter* 10 and *Pseudomonas chlororaphis* ПГ7 in vitro. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*. 2022;57(1):158-170. (In Russ.). DOI:10.15389/agrobiology.2022.1.158rus.
2. Etesami H, Jeong BR, Glick BR. Potential Use of *Bacillus spp.* as an Effective Biostimulant Against Abiotic Stresses in Crops: A Review. *Current Research in Biotechnology*. 2023;5:100128. DOI: 10.1016/j.crbiot.2023.100128.
3. Titenkov AV, Knjazeva IV, Vershinina OV, et al. Ocenka vlijanija biopreparatov i svetodiodnogo obluchenija na rastenija tim'jana obyknovenogo v zakrytyh agrojekosistemah. *Bulletin of KSAU*. 2024;9:26-35. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-7-86-94.
4. Lovetskaya ND, Amonarieva AA, Puhalskij JaV, et al. Vyrashhivanie mikrozeleni koriandra posevnogo (*Coriandrum sativum* L.) v uslovijah zashhishhennogo grunta s ispol'zovaniem mikrobnih biopreparatov. In: V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Nauchnyj i innovacionnyj potencial razvitija proizvodstva, pererabotki i primeneniya jefiromaslichnyh i lekarstvennyh rastenij". Simferopol'; 2023. P. 102–110. (In Russ.).
5. Shahar B, Chongtham N. Traditional uses and advances in recent research on wild aromatic plant *Mentha longifolia* and its pharmacological importance. *Phytochemistry Reviews*. 2024;23(2):529-550. DOI: 10.1007/s11101-023-09896-7.
6. Malankina EL, Kuz'menko AN, Evgrafov AA, et al. Himicheskie osobennosti raznovidnostej mjaty dlinnolistnoj (*Mentha longifolia* L.). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Himiya*. 2025;66(1):72-80. (In Russ.). DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-1-72-80.
7. Malankina EL, Tkacheva EN, Kuz'menko AN, et al. Nekotorye osobennosti biohimicheskogo sostava syr'ya mjaty koloskovej (*Mentha spicata* L.). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Himiya*. 2022;63(6):422-429. (In Russ.).
8. El Menyiy N, Mrabti HN, El Omari N, et al. Medicinal uses, phytochemistry, pharmacology, and toxicology of *Mentha spicata*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2022;2022:7990508. DOI: 10.1155/2022/7990508.
9. Voicu D, Cioboiu O. Improvement of the In Vitro Development of *Mentha piperita* L. and *Mentha longifolia* (L.) Huds. Varieties. *Oltenia, Studii și Comunicări. Științele Naturii*. 2024;40(1):191-196.

10. Benahmed A, Harfi B, Belkhiri A. Biological activity of essential oils of *Mentha pulegium* from field-grown and acclimated *in vitro* plants. *Current Science*. 2019;116(11):1897-1904. DOI: 10.18520/cs/v116/i11/1897-1904.
11. Egorova NA, Zagorskaja MS, Abdurasitov SF. Osobennosti dlitel'nogo hranenija mjaty sortov Azhurnaya i Bergamotnaya v kollekcii *in vitro*. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya*. 2022;12(1):64-75. (In Russ.). DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-64-75.
12. Panferova TV, Puhalskij JaV, Mitjukov AS, et al. Ocenka primeneniya biopreparata kompleksnogo dejstviya Agrofil i poligumatov sapropelya na intensivnuyu fiziologicheskih processov *Allium cepa* L. pri roste v omagnichennoj gidroponike. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2021;3:38-44. (In Russ.). DOI: 10.28983/asj.y2021i3pp38-44.
13. Knjazeva IV. Vliyanie bakterij *Bacillus subtilis* na rost i razvitie mjaty dlinnolistnoj (*Mentha longifolia* L.) i melissy lekarstvennoj (*Melissa officinalis* L.) pri gidroponnom vyrashhivanii. *Bulletin of KSAU*. 2025;7:86-94. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-7-86-94.

Статья принята к публикации 19.02.2026/ The article accepted for publication 19.02.2026

Информация об авторах:

Инна Валерьевна Князева, старший научный сотрудник лаборатории исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов, кандидат биологических наук

Оксана Владимировна Вершинина, старший научный сотрудник лаборатории исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов, кандидат сельскохозяйственных наук

Юрий Владимирович Лактионов, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, кандидат биологических наук

Information about the authors.

Inna Valerievna Knyazeva, Senior Researcher at the Laboratory for Research of Technological Properties of Agricultural Materials, Candidate of Biological Sciences

Oksana Vladimirovna Vershinina, Senior Researcher at the Laboratory for Research of Technological Properties of Agricultural Materials, Candidate of Agricultural Sciences

Yuri Vladimirovich Laktionov, Leading Researcher at the Laboratory of Ecology of Symbiotic and Associative Rhizobacteria, Candidate of Biological Sciences

