

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ

Научная статья  
УДК 635.21:579.64  
EDN: DROPGY  
DOI: 10.21285/achb.963



**Повышение урожайности и качества  
клубней картофеля путем предпосадочной инокуляции  
оздоровленных гидропонных миниклубней  
эндофитными бактериями *Bacillus subtilis***

Л.И. Пусенкова\*✉, О.В. Ласточкина\*\*

\*Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Российская Федерация

\*\*Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью работы являлось изучение влияния предпосадочной инокуляции семенных клубней (оздоровленных гидропонных миниклубней и клубней репродукции суперэлита) эндофитной бактерией *Bacillus subtilis* 10-4 на урожайность и качество (фитонутриентный состав) клубней картофеля. В ходе проведенного исследования показано, что при способе инокуляции гидропонных миниклубней и суперэлита количество клубней на 1 куст картофеля превышало контроль на 35%, урожайность – на 68,5 и 16,7% соответственно, также формировалось больше клубней товарного качества по сравнению с контролем как по количеству, так и по массе. Предобработка клубней эндофитом не оказала влияния на накопление крахмала в клубнях, выращенных из миниклубней и суперэлита, однако снижала содержание редуцирующих сахаров на 57 и 11%, способствовала более интенсивному накоплению витамина С до 24 и 19%, а также суммы антоцианов до 64 и 67%, соответственно по сравнению с контролем. Содержание азота в клубнях, выращенных из бактеризованных миниклубней и суперэлита, увеличилось на 15 и 9%, фосфора – на 42 и 15%, калия – на 10 и 7%, меди – на 13 и 8%, железа – на 10 и 6% соответственно по сравнению с контролем без обработки. Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о более эффективном повышении урожайности и существенном улучшении фитонутриентного состава клубней (особенно по содержанию фосфора, меди) при использовании для предпосевной инокуляции оздоровленных гидропонных миниклубней в сравнении с клубнями репродукции суперэлита.

**Ключевые слова:** эндофитные бактерии, картофель, аскорбиновая кислота, антоцианы, макро- микроэлементы, фосфор, медь

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00262 (<https://rscf.ru/project/23-26-00262/>).

**Для цитирования:** Пусенкова Л.И., Ласточкина О.В. Повышение урожайности и качества клубней картофеля путем предпосадочной инокуляции оздоровленных гидропонных миниклубней эндофитными бактериями *Bacillus subtilis* // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. № 1. DOI: 10.21285/achb.963. EDN: DROPGY.

## Improving the yield and quality of potato tubers through preplant inoculation of healthy hydroponic minitubers with *Bacillus subtilis* endophytic bacteria

Liudmila I. Pusenkova\*, Oksana V. Lastochkina\*\*

\*Bashkir Research Institute of Agriculture, Ufa Federal Research Centre RAS, Ufa, Russian Federation

\*\*Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Centre RAS, Ufa, Russian Federation

**Abstract.** The study was aimed at examining how the preplant inoculation of seed tubers (healthy hydroponic minitubers and super elite reproductive tubers) with *Bacillus subtilis* 10-4 endophytic bacteria affects the yield and quality (phytonutrient composition) of potato tubers. It was shown that with the inoculation of hydroponic minitubers and super elite tubers, the number of tubers per one potato plant exceeded control by 35%; the yield exceeded control by 68.5 and 16.7%, respectively. In addition, more tubers of marketable quality were obtained in terms of both number and weight as compared to control. The pretreatment of tubers with endophyte had no effect on starch accumulation in the tubers grown from minitubers and super elite reproductive tubers while decreasing the content of reducing sugars by 57 and 11% and promoting a more intensive accumulation of vitamin C (up to 24 and 19%), as well as anthocyanins up to 64 and 67%, as compared to control. The nitrogen content of tubers grown from bacterized minitubers and super elite tubers increased by 15 and 9% as compared to untreated control; phosphorus content, by 42 and 15%; potassium content, by 10 and 7%; copper content, by 13 and 8%; iron content, by 10 and 6%, respectively. The study results indicate that the use of healthy hydroponic minitubers for preplant inoculation provides a more effective yield increase and a significant improvement in the phytonutrient composition of tubers (especially in terms of phosphorus and copper content) as compared to super elite reproductive tubers.

**Keywords:** endophytic bacteria, potato, ascorbic acid, anthocyanins, macronutrients, micronutrients, phosphorus, copper

**Funding.** The Russian Science Foundation (grant no. 23-26-00262; <https://rscf.ru/project/23-26-00262/>) supported the study.

**For citation:** Pusenkova L.I., Lastochkina O.V. Improving the yield and quality of potato tubers through preplant inoculation of healthy hydroponic minitubers with *Bacillus subtilis* endophytic bacteria. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2025;15(1). (In Russian). DOI: 10.21285/achb.963. EDN: DROPGY.

### ВВЕДЕНИЕ

Картофель (*Solanum tuberosum* L., семейство Пасленовые) является одной из основных и наиболее производимых продовольственных культур в мире (после кукурузы, пшеницы и риса)<sup>1</sup>. Клубни картофеля представляют собой ценный источник углеводов, главным образом крахмала, а также высококачественного белка, макро- и микроэлементов и биологически активных веществ [1]. Как наиболее потребляемая культура в мире, картофель служит доступным источником витаминов С, В1, В3, В6, пантотеновой и фолиевой кислот, рибофлавина, минералов, таких как калий, магний, фосфор, железо, а также антиоксидантов (фенольные кислоты, антоцианы, каротиноиды и др.) в питании человека. Крупнейшими производителями картофеля в мире являются Китай, Индия и Россия [1]. Ожидается, что в течение следующих двух десятилетий население Земли будет расти в среднем примерно на 100 млн человек в год<sup>1</sup>.

В связи с этим ключевой задачей считается обеспечение продовольственной безопасности нынешнего и будущих поколений путем повышения урожайности и качества клубней картофеля при одновременном сохранении природных ресурсов<sup>1</sup> [1].

Урожайность и качество клубней картофеля зависят от ряда факторов: сортовых характеристик, качества семенного материала, климатических условий и технологии выращивания. Применение качественного посадочного материала является основным условием высокоходового картофелеводства, обеспечивая 25–30%, а в неблагоприятных условиях 50% прироста урожая, и в значительной мере решает проблемы снижения его потерь [2]. Клональное микроразмножение растений *in vitro* и последующее их выращивание с использованием аэропонных или гидропонных систем позволяет получать семенные миниклубни, свободные от всех видов патогенов. Данные миниклубни затем высаживают на

<sup>1</sup> World food and agriculture – statistical yearbook 2022 // Openknowledge.fao.org. Режим доступа: <https://www.fao.org/3/cc2211en/cc2211en.pdf> (дата обращения: 27.02.2025).

