

Научная статья/Research Article

УДК 633.82:631.8

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-62-73

**Инна Валерьевна Князева**

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

knyazewa.inna@yandex.ru

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ *BACILLUS SUBTILIS* НА НЕКОТОРЫЕ БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЯТЫ ДЛИННОЛИСТОЙ И МЕЛИССЫ ЛЕКАРСТВЕННОЙ ПРИ ГИДРОПОННОМ ВЫРАЩИВАНИИ

Цель исследования – оценка воздействия ризобактерий *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) на некоторые биохимические показатели *Mentha longifolia* L. и *Melissa officinalis* L., выращиваемых методом гидропоники в условиях закрытых агроэкосистем. Впервые был проведен анализ содержания 20 аминокислот для мелиссы лекарственной и мяты длиннолистной в условиях гидропонного выращивания и при инокуляции *B. subtilis*. Штамм 10-4 эффективно усиливал синтез большинства незаменимых аминокислот в листьях мелиссы лекарственной и мяты длиннолистной за исключением метионина (Met), содержание которого находилось на уровне контроля; штамм 26D увеличивал накопление незаменимых аминокислот Lys, Val, Trp (для обеих культур), His (для мяты), Phe, Leu+Ile, Thr (для мелиссы). Бактериальная инокуляция также способствовала увеличению содержания заменимых аминокислот (Arg, Tyr, Pro, Ser, Ala, Gly, Cys-Cys). Выявлено существенное повышение уровня большинства аминокислот в растениях, обработанных *B. subtilis* 10-4, за исключением глутаминовой кислоты+глутамин (Glu+Gln) у мяты длиннолистной и мелиссы лекарственной, а также аспарагиновой кислоты+аспарагин (Asp+Asn) у мяты длиннолистной. В частности наблюдалось увеличение содержания калия и фосфора в растениях, что положительно сказывалось на их росте и развитии. Более того, отмечалось существенное повышение выхода эфирных масел: при использовании штамма 10-4 выход эфирного масла увеличился на 68 % у мяты и на 121 % у мелиссы. Важно отметить, что инокуляция *B. subtilis* также способствовала снижению уровня нитратов в растительном сырье, что свидетельствовало об эффективном преобразовании нитратного азота в аммонийный. Использование *B. subtilis* может стать эффективным приемом для оптимизации питательных свойств эфиромасличных культур, что представляет интерес для агрономии и пищевой промышленности.

**Ключевые слова:** *Mentha longifolia* (L.) Huds, *Melissa officinalis* L., *Bacillus subtilis*, аминокислоты, катионы, анионы, эфирное масло, гидропоника

**Для цитирования:** Князева И.В. Оценка влияния *Bacillus subtilis* на некоторые биохимические показатели мяты длиннолистной и мелиссы лекарственной при гидропонном выращивании // Вестник КрасГАУ. 2025. № 5. С. 62–73. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-62-73.

**Благодарность:** исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № FGUN-2025-0008.

**Inna Valerievna Knyazeva**

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

knyazewa.inna@yandex.ru

**EFFECT OF *BACILLUS SUBTILIS* ON SOME BIOCHEMICAL PARAMETERS OF LONG-LEAVED MINT AND MEDICINAL MELISSA UNDER HYDROPONIC CULTIVATION**

The aim of the study is to evaluate the effect of *Bacillus subtilis* rhizobacteria (strains 10-4 and 26D) on some biochemical parameters of *Mentha longifolia* L. and *Melissa officinalis* L. grown hydroponically in closed agroecosystems. For the first time, the content of 20 amino acids was analyzed for lemon balm and long-leaved mint under hydroponic cultivation conditions and with *B. subtilis* inoculation. Strain 10-4 effectively enhanced the synthesis of most essential amino acids in lemon balm and long-leaved mint leaves, with the exception of methionine (Met), the content of which was at the control level; strain 26D increased the accumulation of essential amino acids Lys, Val, Trp (for both crops), His (for mint), Phe, Leu+Ile, Thr (for lemon balm). Bacterial inoculation also contributed to an increase in the content of replaceable amino acids (Arg, Tyr, Pro, Ser, Ala, Gly, Cys-Cys). A significant increase in the level of most amino acids was found in plants treated with *B. subtilis* 10-4, with the exception of glutamic acid + glutamine (Glu + Gln) in long-leaved mint and lemon balm, as well as aspartic acid + asparagine (Asp + Asn) in long-leaved mint. In particular, an increase in the content of potassium and phosphorus in plants was observed, which had a positive effect on their growth and development. Moreover, a significant increase in the yield of essential oils was noted: when using strain 10-4, the yield of essential oil increased by 68 % for mint and by 121 % for lemon balm. It is important to note that inoculation with *B. subtilis* also contributed to a decrease in the level of nitrates in plant materials, which indicated the effective conversion of nitrate nitrogen into ammonium. The use of *B. subtilis* can be an effective technique for optimizing the nutritional properties of essential oil crops, which is of interest to agronomy and the food industry.

**Keywords:** *Mentha longifolia* (L.) Huds, *Melissa officinalis* L., *Bacillus subtilis*, amino acids, cations, anions, essential oil, hydroponics

**For citation:** Knyazeva IV. Effect of *Bacillus subtilis* on some biochemical parameters of long-leaved mint and medicinal melissa under hydroponic cultivation. *Bulletin of KSAU*. 2025;(5):62-73. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-62-73.

**Acknowledgments:** the study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the RF № FGUN-2025-0008.

**Введение.** В последние десятилетия интерес к исследованию эфиромасличных и лекарственных растений как источников фармакологически активных веществ значительно возрос по всему миру. Эти растения играют ключевую роль в удовлетворении базовых медицинских потребностей населения, особенно в борьбе с разнообразными бактериальными инфекциями. В большинстве развивающихся стран растительные препараты до сих пор остаются основным средством лечения множества инфекционных заболеваний [1].

Помимо медицинского применения, лекарственные, пряно-ароматические и эфиромасличные растения также находят широкое применение в производстве агропродукции, фармацевтической продукции, парфюмерии и натуральной косметики. Качество таких растений напрямую зависит от их генетического потенциала и способности синтезировать и накапливать вторичные метаболиты, которые обладают высокой биологической активностью [2]. Однако стоит отметить, что скорость роста и накопления этих

ценных соединений существенно зависит от условий окружающей среды, таких как климат, почва, освещенность и влажность. Доступность питательных веществ является ключевым фактором, влияющим на содержание вторичных метаболитов, их биосинтез и накопление [3, 4].