поля для получения основных семян, однако, несмотря на стерильность и отсутствие болезней, они быстро заселяются различными почвенными микробами, в том числе фитопатогенами, то есть возбудителями болезней. Это может негативно сказаться на физиологии растений, урожайности и качестве клубней, а также на их сохранности после сбора урожая. Таким образом, классический метод производства семенных клубней недостаточен для удовлетворения потребностей производителей картофеля, поскольку он вынуждает их год за годом использовать зараженный и испорченный семенной материал. Негативное влияние на рост, развитие и урожайность культуры оказывают различные стрессовые факторы, такие как засуха, высокие температуры, уровень обеспеченности элементами минерального питания, поражение растений вредителями и болезнями вирусной, бактериальной, грибной, этиологии во всех стадиях своего онтогенеза. Без применения средств защиты потери урожая от возбудителей болезней могут достигать 80–90%, причем как во время вегетации, так и в период последующего хранения полученного урожая [3]. Высококачественные семена клубней должны обеспечивать выращивание здоровых и крепких культур в течение всего вегетационного периода, а также во время послеворочного хранения и в ходе получения последующих поколений. В таких случаях эффективным может оказаться заселение изначально стерильных семенных миниклубней полезными эндофитными бактериями, такими как *Bacillus subtilis*, общепризнанными как безопасные микроорганизмы для использования в пищевой промышленности. Стимулирующее рост и защитное действие эндофитных бактерий *B. subtilis* хорошо изучено у различных видов растений в условиях различных биотических и абиотических стрессов. Показано, что предпосадочная обработка клубней микробиологическими препаратами на основе эндофитных бактерий положительно влияет на урожайность картофеля [4–6]. К примеру, эндофиты *Bacillus* sp. X20, *Bacillus thuringiensis* W65 увеличивали урожай клубней и значительно снижали развитие болезней [4, 7]. Большинство исследований было сосредоточено на применении эндофитов с использованием таких методов, как предпосевная инокуляция нестерильных семян или инокуляция вегетирующих растений с помощью опрыскивания, при этом оценка в первую очередь была сосредоточена на росте и общей урожайности. Несмотря на прогресс в этой области, остается много вопросов относительно взаимодействия между эндофитными бактериями и растениями картофеля, а также оптимальных условий их использования, что затрудняет разработку коммерческих продуктов. Несмотря на растущий интерес к применению эндофитов для повышения урожайности и устойчивости растений, практически не изученными остаются вопросы касательно подходящего способа их применения и влияния на показатели качества, фитонутриентный состав и пищевую ценность получаемой продукции.

В связи с вышеизложенным цель проведенного исследования заключалась в сравнительном анализе влияния предпосадочной обработки семенных клубней картофеля, а именно оздоровленных (без патогенов) гидропонных миниклубней и клубней репродукции

суперэлита эндофитной бактерией *B. subtilis* (штамм 10-4) на урожайность клубней и параметры их качества (крахмал, редуцирующие сахара, сухие вещества, макро- и микроэлементы, витамины С, В, антицианы).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили в условиях Предуральской степной зоны Республики Башкортостан (Чишминский район). Объектами исследования служили растения и клубни картофеля сорта Башкирский, выращенные из предобработанных штаммом *B. subtilis* 10-4 (из коллекции Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства Уфимского федерального исследовательского центра РАН, г. Уфа, Россия) оздоровленных гидропонных миниклубней и клубней репродукции суперэлита. Оздоровленные клубни получали путем микроклонального размножения исходных здоровых растений в лабораторных условиях и последующего выращивания регенерантов на гидропонике, что обеспечивает получение большого количества компактных свободных от болезней и вредителей посадочных клубней. Клубни репродукции суперэлита были предоставлены лабораторией картофелеводства Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства Уфимского федерального исследовательского центра РАН. Для закладки полевого опыта оздоровленные гидропонные миниклубни и клубни репродукции суперэлита инокулировали суспензионной культурой *B. subtilis* 10-4 с титром  $10^8$  КОЕ/мл и водой (контроль) методом погружения, далее суспензионная культура сливалась и клубни подсушивались на воздухе при комнатной температуре в течение 2 дней с последующей их высадкой в поле. Почва опытного участка представляла собой чернозем выщелоченный тяжелосуглинистого гранулометрического состава. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы была следующей:  $pH_{KCl}$  – 7,1, содержание гумуса (по Тюрину) – 7,4%, подвижных форм фосфора и калия – 10,7 и 17,9 мг/100 г почвы соответственно. Посадка клубней в предварительно нарезанные гребни была проведена 15 мая. Делянки 70×35 см размещали рандомизированно в четырехкратной повторности. Площадь учетной делянки равнялась 27 м<sup>2</sup>. Уборку проводили в первой декаде сентября сплошным методом, поделяночно.

Эффективность изучаемого эндофитного штамма *B. subtilis* 10-4 оценивали по массе урожая и его товарности. Влияние предобработок растений эндофитом на показатели качества клубней картофеля оценивали через 7 дней после уборки.

Содержание крахмала и общего сухого вещества оценивали по удельному весу клубней картофеля в воздухе и воде [8, 9].

Содержание редуцирующих сахаров определяли спектрофотометрическим методом, основанном на их способности давать окрашенные соединения с 3,5-дinitросалициловой кислотой [8].

Содержание витаминов С и В<sub>1</sub> определяли по методу, основанному на извлечении свободных форм витаминов, разделении, идентификации и определении их массовых долей методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105М» («Люмэксп», Россия). Детектирование аскорбиновой кислоты (витамина С) проводили по собственному поглощению при длине волны 254 нм,

витаминов группы В – при длинах волн 200 и 267 нм (методика ООО «Люмэкс-маркетинг» М 04-72-2011<sup>2</sup>).

Общее содержание антоцианов определяли в перидерме свежесобранных клубней при длине волны 530 нм с помощью УФ-спектрофотометра u-Violet DB (SILab, Китай). Образцы растительных тканей (1 г) экстрагировали кислотно-этанольным растворителем (5 мл) (95% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O / 1,5N HCl (85:15)) в течение 24 ч при температуре 4 °C в темноте. Концентрацию антоцианов выражали в миллиграммах на 100 грамм сырой массы [10].

Суммарное содержание флавоноидов определяли спектрофотометрическим методом, основанном на реакции комплексообразования с алюминием [11].

Содержание макроэлементов (азота, фосфора и калия) оценивали по ГОСТ 13496.4-93<sup>3</sup>, ГОСТ 26657-97<sup>4</sup> и ГОСТ 30504-97<sup>5</sup> соответственно.

Содержание микроэлементов (марганца, меди, цинка, железа и кобальта) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии по ГОСТ Р 56372-2015<sup>6</sup>. Образцы растений (клубни, 1 г) помещали в муфельную печь на 20 ч при температуре 550 °C. Затем полученную золу инкубировали с 0,1 М HNO<sub>3</sub> (50 мл) и фильтровали. Содержание микроэлементов (марганца, меди, цинка, железа и кобальта) в отфильтрованных экстрактах определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра Shimadzu AA-6300 (Shimadzu, Япония) с электротермическим распылителем GFA EX-7. Содержание макро- и микроэлементов выражали в процентах и в миллиграммах на килограмм соответственно.

Все физиолого-биохимические анализы проводились в двух биологических и трех аналитических повторностях. Статистический анализ проводился с использованием компьютерной программы Statistica 6.0 (StatSoft Inc., США). На рисунке и в таблицах показаны средние значения (*M*) и их стандартные отклонения ( $\pm SD$ ) при *p* ≤ 0,05.

Известно, что бактериальные эндофиты способствуют росту растений, синтезируя фитогормоны, включая индол-3 уксусную кислоту (ИУК), цитокинины и гиббереллины, или регулируя уровень эндогенных гормонов в растении [12].

В наших полевых экспериментах предпосадочная обработка миниклубней и клубней репродукции суперэлита эндофитом активизировала ростовые процессы в начальный период вегетации, что способствовало более раннему появлению всходов и наступлению основных фаз онтогенеза растений: всхожесть (на 8 июня 2023 года) в контроле составила 40%, в варианте с

инокуляцией миниклубней – 58%, суперэлита – 49%, что на 43 и 23% соответственно выше, чем в контроле; к 12 июля 2023 года в фазе бутонизации в контроле находилось 58% растений, тогда как в варианте инокуляции миниклубней – 71%, суперэлита – 62%; в фазе цветения в контроле находилось 8,8% растений, в варианте инокуляции миниклубней – 24%, суперэлита – 20%. Это указывает на то, что процессы в обработанных эндофитом вариантах (миниклубни и суперэлита) протекали быстрее и опережали развитие контрольных растений.

Поскольку заселенные эндофитами растения за счет активной колонизации внутренних тканей и последующего благоприятного биохимического и физиологического воздействия на них, как правило, более устойчивы к заболеваниям и дают высокие урожаи [13, 14], нами были изучены параметры продуктивности картофеля при способах предпосевной инокуляции эндофитом *B. subtilis* 10-4 оздоровленных гидропонных миниклубней и клубней репродукции суперэлита. Условия вегетационного периода 2023 года были неблагоприятны для закладки и формирования урожая картофеля. Неустойчивый характер погоды, почвенная засуха и недостаток влаги (36–55% от нормы) в период клубнеобразования сказался на формировании продуктивности растений картофеля. Гидротермический коэффициент вегетационного периода составил 0,56–0,61, что соответствует засушливым условиям. Несмотря на аномально засушливые погодные условия вегетационного периода, растения картофеля из инокулированных эндофитом миниклубней и клубней репродукции суперэлита формировали мощные стебли и хорошо развитую листовую поверхностью до 0,4–0,5 м<sup>2</sup> на куст. Анализ показателей продуктивности обнаружил, что при инокуляции *B. subtilis* 10-4 миниклубней на один куст сформировалось 4,2 шт. клубней, суперэлита – 6,5 шт., что на 35% больше контроля (3,1 и 4,8 шт. соответственно). Продуктивность одного растения из инокулированных эндофитом миниклубней составила 209 г/куст, суперэлита – 253 г/куст, что на 68,5 и 16,7% выше контроля без обработки (124 и 253 г/куст соответственно). При этом в инокулированных эндофитом вариантах сформировалось больше клубней товарного качества по сравнению с контролем как по количеству, так и по массе (табл. 1).

Доминирующим фактором при формировании качественных показателей картофеля, в том числе его антиоксидантных свойств, являются гидротермические условия, складывающиеся в течение вегетационного периода. В литературе имеются сведения о том, что

<sup>2</sup>Методика М 04-72-2011. Определение свободных форм водорастворимых витаминов в премиксах и витаминных смесях // Lumex.ru. Режим доступа: [https://www.lumex.ru/metodics/22ARU03.13.03-1\\_vitamins\\_premixtures.pdf](https://www.lumex.ru/metodics/22ARU03.13.03-1_vitamins_premixtures.pdf) (дата обращения: 27.02.2025).

<sup>3</sup>ГОСТ 13496.4-93. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. М.: Стандартинформ, 2011. 17 с.

<sup>4</sup>ГОСТ 26657-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения содержания фосфора. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 12 с.

<sup>5</sup>ГОСТ 30504-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения содержания калия. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 11 с.

<sup>6</sup>ГОСТ 56372-2015. Комбикорма, концентраты и премиксы. Определение массовой доли железа, марганца, цинка, кобальта, меди, молибдена и селена методом атомно-абсорбционной спектроскопии. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.

**Таблица 1.** Влияние предпосадочной инокуляции семенных клубней – оздоровленных гидропонных миниклубней (I) и клубней репродукции суперэлита (II) – эндофитной бактерией *Bacillus subtilis* 10-4 на продуктивность и структуру урожая картофеля сорта Башкирский

**Table 1.** Effect of pre-planting inoculation of seed tubers – hydroponic healthy minitubers (I) and reproduction of superelite (II) – with endophytic bacterium *Bacillus subtilis* 10-4 on the productivity and crop structure of potato cv. Bashkirski

Вариант обработки	Количество клубней на 1 растение, шт./куст	Масса клубней на 1 растение, г/куст	Количество товарных клубней, шт. /куст	Масса товарных клубней, г/куст
I				
Контроль	3,1±0,4	124,0±17	1,2±0,2	89,0±15
<i>Bacillus subtilis</i> 10-4	4,2±0,4	209,0±20	1,4±0,2	119,0±17
II				
Контроль	4,8±0,3	253,2±14	1,8±0,2	162,8±16
<i>Bacillus subtilis</i> 10-4	6,5±0,5	295,0±25	2,4±0,4	187,5±28

ростстимулирующие бактерии влияют на активность фотосинтеза [15], что, в свою очередь, способствует синтезу и накоплению крахмала – важнейшего показателя качества клубней. В нашем эксперименте предпосадочная обработка эндофитом *B. subtilis* 10-4 не оказала существенного влияния на накопление крахмала и сухого вещества при использовании способа предпосевной инокуляции миниклубней и клубней репродукции суперэлита, вместе с тем отмечена тенденция к повышению антоцианов (табл. 2).

Помимо того, что картофель имеет питательную ценность, он является консолидированным источником функциональных ингредиентов – витаминов группы В, С, Е, а также различных полифенолов и фенольных кислот [16], повышенный интерес к которым проявляется в последние годы ввиду многочисленных доказательств положительной роли антиоксидантов в реакциях, защищающих не только растения, но и человека от окислительного стресса. Важнейшим природным антиоксидантом, содержащимся в картофеле, является витамин С (аскорбиновая кислота). Кроме того, что этот витамин растения синтезируют для своей защиты от различных стрессовых ситуаций, он также выступает важным показателем качества товарной продукции, в частности клубней картофеля [17], поскольку поддерживает иммунную систему человека, играет важную роль в качестве кофактора фермента во многих метаболических функциях. Полифенольные соединения картофеля образуются в растениях в качестве вторичных метаболитов и служат естественным фактором защиты от вредителей и патогенной микрофлоры [18]. Антоцианы предотвращают перекисное окисление липидов

и поддерживают целостность мембран, что замедляет старение клеток и может играть важную роль в улучшении качества овощей после сбора урожая [19]. Поскольку содержание вышеперечисленных вторичных низкомолекулярных антиоксидантов зависит от сорта, условий выращивания, агротехнических мероприятий, изучено влияние предобработки эндофитом *B. subtilis* 10-4 на их накопление в клубнях.

Установлено, что предпосадочная инокуляция миниклубней и клубней репродукции суперэлита эндофитом способствовала более интенсивному накоплению витамина С в урожае клубней до 24 и 19%, а также суммы антоцианов до 64 и 67% соответственно по сравнению с контролем. Кроме того, в клубнях картофеля, выращенных из инокулированных эндофитом семенных клубней репродукции суперэлита, обнаружен витамин В1 в количестве 4,9 мг% (в контроле – 0,75 мг%). Несмотря на то что инокуляция эндофитом не оказала достоверно значимых изменений в содержании фенольных соединений, обращает на себя внимание тот факт, что в клубнях, выращенных из миниклубней (I), количество содержания этих соединений было в 2 раз выше в сравнении с суперэлитой (II) (см. табл. 2).