Мята длиннолистная (*Mentha longifolia* L.) и мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.) представляют собой перспективные культуры для гидропонного или беспочвенного выращивания, допускающего применение различных минеральных питательных растворов, а также биоудобрений на основе полезных микроорганизмов [5]. Интерес представляет применение ростостимулирующих бактерий (PGPB, Plant Growth-Promoting Bacteria) *Bacillus* spp. (ризосферных или эндофитных), способствующих улучшению роста и развития растений посредством широкого спектра процессов: улучшение минерального питания (в т. ч. солюбилизация фосфатов, биологическая фиксация азота), водного обмена, продукции различных метаболитов с антимикробными свойствами, фитогор-

монов и регуляции их уровня в растениях, индукции системной резистентности, что было показано на примере многих видов растений [6].

Различные виды ризобактерий, такие как *Burkholderia cepacia*, *Staphylococcus epidermidis* и штаммы из группы *Bacillus subtilis*, способствуют росту растений за счет выделения летучих органических соединений. Виды родов *Azotobacter* и *Bacillus* являются двумя значимыми и наиболее эффективными PGPB-бактериями, обладающими потенциалом для симбиотической фиксации атмосферного азота при инокуляции растений. В предыдущих исследованиях были установлены взаимовыгодные отношения между бактериями (в т. ч. *Bacillus spp.*) и 86 видами лекарственных растений из 40 семейств, включая семейство *Lamiaceae* [7]. Известно, что бактерии *Bacillus spp.* способны не только стимулировать рост и устойчивость, но и улучшать биологическую ценность лекарственных растений через регуляцию синтеза вторичных метаболитов. Так, штаммы *B. altitudinis* KX230132.1 [8] и *B. amyloliquefaciens* SW-34 действовали как стимуляторы накопления гинзенозидов в растениях женьшеня [9]. Некоторые штаммы *Bacillus spp.* оказывают положительное влияние на скорость прорастания [10], рост корней [11].

Информация о воздействии *Bacillus subtilis* на изменение аминокислотного профиля эфиромасличных растений в условиях закрытых агроэкосистем на сегодняшний день остается крайне ограниченной. Несмотря на наличие исследований, изучающих воздействие бактериальных инокулянтов на растения, основная их часть фокусируется на обобщенных параметрах, включая урожайность, прорастание семян и общую биомассу растений. Однако детальное изучение влияния определенных бактериаль-

ных штаммов на биохимические характеристики эфиромасличных культур, в частности на их аминокислотный профиль, все еще остается малоизученной областью.

Метод бактеризации приобретает особую значимость при выращивании эфиромасличных культур в условиях закрытых агроэкосистем. По данным зарубежных научных баз, за последние пять лет было опубликовано свыше 430 исследований, посвященных воздействию бактериальной инокуляции на растения мяты и Melissa.

Таким образом, сочетание методов бактеризации с технологией закрытого земледелия открывает широкие перспективы для устойчивого и безопасного производства эфиромасличных, лекарственных растений, отвечающего современным требованиям рынка и экологической безопасности.

**Цель исследования** – оценка воздействия ризобактерий *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) на некоторые биохимические показатели *Mentha longifolia* L. и *Melissa officinalis* L., выращиваемых методом гидропоники в условиях закрытых агроэкосистем.

**Объекты и методы.** Опыты проводили на селекционном материале мяты длиннолистной *Mentha longifolia* (L.) Huds. и Melissa лекарственной *Melissa officinalis* L., полученных из Всероссийского научно-исследовательского института лекарственных и ароматических растений (Москва, Россия).

Клоны мяты длиннолистной и Melissa лекарственной были получены путем черенкования побегов с 2–3 узлами. Их выращивали на минераловатном субстрате в кубиках размером 7 × 7 см методом гидропоники (рис. 1).



А



В

Рис. 1. Объекты исследований: черенки мяты длиннолистной (А) и Melissa лекарственной (В)  
Objects of research: cuttings of long-leaved mint (A) and lemon balm (B)

В каждом кубике находилось по одному растению. Питательные растворы готовили на основе трехкомпонентных удобрений серии GHE Flora (General Hydroponics Europe, Париж, Франция) с поддержанием pH 5,7–6,0. Эксперимент проводился в климатической камере при следующих условиях: освещенность 200 ммоль/м<sup>2</sup>с, дневная/ночная температура 23/19 °С, влажность воздуха (60 ± 2) % и фотопериод (16 ч день/8 ч ночь). Растения мяты длиннолистной анализировались в фазу цветения на 46-е сут роста и Melissa лекарственной в фазу активного побегообразования на 64-е сут.

В ходе работы были использованы два штамма эндофитных RGPB *B. subtilis*: 10-4 и 26D. Штамм 10-4 (регистрационный номер в ВКПМ В-12988) был выделен из пахотных почв Республики Башкортостан в Башкирском НИИ сельского хозяйства УФИЦ РАН (Уфа, Россия). Этот штамм обладает способностью производить ауксины и сидерофорные соединения, фиксировать атмосферный азот, стимулировать рост растений и повышать их устойчивость к стрессу, а также колонизирует внутренние ткани растений (является эндофитом). Штамм 26D (регистрационный номер в ВКПМ 016-02-2491-1) является основой коммерческого препарата «Фитоспорин-М», производимого ООО «НВП «БашИнком» (Уфа, Россия), и используется в данном исследовании в качестве эталона. Клетки *B. subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) культивировали в агаризованной среде Луриа-Бертани (ЛБ) при 37 °С в течение 3–4 сут [12]. Клоны исследуемых культур были инокулированы *B. subtilis* 10-4 и 26D путем полива прикорневой зоны растений: на 7-е сут после посадки мяты длиннолистной и на 10-е сут Melissa лекарственной. На каждое растение расходовалось по 5 мл суспензии *B. subtilis*. Титры суспензий составляли 10<sup>5</sup> КОЕ/мл для штамма 10-4 и 10<sup>8</sup> КОЕ/мл для штамма 26D (согласно рекомендациям производителя). Концентрация клеток определялась методом измерения оптической плотности при длине волны 600 нм с помощью спектрофотометра UV-2200 с двойной лучистостью UV/VIS (производства Jixip Group, Шанхай, Китай). В качестве контроля выступали растения без бактериальной обработки.