Стимулирующие рост растений ризобактерии способствуют растворению минеральных фосфатов и других питательных веществ, повышают устойчивость к стрессам, стабилизируют почвенные агрегаты и улучшают структуру почвы и содержание органических веществ, а такжедерживают больше почвенного органического азота и других питательных веществ в системе растение – почва, тем самым снижая потребность в азотных и фосфорных удобрениях [20]. Поскольку к началу нашего

**Таблица 2.** Влияние предпосадочной инокуляции семенных клубней – оздоровленных гидропонных миниклубней (I) и клубней репродукции суперэлита (II) – эндофитной бактерией *Bacillus subtilis* 10-4 на качество клубней

**Table 2.** Effect of pre-planting inoculation of seed tubers – hydroponic healthy minitubers (I) and reproduction of superelite (II) – with endophytic bacterium *Bacillus subtilis* 10-4 on the quality of tubers

Вариант обработки	Сухое вещество, %	Крахмал, %	Редуцирующие сахара, %	Витамины, мг%		Антоцианы, мг%	Сумма фенольных соединений, мг%
				C	B		
I							
Контроль	21,8±0,9	16,2±0,4	0,30±0,02	62,5±0,5	–	2,05±0,07	225,2±15
<i>Bacillus subtilis</i> 10-4	22,7±0,7	16,9±0,4	0,13±0,01	77,4±0,5	–	3,36±0,03	239,4±16
II							
Контроль	21,7±0,9	15,9±0,7	0,46±0,02	58,4±0,9	0,75±0,04	1,98±0,07	119,5±10
<i>Bacillus subtilis</i> 10-4	22,3±0,7	16,5±0,4	0,41±0,01	69,3±0,5	4,9±0,4	3,31±0,03	123,3±9

исследования мы не нашли в доступной литературе информации о влиянии эндофитных бактерий *B. subtilis* на содержание основных макро- и микроэлементов в растениях и клубнях картофеля, выращенных в полевых условиях, научный интерес представляло определение их количества в урожае клубней.

Полученные результаты показывают, что эндофитный штамм *B. subtilis* 10-4 приводил к увеличению содержания макроэлементов (азота, фосфора, калия) как в оздоровленных гидропонных миниклубнях, так и в клубнях репродукции суперэлита при использовании предпосадочного способа инокуляции (рисунок). Так, содержание азота в клубнях, выращенных из инокулированных эндофитом гидропонных миниклубней и клубней репродукции суперэлита, увеличилось на 15 и 9% соответственно по сравнению с контролем.

Обращает на себя внимание в целом низкий уровень содержания фосфора и калия в клубнях, причиной которого, возможно, является закрепление их в почве в необменной форме и переход в недоступное для растений состояние, обусловленное сильным исщущением почвы вследствие продолжительной засухи в период вегетации. Вместе с тем содержание фосфора в клубнях, полученных из инокулированных эндофитом гидропонных миниклубней и клубней репродукции суперэлита, увеличилось на 42 и 15%, калия – на 10 и 7% соответственно по сравнению с контролем.

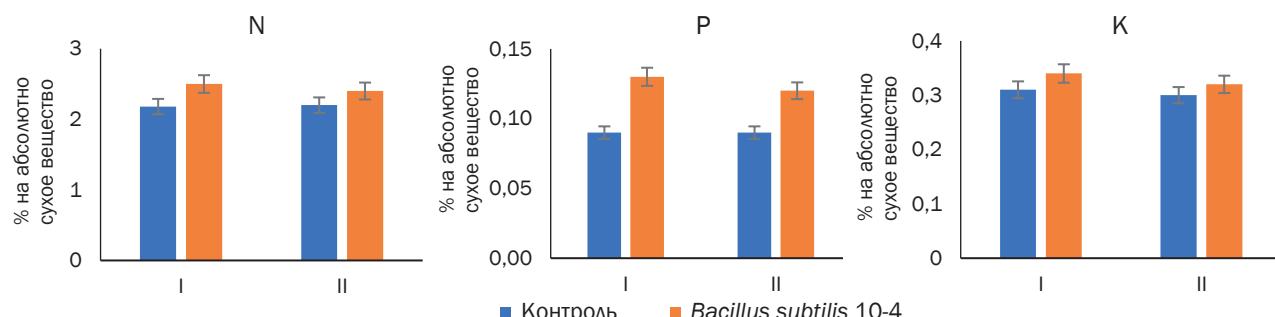
По результатам исследований выявлено, что в клубнях, выращенных из инокулированных миниклубней и клубней

репродукции суперэлита, повышалось содержание микроэлементов: меди – на 13 и 8%, железа – на 10 и 6% соответственно по сравнению с контролем без обработки (табл. 3).

Следует отметить, что характер выявленных изменений в содержании макро- и микроэлементов в клубнях картофеля (см. табл. 2, 3) согласуется с результатами вегетационных экспериментов, проведенных в лаборатории в контролируемых условиях [21]. Вместе с тем уровень накопления изученных фитонутриентов оказался более выраженным в полевых условиях, причем использование способа обработки эндофитом *B. subtilis* 10-4 гидропонных миниклубней было более эффективным в сравнении с клубнями репродукции суперэлита.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Штаммы эндофитных бактерий применяются для инокуляции семян, так как уменьшают влияние биотических и абиотических факторов благодаря активной колонизации внутренних тканей и последующему положительному биохимическому и физиологическому воздействию на растение. Находясь в эндосфере, эндофиты имеют существенное преимущество перед организмами, обитающими в ризосфере и филлосфере, за счет стабильного pH, влажности, потока питательных веществ и отсутствия конкуренции со стороны большого числа микроорганизмов [22]. Для оценки вклада предпосадочной инокуляции оздоровленных гидропонных миниклубней и клубней репродукции суперэлита бактерией *Bacillus subtilis* 10-4



Влияние предпосадочной инокуляции семенных клубней – оздоровленных гидропонных миниклубней (I) и клубней репродукции суперэлита (II) – эндофитной бактерией *Bacillus subtilis* 10-4 на содержание макроэлементов в клубнях картофеля

Effect of pre-planting inoculation of seed tubers – hydroponic healthy minitubers (I) and reproduction of superelite (II) – with endophytic bacterium *Bacillus subtilis* 10-4 on the content of macronutrients in potato tubers

**Таблица 3.** Влияние предпосадочной инокуляции семенных клубней – оздоровленных гидропонных миниклубней (I) и клубней репродукции суперэлита (II) – эндофитной бактерией *Bacillus subtilis* 10-4 на содержание микроэлементов в клубнях картофеля

**Table 3.** Effect of pre-planting inoculation of seed tubers – hydroponic healthy minitubers (I) and reproduction of superelite (II) – with endophytic bacterium *Bacillus subtilis* 10-4 on the content of micronutrients in potato tubers

Вариант обработки	Содержание элемента, мг/кг				
	Марганец	Медь	Цинк	Железо	Кобальт
I					
Контроль	4,32±0,22	1,59±0,09	15,97±0,29	0,48±0,02	0,0201±0,0059
<i>Bacillus subtilis</i> 10-4	4,33±0,18	1,80±0,05	15,16±0,19	0,53±0,01	0,0196±0,0058
II					
Контроль	4,30±0,22	1,58±0,09	15,96±0,29	0,47±0,02	0,0201±0,0059
<i>Bacillus subtilis</i> 10-4	4,13±0,18	1,70±0,05	15,88±0,19	0,50±0,01	0,0181±0,0058

*tilis* 10-4 были оценены морфологические параметры и продуктивность растений, а также качество клубней.

Выявленная способность *B. subtilis* 10-4 усиливать рост надземной части растений, вероятно, связана с продукцией эндофитом ИУК, сидерофоров, фиксацией атмосферного азота [23] и улучшением поступления воды и усвоения питательных веществ растениями из почвы. Имеются сведения об усилении роста за счет увеличения высоты растений и/или биомассы при инокуляции бактериальными эндофитами, способными продуцировать ИУК [24–28]. Следует отметить, что в других исследованиях, проведенных в полевых условиях с применением эндофитных бактерий *Bacillus* sp. X20 и *Bacillus thuringiensis* W65, не было выявлено изменений в продолжительности фенофаз от всходов до цветения, тогда как продолжительность цветения увеличивалась (на 8–13 дней) по сравнению с контролем [7]. Выявленное в нашей работе отсутствие различий в высоте бактеризованных и контрольных растений во второй половине вегетации согласуется с результатами других исследований [7, 29].

Сравнительный анализ показал, что инокуляция *B. subtilis* 10-4 обеспечила закладку большего количества клубней на один куст по сравнению с необработанным контролем на 35% как гидропонных миниклубней, так и клубней репродукции суперэлита, что согласуется с результатами полевых экспериментов, проведенных нами ранее на сорте Удача [5]. Выявлена высокая отзывчивость на инокуляцию оздоровленных гидропонных миниклубней эндофитом: увеличение продуктивности до 68,5% (в варианте суперэлиты – до 16,7%) по сравнению с необработанным контролем, что, очевидно, связано с исходным микробиомом, который в случае клубней репродукции суперэлита, выращенных в почве, включает спектр микроорганизмов, в том числе патогенных. Анализ фракционного состава урожая клубней показал, что в инокулированных *B. subtilis* 10-4 вариантах (миниклубни и клубни репродукции суперэлита) увеличивалась доля товарных клубней по количеству на 17 и 33%, по массе – на 34 и 15% соответственно, что согласуется с данными исследований на других сортах картофеля в различных почвенно-климатических условиях [7, 30].

Положительным аспектом полученных результатов исследований является не только повышение продуктивности бактеризованных растений картофеля в засушливых условиях по сравнению с контролем, но и улучшение качества выращенных клубней.

Предпосадочная обработка гидропонных миниклубней и клубней репродукции суперэлита эндофитом не повлияла на накопление массовой доли сухого вещества и крахмала в клубнях. Вместе с тем содержание редуцирующих сахаров в урожае клубней снижалось на 57 и 11% по сравнению с контролем в вариантах обработки миниклубней и суперэлиты соответственно (см. табл. 2). Это может быть обусловлено тем, что эндофиты, колонизируя внутренние ткани клубней [31, 32], могут питаться сахарами. Наименьшее содержание редуцирующих сахаров (0,13%) обнаружено в клубнях, выращенных из предобработанных оздоровленных гидропонных миниклубней, что определяет их пригодность к промышленной переработке, поскольку низкая массовая доля редуцирующих сахаров в картофеле позволяет предотвратить потемнение конечного продукта и появление

горького привкуса, которые негативно влияют на восприятие потребителем [33].

Механизмы повышения содержания витамина С до 24 и 19% и антоцианов до 64 и 67% при способах инокуляции миниклубней и клубней репродукции суперэлита, возможно, могут включать индуцированное эндофитом улучшение поглощения и усвоения питательных веществ, экспрессию генов, связанных с путями биосинтеза витамина С и антоцианов [34]. Кроме того, *B. subtilis* также может запускать сигнальные пути и активировать специфические ферменты, участвующие в синтезе витамина С и антоцианов [34, 35]. Эти результаты помимо повышения питательной ценности могут также свидетельствовать о повышенной устойчивости колонизированных эндофитом растений к возможным стрессовым ситуациям. Полученные результаты согласуются с данными других исследований [5, 14, 32], а также результатами вегетационных опытов в контролируемых условиях [21]. Необходимо отметить, что эндофиты не оказали существенного влияния на суммарное содержание флавоноидов, однако обращает на себя внимание тот факт, что их концентрация в клубнях первого полевого поколения, выращенных из миниклубней, была в 2 раза выше в сравнении с клубнями репродукции суперэлита, что свидетельствует об их большей антиоксидантной активности, поскольку в литературе широко описана антиоксидантная роль полифенолов [16].

Выявленное в эксперименте увеличение содержания макроэлементов (азота, фосфора, калия) в урожае предобработанных клубней по сравнению с контролем свидетельствует о том, что эндофиты улучшают обмен веществ в растениях, его использование и утилизацию в клубнях картофеля. Вероятно, бактериальные эндофиты выделяют сидерофоры и растворяют фосфор в почве, инициируя симбиотические взаимодействия с растениями-хозяевами [36, 37].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предобработка семенных клубней (особенно гидропонных миниклубней) эндофитным штаммом *B. subtilis* 10-4 приводила к увеличению содержания меди в выращенных клубнях, что, вероятно, связано со способностью эндофита продуцировать метаболиты, ответственные за улучшение биодоступности и усвоения этого вещества. Известно, что макроэлементы, включая медь, играют важную роль в метаболизме обменных процессов растений и человека: растениям они необходимы для функционирования большого количества ферментов, участвующих в фотосинтезе, дыхании, в организме выполняют многие защитные функции. Кроме того, медь способствует образованию лигнина, то есть более быстрому формированию прочной кожуры, выполняющей барьерные функции.

Таким образом, результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что предпосадочная инокуляция семенных клубней – как оздоровленных гидропонных миниклубней, так и клубней репродукции суперэлита – эндофитом *B. subtilis* 10-4 повышает урожайность и качественные показатели клубней, включая питательные вещества (азот, фосфор, калий), такой макроэлемент, как медь, витамин С и антоцианы, а также снижает содержание редуцирующих сахаров без существенного влияния на высоту растений, содержания крахмала и общего сухого вещества в собранных клубнях.

При этом максимальные показатели достигаются при использовании для предпосевной инокуляции эндофитом *B. subtilis* 10-4 оздоровленных гидропонных миниклубней, что может быть эффективным агротехническим приемом, позволяющим дополнительно улучшить продуктивность культуры и проявить полезные свойства микробного биоинокулянта.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Совокупность полученных данных свидетельствует об эффективности использования способа предпосадочной инокуляции (обогащения) семенных клубней картофеля (оздоровленных гидропонных миниклубней