Определение массовой доли 20 аминокислот (глицин (Gly), аланин (Ala), валин (Val), лейцин (Leu), изолейцин (Ile), пролин (Pro), фенилаланин (Phe), триптофан (Trp), метионин (Met), се-

рин (Ser), треонин (Thr), цистеин (Cys), тирозин (Tyr), аспарагиновая кислота (Asp), глутаминовая кислота (Glu), аспарагин (Asn), глутамин (Gln), лизин (Lys), аргинин (Arg), гистидин (His)), основных катионов калия (K<sup>+</sup>), магния (Mg<sup>2+</sup>) и кальция (Ca<sup>2+</sup>) и анионов сульфатов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) и фосфатов (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) проводили методом капиллярного электрофореза с использованием аналитического комплекса на основе системы капиллярного электрофореза «Капель-205» (ООО «Люмекс-Маркетинг», Санкт-Петербург, Россия). Для аминокислот проводили кислотный и щелочной гидролиз для получения производных фенилизотиокарбамила [13].

Массовую долю эфирных масел в свежесобранном сырье определяли методом гидродистилляции по Гинзбергу. Для мяты длиннолистной масса навески составляла 50 г, а для Melissa лекарственной – 150 г. Время дистилляции для обоих видов растений равнялось 1 ч.

Первичные данные были обработаны с применением дисперсионного анализа (ANOVA) в программе MS Excel. В качестве post hoc теста использовали тест Дункана.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунках 2, 3 представлены результаты анализа аминокислотного профиля в биомассе растений мяты длиннолистной и Melissa лекарственной. Выявлено, что основными аминокислотами в биомассе мяты длиннолистной (рис. 2) и Melissa лекарственной (рис. 3) в процентном отношении от общего состава являлись лейцин + изолейцин (Leu+Ile), глутаминовая кислота + глутамин (Glu+Gln), аспарагиновая кислота + аспарагин (Asp+Asn), доля которых в среднем составляла 35,6 % от общего аминокислотного состава.

Обработка штаммом 26D биомассы растений Melissa лекарственной привела к значительному увеличению содержания семи незаменимых аминокислот, что является важным результатом, поскольку эти аминокислоты играют ключевую роль в поддержании здоровья организма и нормального функционирования различных органов и систем. Содержание лизина увеличилось на 13 %, что имеет важное значение для человека, поскольку эта аминокислота участвует в синтезе белка, поддерживает иммунитет и способствует росту мышц. Уровень фенилаланина повысился на 8 %, что критично для выработки нейромедиаторов и производства тирозина, важных для нормальной мозговой дея-

тельности. Лейцин и изолейцин увеличились на 9 %, оказывая влияние на восстановление тканей и поддержание уровня энергии в организме. Валин вырос на 10 %, способствуя улучшению функций мозга и ускорению восстановления мышечной ткани. Повышение концентрации треонина на 11 % улучшает выработку коллагена

на и эластина, а также укрепляет иммунную систему. Наконец, увеличение содержания триптофана на 13 % способствует образованию серотонина, который влияет на настроение, сон и аппетит. Эти изменения подчеркивают важность обработки штаммом 26D для повышения пищевой ценности мелиссы лекарственной (рис. 2).

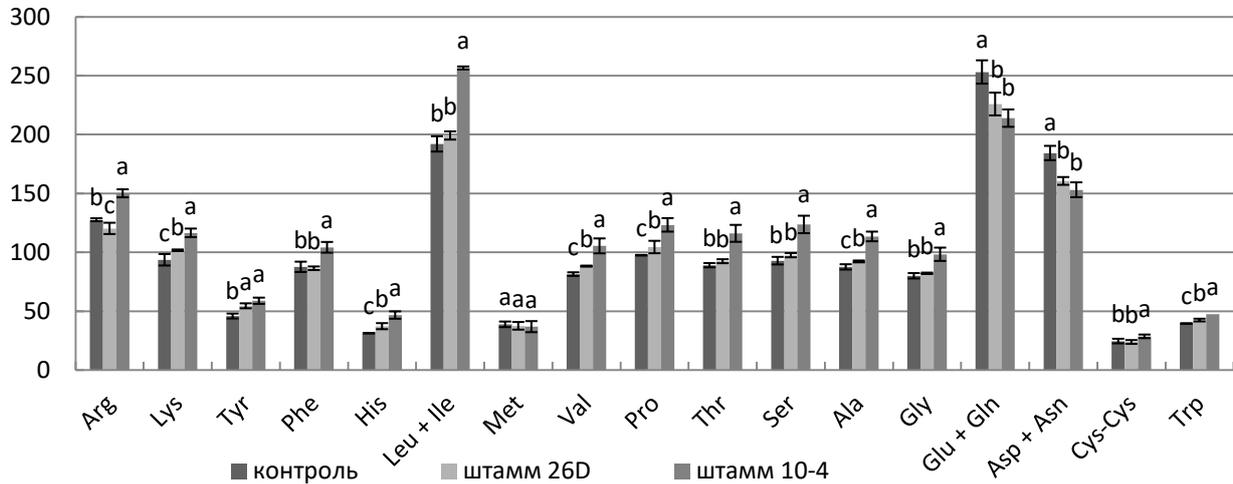


Рис. 2. Влияние *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) на аминокислотный профиль мяты длиннолистной (здесь и далее: разные буквы обозначают статистически значимые различия между группами ( $p < 0,05$ ))

*The effect of Bacillus subtilis (strains 10-4 and 26D) on the amino acid profile of longleaf mint (hereinafter: different letters indicate statistically significant differences between groups ( $p < 0.05$ ))*

В то же время при обработке штаммом 10-4 наблюдалось увеличение практически всех заменимых аминокислот в биомассе мяты длиннолистной, за исключением Glu+Gln и Asp+Asn, содержание которых было ниже на 18,3 и 20,4 % соответственно по сравнению с контролем. При этом штамм 10-4 эффективно усиливал синтез всех незаменимых аминокислот, за исключением метионина (Met), содержание которого в листьях мяты длиннолистной оставалось на уровне контроля 256,42 мг/100 г. Обработка мяты длиннолистной штаммом 10-4 привела к значительному повышению содержания восьми незаменимых аминокислот в ее биомассе. Так, концентрация лизина (Lys) увеличилась на 24,4 %; гистидина (His) – на 49,4; валина (Val) – на 29,5; суммы лейцина и изолейцина (Leu+Ile) – на 33,6; фенилаланина (Phe) – на 18,9; треонина (Thr) – на 30,4 и триптофана (Trp) – на 20,2 % по сравнению с контрольными растениями.

В биомассе растений мелиссы лекарственной обработка штаммом 26D приводила к по-

вышению содержание семи незаменимых аминокислот: лизина (Lys) – на 13,0 %; фенилаланина (Phe) – на 8,0; лейцин+изолейцина (Leu+Ile) – на 9,0; валина (Val) – на 10,0; треонина (Thr) – на 11,0 и триптофана (Trp) – на 13,0 % по сравнению с контролем (рис. 3).

В то же время обработка штаммом 10-4 способствовала увеличению содержания всех незаменимых аминокислот (Lys, Phe, His, Leu + Ile, Met, Val, Thr, Trp) в биомассе мелиссы лекарственной в среднем на 15,7 % по сравнению с контрольной группой. Наиболее выраженное увеличение содержания аминокислот было зафиксировано для лизина (Lys) – на 35,2 % и фенилаланина (Phe) – на 27,0 %. Также значительно выросли уровни валина (Val) – на 14,5 %; гистидина (His) – на 14,5; метионина (Met) – на 18,1; лейцина и изолейцина (Leu+Ile) – на 9,7; триптофана (Trp) – на 9,5 и треонина (Thr) – на 7,3 % по сравнению с контрольной группой. Кроме того, оба штамма (26D и 10-4) повышали содержание заменимых аминокислот, за исключением Glu+Gln.

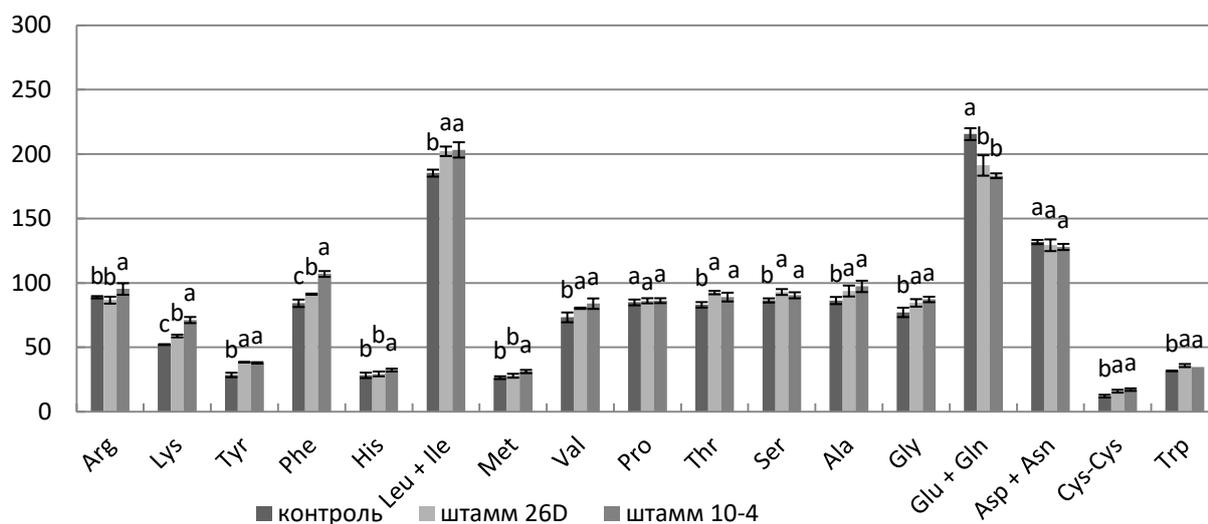


Рис. 3. Влияние *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) на аминокислотный профиль мелиссы лекарственной  
 Effect of *Bacillus subtilis* (strains 10-4 and 26D) on the amino acid profile of *Melissa officinalis*

Незаменимые аминокислоты, в частности лизин (Lys) и метионин (Met), не могут быть синтезированы организмом человека и животных, поэтому должны поступать из растительных продуктов питания [14]. Однако содержание этих аминокислот в растениях часто ограничено. К примеру, Lys часто присутствует в растениях в небольших количествах и тем самым ограничивает пищевую ценность растительного сырья [15]. Обработка *B. subtilis* 26D способствовала увеличению накопления Lys на 6,0 % (мята длиннолистная) и на 12,8 % (мелисса лекарственная); штамм 10-4 усиливал синтез Lys на 24,4 % для мяты длиннолистной и на 35,2 % для мелиссы лекарственной (см. рис. 2, 3).

Данные исследования показали значительное увеличение среднего количества большинства аминокислот в изучаемых растениях после обработки штаммом *Bacillus subtilis* 10-4. Однако этот эффект оказался неоднородным для всех исследуемых соединений. В частности в растениях мяты длиннолистной и мелиссы лекарственной наблюдалось снижение уровня глутаминовой кислоты и глутамина (Glu+Gln). Это изменение могло быть связано с особенностями метаболизма этих растений, которые реагируют на обработку специфическим образом. Важно отметить, что в мяте длиннолистной также снизилось содержание аспарагиновой кислоты и аспарагина (Asp+Asn). Такое действие может указывать на возможные механизмы регуляции аминокислотного состава в растительных тка-

нях под воздействием бактерий *B. subtilis*. Возможно, бактерии способствуют перераспределению ресурсов внутри растения, усиливая производство одних аминокислот за счет уменьшения других. Например, снижение уровня аспарагиновой кислоты и глутаминовой кислоты может свидетельствовать о переключении метаболических путей в сторону образования других веществ. Несмотря на эти исключения, общий тренд увеличения содержания большинства аминокислот подтвердил положительное влияние обработки *B. subtilis* 10-4 на питательную ценность исследованных растений. Такой подход может иметь практическое значение в сельском хозяйстве и биотехнологии, где повышение концентрации полезных веществ в растительном сырье представляет значительный интерес.

Согласно исследованиям [16], накопление аминокислот (Ser, Asp, Arg, P-Нур, Met-His, Thr, Ala и Leu) было выше в листьях мяты длиннолистной по сравнению с листьями мелиссы лекарственной, выращенных в открытом грунте. В данных исследованиях в условиях гидропоники среднее общее содержание аминокислот также было выше у мяты длиннолистной по сравнению с мелиссой лекарственной.

Макроэлементы являются жизненно важными компонентами ежедневного рациона человека, без которых невозможно поддерживать нормальное функционирование организма. Недостаток этих элементов может привести к серьез-

ным заболеваниям и нарушениям работы различных систем организма. Поэтому важно ежедневно получать достаточное количество макроэлементов из разнообразных продуктов питания или специальных добавок, чтобы обеспечить здоровье и благополучие.