и клубней репродукции суперэлита) эндофитной бактерией *B. subtilis* 10-4 для одновременного повышения урожайности клубней, их потребительских свойств и пищевой ценности путем положительной регуляции накопления фитонутриентов. Вместе с тем наибольшая эффективность достигается при использовании оздоровленных гидропонных миниклубней для предпосадочной инокуляции *B. subtilis* 10-4, что имеет большой потенциал для использования в качестве недорогостоящего и экологичного способа получения улучшенного высококачественного семенного материала и повышенного урожая обогащенных питательными веществами клубней картофеля.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- 1.** Shen C., Sun J.B., Wu J.Z., Zhou X.Y. World potato production, consumption and trade pattern and evolution analysis // Shandong Agricultural Sciences. 2021. Vol. 2. P. 127–132. DOI: 10.14083/j.issn.1001-4942.2021.02.024.
- 2.** Жукова М.И., Середа Г.М., Зубкович О.Н., Кононцкая М.В., Халаева В.И., Иванчук Н.Н. Фитосанитарный аспект испытания сортовых и семенных качеств картофеля // Защита и карантин растений. 2013. N 4. С. 13–18. EDN: PXWXND.
- 3.** Хютти А.В., Кузнецова А.А. Влияние проправителей на комплекс возбудителей болезней картофеля и товарные качества семенного материала // Защита картофеля. 2020. N 1. С. 33–34. EDN: YTGHGK.
- 4.** Chebotar V.K., Zaplatkin A.N., Komarova O.V., Baganova M.E., Chizhevskaya E.P., Polunin N.I., et al. Endophytic bacteria for development of microbiological preparations for increasing productivity and protection of new potato varieties // Research on Crops. 2021. Vol. 22. P. 104–107. DOI: 10.31830/2348-7542.2021.025.
- 5.** Пусенкова Л.И., Гарипова С.Р., Ласточкина О.В., Федорова К.А., Марданшин И.С. Влияние эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* на урожай, качество клубней и послеуборочные болезни картофеля // Агрочимический вестник. 2021. N 5. С. 73–79. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-013. EDN: OJKKLR.
- 6.** Song J., Kong Z.-Q., Zhang D.-D., Chen J.-Y., Dai X.-F., Li R. Rhizosphere microbiomes of potato cultivated under *Bacillus subtilis* treatment influence the quality of potato tubers // International Journal of Molecular Sciences. 2021. Vol. 22. P. 12065. DOI: 10.3390/ijms222112065.
- 7.** Чеботарь В.К., Заплаткин А.Н., Балакина С.В., Гаджиев Н.М., Лебедева В.А., Хютти А.В. [и др.]. Урожайность и поражаемость картофеля ризоктониозом и фитофторозом под влиянием эндофитных бактерий *Bacillus thuringiensis* W65 и *Bacillus amyloliquefaciens* P20 // Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58. N 3. С. 429–446. DOI: 10.15389/agrobiology.2023.3.429rus. EDN: JRKYAE.
- 8.** Vasanthan T., Bergthaller W., Driedger D., Yeung J., Sporus P. Starch from Alberta potatoes: wet-isolation and some physicochemical properties // Food Research International. 1999. Vol. 32. P. 355–365.
- 9.** Widmann N., Goian M., Ianculov I., Dumbravă D., Moldovan C. Method to starch content determination from plants by specific weight // Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies. 2008. Vol. 41, no. 1. P. 814–818.
- 10.** Islam M.Z., Lee Y.-T., Mele M.A., Choi I.-L., Kang H.-M. The effect of phosphorus and root zone temperature on anthocyanin of red romaine lettuce // Agronomy. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 47. DOI: 10.3390/agronomy9020047.
- 11.** Garg D., Shaikh A., Muley A., Marar T. In-vitro antioxidant activity and phytochemical analysis in extracts of *Hibiscus rosa-sinensis* stem and leaves // Free Radical and Antioxidants. 2012. Vol. 2, no. 3. P. 41–46. DOI: 10.5530/ax.2012.3.6.
- 12.** Hardoim P.R., van Overbeek L.S., Berg G., Pirttilä A.M., Compant S., Campisano A., et al. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes // Microbiology and Molecular Biology Reviews. 2015. Vol. 79, no. 3. P. 293–320. DOI: 10.1128/MMBR.00050-14.
- 13.** Уромова И.П., Козлов А.В. Влияние биопрепаратов на продуктивность и качество картофеля // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. N 5. С. 77–81. EDN: HTOGWX.
- 14.** Чеботарь В.К., Щербаков А.В., Щербакова Е.Н., Масленникова С.Н., Заплаткин А.Н., Мальфанова Н.В. Эндофитные бактерии как перспективный биотехнологический ресурс и их разнообразие // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. N 5. С. 648–654. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.648rus. EDN: UXSRMT.
- 15.** Stefan M., Munteanu N., Stoleru V., Mihasan M., Hritcu L. Seed inoculation with lant growth promoting rhizobacteria enhances photosynthesis and yield of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.) // Scientia Horticulturae. 2013. Vol. 151. P. 22–29. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.12.006.
- 16.** Kim J., Soh S.Y., Bae H., Nam S.-Y. Antioxidant and phenolic contents in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and micropaginated potatoes // Applied Biological Chemistry. 2019. Vol. 62. P. 17. DOI: 10.1186/s13765-019-0422-8.
- 17.** Верховцева Н.В., Лукьянова М.В., Кочетков И.М., Кубарев Е.Н. Оценка воздействия препаратов с физиологически активными свойствами на антиоксидантные свойства картофеля *Solanum tuberosum* L. (на примере аскорбиновой кислоты) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. N 2. С. 56–62. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-56-62. EDN: AFALRF.
- 18.** Uluwaduge D.I. Glycoalkaloids, bitter tasting toxicants in potatoes: a review // International Journal of Food Science and Nutrition. 2018. Vol. 3, no. 4. P. 188–193.
- 19.** Jiao Y., Jiang Y., Zhai W., Yang Z. Studies on antioxidant capacity of anthocyanin extract from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) // African Journal of Biotechnology. 2012. Vol. 11, no. 27. P. 7046–7054. DOI: 10.5897/AJB11.3859.

- 20.** Hayat R., Ali S., Amara U., Khalid R., Ahmed I. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review // Annals of Microbiology. 2010. Vol. 60. P. 579–598 DOI: 10.1007/s13213-010-0117-1.
- 21.** Pusenkova L., Lastochkina O., Erci̇sl̄i S. The potential of hydroponic seed minituber enrichment with the endophyte *Bacillus subtilis* for improving the yield components and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) // Agriculture. 2023. Vol. 13, no. 8. P. 1626. DOI: 10.3390/agriculture13081626.
- 22.** Compant S., Duffy B., Nowak J., Clément C., Barka E.A. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects // Applied and Environmental Microbiology. 2005. Vol. 71, no. 9. P. 4951–4959 DOI: 10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005.
- 23.** Lastochkina O., Aliniaiefard S., Garshina D., Garipova S., Pusenkova L., Allagulova Ch., et al. Seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* strain-specifically improves growth of *Phaseolus vulgaris* plants under normal and salinity conditions and exerts anti-stress effect through induced lignin deposition in roots and decreased oxidative and osmotic damages // Journal of Plant Physiology. 2021. Vol. 263. P. 153462. DOI: 10.1016/j.jplph.2021.153462.
- 24.** Shi Y., Lou K., Li C. Promotion of plant growth by phytohormone-producing endophytic microbes of sugar beet // Biology and Fertility of Soils. 2009. Vol. 45. P. 645–653. DOI: 10.1007/s00374-009-0376-9.
- 25.** Xin G., Zhang G., Kang J.W., Staley J.T., Doty S.L. A diazotrophic, indole-3-acetic acid-producing endophyte from wild cottonwood // Biology and Fertility of Soils. 2009. Vol. 45. P. 669–674. DOI: 10.1007/s00374-009-0377-8.
- 26.** Khan Z., Rho H., Firrincieli A., Hung S.H., Luna V., Masciarelli O., et al. Growth enhancement and drought tolerance of hybrid poplar upon inoculation with endophyte consortia // Current Plant Biology. 2016. Vol. 6. P. 38–47. DOI: 10.1016/j.cpb.2016.08.001.
- 27.** Santoyo G., Moreno-Hagelsieb G., del Carmen Orozco-Mosqueda M., Glick B.R. Plant growth-promoting bacterial endophytes // Microbiological Research. 2016. Vol. 183. P. 92–99. DOI: 10.1016/j.micres.2015.11.008.
- 28.** Barra P.J., Inostroza N.G., Acuña J.J., Mora M.L., Crowley D.E., Jorquera M.A. Formulation of bacterial consortia from avocado (*Persea americana* Mill.) and their effect on growth, biomass and superoxide dismutase activity of wheat seedlings under salt stress // Applied Soil Ecology. 2016. Vol. 102. P. 80–91. DOI: 10.1016/j.apsoil.2016.02.014.
- 29.** Деревягина М.К., Васильева С.В., Зейрук В.Н., Белов Г.А. Биологическая и химическая защита картофеля от болезней // Агрономический вестник. 2018. N 5. С. 65–68. DOI: 10.24411/0235-2516-2018-10049. EDN: YJBFRZ.
- 30.** Новикова И.И., Титова Ю.А., Бойкова И.В., Зейрук В.Н., Краснобаева И.Л. Биологическая эффективность новых биопрепаратов на основе микробов-антагонистов для контроля возбудителей болезней картофеля при вегетации и хранении клубней // Биотехнология. 2017. Т. 33. N 6. С. 68–76. DOI: 10.21519/0234-2758-2017-33-6-68-76. EDN: YMVEAK.
- 31.** Lastochkina O., Pusenkova L., Garshina D., Yuldashev R., Shpirnaya I., Kasnak C., et al. The effect of endophytic bacteria *Bacillus subtilis* and salicylic acid on some resistance and quality traits of stored *Solanum tuberosum* L. tubers infected with Fusarium dry rot // Plants. 2020. Vol. 9, no. 6. P. 738. DOI: 10.3390/plants9060738.
- 32.** Lastochkina O., Pusenkova L., Garshina D., Kasnak C., Palamutoglu R., Shpirnaya I., et al. Improving the biocontrol potential of endophytic bacteria *Bacillus subtilis* with salicylic acid against *Phytophthora infestans*-caused postharvest potato tuber late blight and impact on stored tubers quality // Horticulturae. 2022. Vol. 8. P. 117. DOI: 10.3390/horticulturae8020117.
- 33.** Пшеченков К.А., Мальцев С.В. Оценка сортов картофеля селекции ВНИИКХ на пригодность к промпереработке // Защита картофеля. 2011. N 1. С. 38–40. EDN: VEPATZ.
- 34.** Поливанова О.Б., Гинс Е.М. Антиоксидантная активность пигментированного картофеля (*Solanum tuberosum* L.), содержание антоцианов, их биосинтез и физиологическая роль // Овощи России. 2019. N 6. С. 84–90. DOI: 10.18619/2072-9146-2019-6-84-90. EDN: ITVJJO.
- 35.** Guo J., Han W., Wang M.-H. Ultraviolet and environmental stresses involved in the induction and regulation of anthocyanin biosynthesis: a review // African Journal of Biotechnology. 2008. Vol. 7. P. 4966–4972.
- 36.** Gamalero E., Glick B.R. Mechanisms used by plant growth-promoting bacteria // Bacteria in agrobiology. Plant nutrient management / ed. D.K.K. Maheshwari. Berlin: Springer, 2011. P. 17–46. DOI: 10.1007/978-3-642-21061-7\_2.
- 37.** Ahmed E., Holmström S.J.M. Siderophores in environmental research: roles and applications // Microbial Biotechnology. 2014. Vol. 7, no. 3. P. 196–208. DOI: 10.1111/1751-7915.12117.