В таблице представлены результаты анализа за изменений катионов и анионов в биомассе

исследуемых растений после обработки двумя штаммами (10-4 и 26D) *Bacillus subtilis*. Данные таблицы показывают, как воздействие этих штаммов влияет на химический состав растений, включая соотношение катионов и анионов, что имеет важное значение для понимания физиологических процессов и адаптивных реакций растений на внешние воздействия.

**Влияние *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) на накопление основных катионов ( $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) и анионов ( $SO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ) в биомассе мяты длиннолистной и Melissa лекарственной (разные буквы обозначают статистически значимые различия между группами ( $p < 0,05$ ))**  
**The effect of *Bacillus subtilis* (strains 10-4 and 26D) on the accumulation of basic cations ( $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) and anions ( $SO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$ ) in the biomass of longleaf mint and lemon balm (different letters indicate statistically significant differences between the groups ( $p < 0.05$ ))**

Культура	Вариант опыта	Содержание, мг/100 г сырой массы растений*				
		$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$SO_4^{2-}$	$PO_4^{3-}$
Мята длиннолистная	Контроль	577,14±12,18b	62,74±3,65b	85,23±1,20c	69,31±2,61b	207,98±4,19b
	Штамм 26D	580,58±11,35b	73,65±1,99a	116,24±2,99b	84,91±1,41a	223,14±8,94ab
	Штамм 10-4	619,78±9,32a	71,69±1,34a	124,86±1,46a	82,14±1,62a	237,68±7,39a
Melissa лекарственная	Контроль	520,89±3,98c	54,62±2,12b	76,65±3,75c	51,08±1,41c	160,05±7,84b
	Штамм 26D	567,57±5,99b	64,48±1,98a	83,03±2,40b	66,21±2,38b	186,98±6,37a
	Штамм 10-4	623,02±4,66a	62,27±1,57a	97,82±2,25a	74,80±1,12a	199,04±6,78a

\*Тест Дункана рассчитывался по каждой культуре отдельно.

Обнаружено, что обработка *B. subtilis* (26D и 10-4) приводила к увеличению содержания катионов и анионов в обоих видах исследуемых растений (см. табл.). После обработки мяты длиннолистной штаммом 26D произошло следующее изменение содержания ионов: калий ( $K^+$ ) увеличился на 0,6 %; магний ( $Mg^{2+}$ ) – на 17,4; кальций ( $Ca^{2+}$ ) – на 36,4; сульфат ( $SO_4^{2-}$ ) – на 22,5; а фосфат ( $PO_4^{3-}$ ) – на 7,3 %. При использовании штамма 10-4 наблюдалась следующая динамика: калий ( $K^+$ ) вырос на 7,4 %; магний ( $Mg^{2+}$ ) – на 14,3; кальций ( $Ca^{2+}$ ) – на 46,5; сульфат ( $SO_4^{2-}$ ) – на 18,5; фосфат ( $PO_4^{3-}$ ) – на 14,3 %. Во всех случаях результаты сравниваются с показателями контрольной группы. Штамм 10-4 оказал лучший результат, обеспечив более значительное увеличение содержания большинства исследуемых ионов по сравнению с обработкой штаммом 26D.

Наиболее значительные изменения в биомассе мяты длиннолистной после обработки штаммами *Bacillus subtilis* коснулись уровней ионов кальция и сульфатов. Сульфаты играют ключевую роль в синтезе аминокислот и белков, а также в образовании фитогормонов, что существенно ускоряет процессы роста и развития растений. Важным моментом стало существенное повышение уровня кальция, который укрепляет структуру клеток и увеличивает сопротивляемость растения к неблагоприятным внешним факторам, таким как механические повреждения или патогенные микроорганизмы.

После обработки Melissa лекарственной штаммом 26D содержание ионов изменилось следующим образом: калий ( $K^+$ ) увеличился на 9,0 %; магний ( $Mg^{2+}$ ) – на 18,1; кальций ( $Ca^{2+}$ ) – на 8,7; сульфат ( $SO_4^{2-}$ ) – на 29,6; фосфат ( $PO_4^{3-}$ ) – на 16,8 %. Магний выступает централь-

ной частью молекулы хлорофилла, необходимо для фотосинтеза. Повышенная концентрация магния в растении способствует ускоренной ассимиляции углекислого газа и, соответственно, более эффективной фиксации солнечной энергии, что ведет к увеличению продуктивности.

При обработке штаммом 10-4 наблюдалось еще большее увеличение: калий ( $K^+$ ) вырос на 19,6 %; магний ( $Mg^{2+}$ ) – на 14,0; кальций ( $Ca^{2+}$ ) – на 27,6; сульфат ( $SO_4^{2-}$ ) – на 46,4; фосфат ( $PO_4^{3-}$ ) – на 24,4 %. Все изменения сравнивались с уровнем контрольных значений.

Исследование катионов и анионов играет значительную роль в оценке влияния бактериальных обработок на вкусовые свойства и пищевую ценность растений, ведь изменения в соотношении ионов могут отражаться на органолептических характеристиках готового продукта. Таким образом, данные таблицы закладывают основу для последующих исследований и формирования практических рекомендаций по применению микробиологических препаратов в сельском хозяйстве.

Штаммы бактерий, такие как *Bacillus subtilis*, могут изменять гормональный баланс растений,

усиливая образование вторичных метаболитов, включая эфирные масла. Анализ содержания эфирного масла в изучаемых растениях показал, что бактериальная обработка обоими штаммами (10-4 и 26D) оказывала значительное влияние на накопление эфирного масла в листьях мяты длиннолистной (рис. 4, А) и Melissa лекарственной (рис. 4, В). В частности применение штамма 26D способствовало увеличению содержания эфирного масла в листьях мяты длиннолистной и Melissa лекарственной на 33,3 и 70,8 % соответственно по сравнению с контролем. В то же время увеличение среднего содержания эфирного масла в листьях мяты длиннолистной и Melissa лекарственной при обработке штаммом 10-4 составило 68,1 и 120,8 % соответственно по сравнению с контрольными растениями. Таким образом, штамм 10-4 был наиболее эффективен в стимуляции накопления эфирного масла, особенно в листьях Melissa лекарственной (см. рис. 4, В), где он вызывал более чем двукратное увеличение содержания эфирного масла по сравнению с контролем.

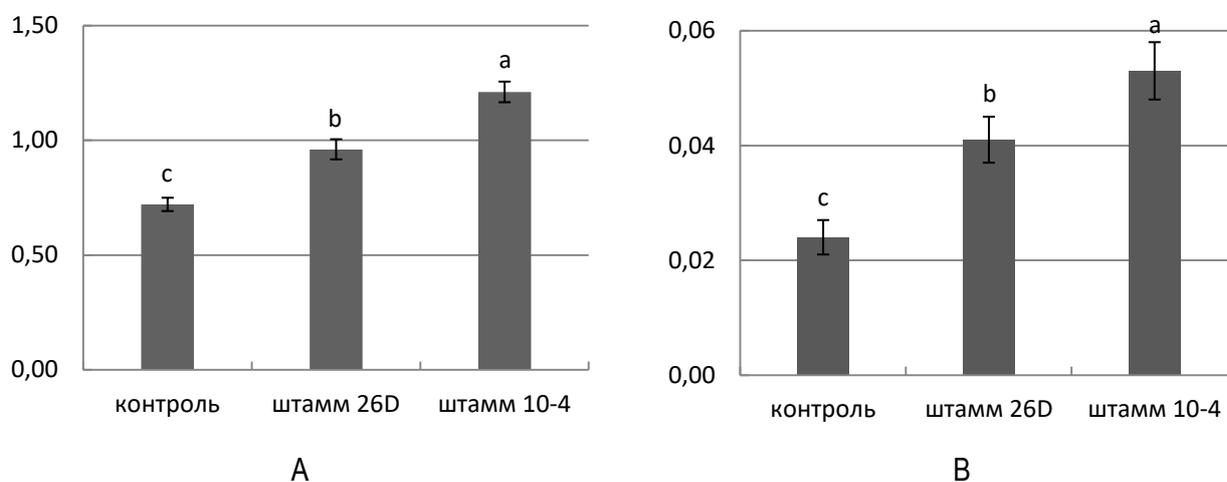


Рис. 4. Влияние *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) на содержание эфирного масла мяты длиннолистной (А) и Melissa лекарственной (В)

The effect of *Bacillus subtilis* (strains 10-4 and 26D) on the content of longleaf mint (A) and lemon balm (B) essential oils

В течение вегетационного периода растения, наряду со способностью накапливать в своей биомассе ценные биологически активные соединения, также могут аккумулировать и вещества, представляющие потенциальную опасность

для здоровья человека. С целью выявления таких веществ нами был проведен химический анализ содержания нитратов в биомассе растений мяты длиннолистной и Melissa лекарственной в зависимости от варианта опыта (рис. 5).

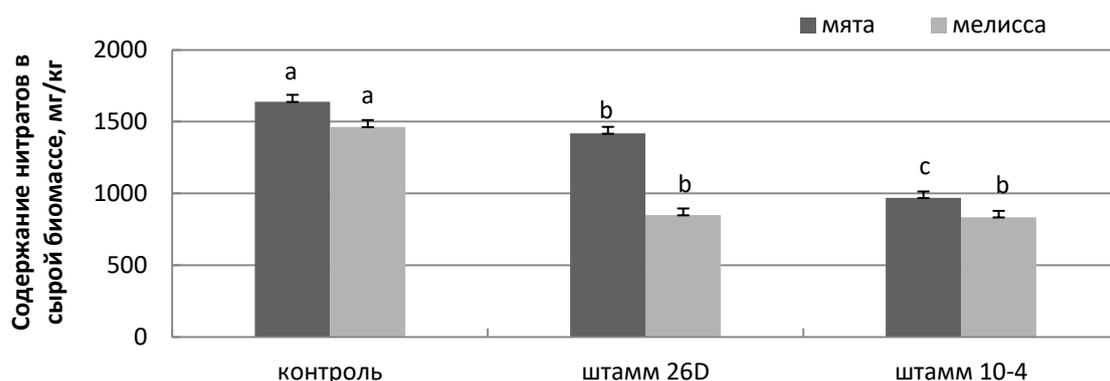


Рис. 5. Влияние *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) на содержание нитратов в растениях мяты длиннолистной и мелиссы лекарственной  
 The effect of *Bacillus subtilis* (strains 10-4 and 26D) on the nitrate content in plants of longleaf mint and lemon balm

Многочисленные исследования показали, что применение *Bacillus subtilis* может снизить потери и повысить эффективность использования азота, уменьшить нитрификацию, усилить денитрификацию, способствовать росту растений и борьбе с болезнями, а также повысить урожайность сельскохозяйственных культур. Некоторые ризобактерии напрямую связаны с повышением активности нитратредуктазы и содержанием азота в листьях растений.

Результаты анализа по содержанию нитратов в биомассе мяты длиннолистной и мелиссы лекарственной продемонстрировали существенные различия между вариантами обработки. У растений мяты длиннолистной обработка штаммами 26D и 10-4 способствовала снижению концентрации нитратов на 15,6 и 69,1 % соответственно по сравнению с контролем. В биомассе мелиссы лекарственной обработка штаммами 26D и 10-4 привело к уменьшению содержания нитратов на 72,4 и 75,4 % соответственно по сравнению с контролем. Вместе с тем следует отметить, что предельно допустимая концентрация нитратов во всех исследованных вариантах (включая контрольные растения) не превышала допустимую норму. В среднем по вариантам опыта содержание нитратов составило 1195,83 мг/кг, что соответствует нормативным требованиям.

Исследования разных авторов на ряде культур показали снижение содержания нитратов при бактериальной инокуляции. Так, применение *Bacillus subtilis* (штамм 11) в сочетании с молибденом (Mo) было наиболее эффективным в снижении содержания нитратов в почве, которое достигало до 41,0 % при выращивании ки-

тайской капусты. Удобрение Mo из расчета 0,8 мг/кг почвы и *Bacillus subtilis* 11 были рекомендованы для восстановления почв, загрязненных нитратами [17]. Инокуляция *Bacillus subtilis* уменьшила накопление аммонийного азота  $N-NH_4^+$  и нитратного азота  $N-NO_3^-$  в побегах и корнях рукколы при гидропонном выращивании на 18 и 14 % по сравнению с вариантами без инокуляции [18].

Проведенные исследования, подкрепленные данными из литературы, подтверждают, что использование *Bacillus subtilis* способствует снижению содержания нитратов в растениях. Бактериальная инокуляция представляет собой эффективный метод получения экологически чистой и высококачественной растительной продукции, предназначенной для использования в медицине и производстве эфирных масел. Этот подход помогает минимизировать риски, связанные с накоплением вредных веществ, обеспечивая тем самым безопасность конечного продукта для потребителей.