## REFERENCES

- 1.** Shen C., Sun J.B., Wu J.Z., Zhou X.Y. World potato production, consumption and trade pattern and evolution analysis. *Shandong Agricultural Sciences*. 2021;2:127-132. (In Chinese). DOI: 10.14083/j.issn.1001-4942.2021.02.024.
- 2.** Zhukova M.I., Sereda G.M., Zubkevich O.N., Konopatskaya M.V., Khalaeva V.I., Ivanchuk N.N. Phytosanitary aspect of testing varietal and seed qualities of potatoes. *Zashchita i karantin rastenii*. 2013;4:13-18. (In Russian). EDN: PXWXND.
- 3.** Khyutti A.V., Kuznetsov A.A. Effect of seed dressers on the complex of pathogens of potato diseases and commercial qualities of seed material. *Zashchita kartofelya*. 2020;1:33-34. (In Russian). EDN: YTBJHGK.
- 4.** Chebotar V.K., Zaplatkin A.N., Komarova O.V., Baganova M.E., Chizhevskaya E.P., Polunin N.I., et al. Endophytic bacteria for development of microbiological preparations for increasing productivity and protection of new potato varieties. *Research on Crops*. 2021;22:104-107. DOI: 10.31830/2348-7542.2021.025.
- 5.** Pusenkova L.I., Garipova S.R., Lastochkina O.V., Fedorova K.A., Mardanshin I.S. Influence of endophytic bacteria *Bacillus subtilis* on harvest, quality of tubes and post-harvest diseases of potato. *Agrochemical Herald*. 2021;5:73-79. (In Russian). DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-013. EDN: OJKKLR.
- 6.** Song J., Kong Z.-Q., Zhang D.-D., Chen J.-Y., Dai X.-F., Li R. Rhizosphere microbiomes of potato cultivated under *Bacillus subtilis* treatment influence the quality of potato tubers. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22:12065. DOI: 10.3390/ijms222112065.
- 7.** Chebotar V.K., Zaplatkin A.N., Balakina S.V., Gadzhiev N.M., Lebedeva V.A., Khiutti A.V., et al. The effect

of endophytic bacteria *Bacillus thuringiensis* W65 and *B. amyloliquefaciens* P20 on the yield and the incidence of potato rhizoctoniosis and late blight. *Agricultural Biology.* 2023;58(3):429-446. (In Russian). DOI: 10.15389/agrobiology.2023.3.429rus. EDN: JRKYAE.

**8.** Vasanthan T., Berghaller W., Driedger D., Yeung J., Sporus P. Starch from Alberta potatoes: wet-isolation and some physicochemical properties. *Food Research International.* 1999;32:355-365.

**9.** Widmann N., Goian M., Ianculov I., Dumbravă D., Moldovan C. Method to starch content determination from plants by specific weight. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies.* 2008;41(1):814-818.

**10.** Islam M.Z., Lee Y.-T., Mele M.A., Choi I.-L., Kang H.-M. The effect of phosphorus and root zone temperature on anthocyanin of red romaine lettuce. *Agronomy.* 2019;9(2):47. DOI: 10.3390/agronomy9020047.

**11.** Garg D., Shaikh A., Muley A., Marar T. In-vitro antioxidant activity and phytochemical analysis in extracts of *Hibiscus rosa-sinensis* stem and leaves. *Free Radical and Antioxidants.* 2012;2(3):41-46. DOI: 10.5530/ax.2012.3.6.

**12.** Hardoim P.R., van Overbeek L.S., Berg G., Pirttilä A.M., Compant S., Campisano A., et al. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews.* 2015;79(3):293-320. DOI: 10.1128/MMBR.00050-14.

**13.** Uromova I.P., Kozlov A.V. Effect of biopreparations on productivity and quality of potatoes. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii.* 2020;5:77-81. (In Russian). EDN: HTOGWX.

**14.** Chebotar' V.K., Shcherbakov A.V., Shcherbakova E.N., Maslennikova S.N., Zaplatkin A.N., Mal'fanova N.V. Biodiversity of endophytic bacteria as a promising biotechnological resource. *Agricultural Biology.* 2015;50(5):648-654. (In Russian). DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.648rus. EDN: UXSRMT.

**15.** Stefan M., Munteanu N., Stoleru V., Mihasan M., Hritcu L. Seed inoculation with lant growth promoting rhizobacteria enhances photosynthesis and yield of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). *Scientia Horticulturae.* 2013;151:22-29. DOI: 10.1016/j.scientia.2012.12.006.

**16.** Kim J., Soh S.Y., Bae H., Nam S.-Y. Antioxidant and phenolic contents in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and micropropagated potatoes. *Applied Biological Chemistry.* 2019;62:17. DOI: 10.1186/s13765-019-0422-8.

**17.** Verkhovtseva N.V., Lukyanova M.V., Kochetkov I.M., Kubarev E.N. Evaluation of the effect of drugs with physiologically active properties on the antioxidant properties of potato *Solanum tuberosum* L. (using ascorbic acid as an example). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie.* 2023;2:56-62. (In Russian). DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-56-62. EDN: AFALRF.

**18.** Uluwaduge D.I. Glycoalkaloids, bitter tasting toxicants in potatoes: a review. *International Journal of Food Science and Nutrition.* 2018;3(4):188-193.

**19.** Jiao Y., Jiang Y., Zhai W., Yang Z. Studies on antioxidant capacity of anthocyanin extract from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *African Journal of Biotechnology.* 2012;11(27):7046-7054. DOI: 10.5897/AJB11.3859.

**20.** Hayat R., Ali S., Amara U., Khalid R., Ahmed I. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology.* 2010;60:579-598 DOI: 10.1007/s13213-010-0117-1.

**21.** Pusenkova L., Lastochkina O., Ercișli S. The potential of hydroponic seed minituber enrichment with the endophyte *Bacillus subtilis* for improving the yield components and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agriculture.* 2023;13(8):1626. DOI: 10.3390/agriculture13081626.

**22.** Compant S., Duffy B., Nowak J., Clément C., Barka E.A. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology.* 2005;71(9):4951-4959 DOI: 10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005.

**23.** Lastochkina O., Aliniaiefard S., Garshina D., Garipova S., Pusenkova L., Allagulova Ch., et al. Seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* strain-specifically improves growth of *Phaseolus vulgaris* plants under normal and salinity conditions and exerts anti-stress effect through induced lignin deposition in roots and decreased oxidative and osmotic damages. *Journal of Plant Physiology.* 2021;263:153462. DOI: 10.1016/j.jplph.2021.153462.

**24.** Shi Y., Lou K., Li C. Promotion of plant growth by phytohormone-producing endophytic microbes of sugar beet. *Biology and Fertility of Soils.* 2009;45:645-653. DOI: 10.1007/s00374-009-0376-9.

**25.** Xin G., Zhang G., Kang J.W., Staley J.T., Doty S.L. A diazotrophic, indole-3-acetic acid-producing endophyte from wild cottonwood. *Biology and Fertility of Soils.* 2009;45:669-674. DOI: 10.1007/s00374-009-0377-8.

**26.** Khan Z., Rho H., Firrincieli A., Hung S.H., Luna V., Masciarelli O., et al. Growth enhancement and drought tolerance of hybrid poplar upon inoculation with endophyte consortia. *Current Plant Biology.* 2016;6:38-47. DOI: 10.1016/j.cpb.2016.08.001.

**27.** Santoyo G., Moreno-Hagelsieb G., del Carmen Orozco-Mosqueda M., Glick B.R. Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research.* 2016;183:92-99. DOI: 10.1016/j.micres.2015.11.008.

**28.** Barra P.J., Inostroza N.G., Acuña J.J., Mora M.L., Crowley D.E., Jorquera M.A. Formulation of bacterial consortia from avocado (*Persea americana* Mill.) and their effect on growth, biomass and superoxide dismutase activity of wheat seedlings under salt stress. *Applied Soil Ecology.* 2016;102:80-91. DOI: 10.1016/j.apsoil.2016.02.014.

**29.** Derevyagina M.K., Vasil'yeva S.V., Zeyruk V.N., Belov G.L. Biological and chemical protection of potato from diseases. *Agrochemical Herald.* 2018;5:65-68. (In Russian). DOI: 10.24411/0235-2516-2018-10049. EDN: YJBFRZ.

**30.** Novikova I.I., Titova Yu.A., Boikova I.V., Zeiruk V.N., Krasnobayeva I.L. Biological efficiency of new biopreparations based on antagonistic microbes in control of potato pathogens during plant vegetation and tuber storage. *Biotehnologiya.* 2017;33(6):68-76. (In Russian). DOI: 10.21519/0234-2758-2017-33-6-68-76. EDN: YMVEAK.

**31.** Lastochkina O., Pusenkova L., Garshina D., Yuldashev R., Shpirnaya I., Kasnak C., et al. The effect of endophytic bacteria *Bacillus subtilis* and salicylic acid on some resistance and quality traits of stored *Solanum tuberosum* L. tubers infected with Fusarium dry rot. *Plants.* 2020;9(6):738. DOI: 10.3390/plants9060738.

**32.** Lastochkina O., Pusenkova L., Garshina D., Kasnak C., Palamutoglu R., Shpirnaya I., Mardanshin I., Maksimov I. Improving the biocontrol potential of endophytic bacteria *Bacillus subtilis* with salicylic acid against *Phytophthora infestans*-caused postharvest potato tuber

late blight and impact on stored tubers quality. *Horticulturae*. 2022;8:117. DOI: 10.3390/horticulturae8020117.

**33.** Pshechenkov K.A., Mal'tsev S.V. Evaluation of potato varieties bred by VNIIKH for suitability for industrial processing. *Zashchita kartofelya*. 2011;1:38-40. (In Russian). EDN: VEPATZ.

**34.** Polivanova O.B., Gins E.M. Antioxidant activity of potatoes (*Solanum tuberosum L.*) and anthocyanin content, its biosynthesis and physiological role. *Vegetable crops of Russia*. 2019;6:84-90. (In Russian). DOI: 10.18619/2072-9146-2019-6-84-90. EDN: ITVJJO.

**35.** Guo J., Han W., Wang M.-H. Ultraviolet and environmental stresses involved in the induction and regulation of anthocyanin biosynthesis: a review. *African Journal of Biotechnology*. 2008;7:4966-4972.

**36.** Gamalero E., Glick B.R. Mechanisms used by plant growth-promoting bacteria. In: Maheshwari D.K.K. (ed.). *Bacteria in agrobiology. Plant nutrient management*. Berlin: Springer; 2011, p. 17-46. DOI: 10.1007/978-3-642-21061-7\_2.

**37.** Ahmed E., Holmström S.J.M. Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microbial Biotechnology*. 2014;7(3):196-208. DOI: 10.1111/1751-7915.12117.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пусенкова Людмила Ивановна,**  
к.с.-х.н., ведущий научный сотрудник,  
Башкирский научно-исследовательский  
институт сельского хозяйства – обособленное  
структурное подразделение Уфимского  
федерального исследовательского центра РАН,  
450059, г. Уфа, ул. Рихарда Зорге, 19,  
Российская Федерация,  
✉ L.Pusenkova@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6341-0486>

**Ласточкина Оксана Владимировна,**  
к.б.н., старший научный сотрудник,  
Институт биохимии и генетики – обособленное  
структурное подразделение Уфимского  
федерального исследовательского центра РАН,  
450054, г. Уфа, Проспект Октября, 71,  
Российская Федерация,  
oksanaibg@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-3398-1493>

### Вклад авторов

Л.И. Пусенкова – разработка концепции, разработка методологии, получение финансирования, научное руководство, проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.  
О.В. Ласточкина – разработка концепции, разработка методологии, проведение исследования, формальный анализ, визуализация, редактирование рукописи.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 05.08.2024.  
Одобрена после рецензирования 26.09.2024.  
Принята к публикации 28.02.2025.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ludmila Pusenkova,**  
Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher,  
Bashkir Research Institute of Agriculture,  
Ufa Federal Research Centre RAS,  
9, Rikhard Zorge St., Ufa, 450059,  
Russian Federation,  
✉ L.Pusenkova@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6341-0486>

**Oksana Lastochkina,**  
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,  
Institute of Biochemistry and Genetics,  
Ufa Federal Research Centre RAS,  
71, Oktyabrya Ave., Ufa, 450054,  
Russian Federation,  
oksanaibg@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-3398-1493>

### Contribution of the authors

Liudmila I. Pusenkova – conceptualization, methodology, funding acquisition, supervision, investigation, formal analysis, validation, visualization, writing – original draft.  
Oksana V. Lastochkina – conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, visualization, writing – editing.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

### Information about the article

The article was submitted 05.08.2024.  
Approved after reviewing 26.09.2024.  
Accepted for publication 28.02.2025.