**Заключение.** Исследования подтвердили значительный потенциал использования *Bacillus subtilis* (штаммы 10-4 и 26D) для улучшения аминокислотного профиля эфиромасличных растений, таких как мята длиннолистая и мелисса лекарственная, при гидропонном выращивании. Инокуляция *Bacillus subtilis* приводила к усиленному синтезу большинства незаменимых (за исключением метионина) и заменимых аминокислот, что свидетельствует об увеличении питательной ценности получаемого растительного сырья. Исключениями стали глутаминовая кислота+глутамин для обоих видов рас-

тений и аспарагиновая кислота+аспарагин для мяты длиннолистной.

Инокуляция *Bacillus subtilis* вызвала заметные изменения в биохимических показателях биомассы мяты длиннолистной и Melissa лекарственной, способствуя увеличению концентраций калия ( $K^+$ ) и фосфора ( $PO_4^{3-}$ ), особенно при обработке штаммом 10-4. Исследования также выявили существенное 1,5–2-кратное увеличение накопления эфирных масел этих растений под влиянием *Bacillus subtilis*, причем наиболее выраженный эффект наблюдался при использовании штамма 10-4. Применение штамма 10-4 привело к увеличению выхода эфирного масла на 68,0 % у мяты длиннолистной и на 121,0 % у Melissa лекарственной.

Минимальное содержание нитратов в мяте длиннолистной (969,58 мг/кг) было обнаружено

при обработке штаммом 10-4, в то время как у Melissa лекарственной при применении штаммов 10-4 и 26D уровень нитратов составил 834,60 и 849,27 мг/кг соответственно. Эти результаты указывают на то, что обработка *B. subtilis* способствует эффективному преобразованию нитратного азота в аммонийный, уменьшая возможную токсичность готового продукта.

Таким образом, бактерии штаммы 10-4 и 26D *B. subtilis* продемонстрировали свою эффективность в повышении продуктивности указанных растений. Полученные данные указывают на перспективность применения *B. subtilis* для улучшения биохимического состава эфиромасличных культур мяты длиннолистной и Melissa лекарственной в условиях закрытых агроэкосистем.

#### Список источников

1. Kannan M., Elavarasan G., Balamurugan A., et al. Hydroponic farming—A state of art for the future agriculture // Materials today: proceedings. 2022. Vol. 68. P. 2163–2166. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.416. EDN: VNKQEY.
2. Mehdizadeh L., Moghaddam M. Hydroponic System for Cultivation of Medicinal Plants. In: Kumar N., Singh S., editors. Biosynthesis of Bioactive Compounds in Medicinal and Aromatic Plants. Food Bioactive Ingredients. Springer, Cham. 2023. P. 213–233. DOI: 10.1007/978-3-031-35221-8\_10.
3. Koriesh E.M., Abo El-Soud I.H. Medicinal plants in hydroponic system under water-deficit conditions a way to save water. In: Technological and Modern Irrigation Environment in Egypt: Best Management Practices & Evaluation. 2020. P. 131–153. DOI: 10.1007/978-3-030-30375-4\_7.
4. Князева И.В., Вершинана О.В., Гудимо В.В., и др. Технологические приемы выращивания мяты и Melissa на вертикальных стеллажах // Вестник КрасГАУ. 2021. № 11. С. 78–84. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-78-84. EDN: EGXZWM.
5. Zeljkovic S.C., Smekalova K., Kaffkova K., et al. Influence of post-harvesting period on quality of thyme and spearmint essential oils // Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants. 2021. Vol. 25. P. 100335. DOI: 10.1016/j.jarmap.2021.100335. EDN: ULZEPY.
6. Bhattacharyya P.N., Jha D.K. Plant growth-promoting bacteria (PGPB): emergence in agriculture World // J. Microbiol. Biotechnol. 2013. № 28. P. 1327–1350.
7. Wu W., Chen W., Liu S., et al. Beneficial relationships between endophytic bacteria and medicinal plants // Frontiers in plant science. 2021. Vol. 12. P. 646146. DOI: 10.3389/fpls.2021.646146. EDN: ZAVTVQ.
8. Sun Z., Yang L.M., Han M., et al. Biological control ginseng grey mold and plant colonization by antagonistic bacteria isolated from rhizospheric soil of Panax ginseng Meyer // Biological Control. 2019. Vol. 138. P. 104048. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2019.104048. EDN: ZRJJCK.
9. Qi Y., Li X., Wang J., et al. Efficacy of plant growth-promoting bacteria Streptomyces werraensis F3 for chemical modifications of diseased soil of ginseng // Biocontrol Science and Technology. 2021. Vol. 31, № 2. P. 219–233. DOI: 10.1080/09583157.2020.1843598. EDN: ZCGTMC.
10. Perez-Garcia L.A., Saenz-Mata J., Fortis-Hernandez M., et al. Plant-growth-promoting rhizobacteria improve germination and bioactive compounds in cucumber seedlings // Agronomy. 2023. Vol. 13, № 2. P. 315. DOI: 10.3390/agronomy13020315. EDN: EBBYMR.
11. Nazir U., Zargar M., Baba Z., et al. Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria associated with pea rhizosphere in North Himalayan region // Int J Chem Stud. 2020. Vol. 8, № 1. P. 1131–1135. DOI: 10.22271/chemi.2020.v8.i1o.8401. EDN: LBNVIG.

12. Lastochkina O., Pusenkova L., Yuldashev R., et al. Effects of *Bacillus subtilis* on some physiological and biochemical parameters of *Triticum aestivum* L. (wheat) under salinity // *Plant Physiol. Biochem* 2017. Vol. 121. P. 80–88. DOI: 10.1016/j.plaphy.2017.10.020. EDN: XNWVCV.
13. Arlt K., Brandt S., Kehr J. Amino acid analysis in five pooled single plant cell samples using capillary electrophoresis coupled to laser-induced fluorescence detection // *Journal of Chromatography A*. 2001. Vol. 926, № 2. P. 319–325. DOI: 10.1016/S0021-9673(01)01052-4. EDN: ARAJKX.
14. Galili G., Amir R., Fernie A.R. The regulation of essential amino acid synthesis and accumulation in plants // *Annual review of plant biology*. 2016. Vol. 67, № 1. P. 153–178. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043015-112213.
15. Yang Q.Q., Zhao D.S., Zhang C.Q., et al. A connection between lysine and serotonin metabolism in rice endosperm // *Plant physiology*. 2018. Vol. 176, № 3. P. 1965–1980. DOI: 10.1104/pp.17.01283.
16. Gomez-Bellot M.J., Lorente B., Medina S., et al. Acute and Rapid Response of *Melissa officinalis* and *Mentha spicata* to Saline Reclaimed Water in Terms of Water Relations, Hormones, Amino Acids and Plant Oxylipins // *Plants*. 2022. Vol. 11, № 24. P. 3427. DOI: 10.3390/plants11243427. EDN: OGGMFG.
17. Ma Y., Zhang S., Hu J., et al. Effects of Molybdenum Fertilizer Combined with *Bacillus subtilis* Strain on the Growth of Chinese Cabbage and the Content of Nitrate in Soil. // *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. P. 970. DOI: 10.3390/horticulturae8100970. EDN: WAYILM.
18. Julyanne T., Sena S., Carlos O., et al. Inoculation reduces nitrate accumulation and increases growth and nutrient accumulation in hydroponic arugula // *Scientia Horticulturae*. 2023. Vol. 320. P. 112213. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112213. EDN: ENISSK.

### References

1. Kannan M, Elavarasan G, Balamurugan A, et al. Hydroponic farming-A state of art for the future agriculture. *Materials today: proceedings*. 2022;68:2163-2166. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.416. EDN: VNKQEY.
2. Mehdizadeh L, Moghaddam M. Hydroponic System for Cultivation of Medicinal Plants. In: Kumar N., Singh S., editors. *Biosynthesis of Bioactive Compounds in Medicinal and Aromatic Plants. Food Bioactive Ingredients*. Springer, Cham. 2023. P. 213–233. DOI: 10.1007/978-3-031-35221-8\_10.
3. Koriesh EM, Abo El-Soud IH. Medicinal plants in hydroponic system under water-deficit conditions a way to save water. In: *Technological and Modern Irrigation Environment in Egypt: Best Management Practices & Evaluation*. 2020. P. 131–153. DOI: 10.1007/978-3-030-30375-4\_7.
4. Knyazeva IV, Vershinina OV, Gudimo VV, et al. Technological mint and melise cultivation methods on vertical shelves. *Bulletin of KSAU*. 2021;11:78-84. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2021-11-78-84. EDN: EGXZWM.
5. Zeljkovic SC, Smekalova K, Kaffkova K, et al. Influence of post-harvesting period on quality of thyme and spearmint essential oils. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 2021;25:100335. DOI: 10.1016/j.jarmap.2021.100335. EDN: ULZEPY.
6. Bhattacharyya PN, Jha DK. Plant growth-promoting bacteria (PGPB): emergence in agriculture World. *J. Microbiol. Biotechnol.* 2013;(28):1327-1350.
7. Wu W., Chen W., Liu S., et al. Beneficial relationships between endophytic bacteria and medicinal plants. *Frontiers in plant science*. 2021;12:646146. DOI: 10.3389/fpls.2021.646146. EDN: ZAVTVQ.
8. Sun Z, Yang LM, Han M, et al. Biological control ginseng grey mold and plant colonization by antagonistic bacteria isolated from rhizospheric soil of *Panax ginseng* Meyer. *Biological Control*. 2019;138:104048. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2019.104048. EDN: ZRJJCK.
9. Qi Y, Li X, Wang J, et al. Efficacy of plant growth-promoting bacteria *Streptomyces werraensis* F3 for chemical modifications of diseased soil of ginseng. *Biocontrol Science and Technology*. 2021; 31(2):219-233. DOI: 10.1080/09583157.2020.1843598. EDN: ZCGTMC.
10. Perez-Garcia LA, Saenz-Mata J, Fortis-Hernandez M, et al. Plant-growth-promoting rhizobacteria improve germination and bioactive compounds in cucumber seedlings. *Agronomy*. 2023;13(2):315. DOI: 10.3390/agronomy13020315. EDN: EBBYMR.

11. Nazir U, Zargar M, Baba Z, et al. Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria associated with pea rhizosphere in North Himalayan region. *Int J Chem Stud.* 2020; 8(1):1131-1135. DOI: 10.22271/chemi.2020.v8.i1o.8401. EDN: LBNVIG.
12. Lastochkina O, Pusenkova L, Yuldashev R, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on some physiological and biochemical parameters of *Triticum aestivum* L. (wheat) under salinity. *Plant Physiol. Biochem.* 2017;121:80-88. DOI: 10.1016/j.plaphy.2017.10.020. EDN: XNWVCV.
13. Arlt K, Brandt S, Kehr J. Amino acid analysis in five pooled single plant cell samples using capillary electrophoresis coupled to laser-induced fluorescence detection. *Journal of Chromatography A.* 2001;926(2):319-325. DOI: 10.1016/S0021-9673(01)01052-4. EDN: ARAJKX.
14. Galili G, Amir R, Fernie AR. The regulation of essential amino acid synthesis and accumulation in plants. *Annual review of plant biology.* 2016;67(1):153-178. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043015-112213.
15. Yang QQ, Zhao DS, Zhang CQ, et al. A connection between lysine and serotonin metabolism in rice endosperm. *Plant physiology.* 2018;176(3):1965-1980. DOI: 10.1104/pp.17.01283.
16. Gomez-Bellot MJ, Lorente B, Medina S, et al. Acute and Rapid Response of *Melissa officinalis* and *Mentha spicata* to Saline Reclaimed Water in Terms of Water Relations, Hormones, Amino Acids and Plant Oxylipins. *Plants.* 2022;11(24):3427. DOI: 10.3390/plants11243427. EDN: OGGMFG.
17. Ma Y, Zhang S, Hu J, et al. Effects of Molybdenum Fertilizer Combined with *Bacillus subtilis* Strain on the Growth of Chinese Cabbage and the Content of Nitrate in Soil. *Horticulturae.* 2022;8:970. DOI: 10.3390/horticulturae8100970. EDN: WAYILM.
18. Julyanne T, Sena S, Carlos O, et al. Inoculation reduces nitrate accumulation and increases growth and nutrient accumulation in hydroponic arugula. *Scientia Horticulturae.* 2023;320: 112213. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112213. EDN: ENISSK.

Статья принята к публикации 07.04.2025 / The article accepted for publication 07.04.2025.

Информация об авторах:

**Инна Валерьевна Князева**, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией исследований технологических свойств сельскохозяйственных материалов, кандидат биологических наук

Information about the authors:

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

