

Эффективность эндофитных бактерий на картофеле в контрастных по тепло- и влагообеспеченности вегетационных периодах в лесостепной зоне Республики Башкортостан

Л. И. ПУСЕНКОВА¹, О. В. ЛАСТОЧКИНА²

¹Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, ул. Р. Зорге, 19, Уфа, 450059, Российская Федерация

²Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, просп. Октября, 71, Уфа, 450054, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью оценки влияния метеорологических условий вегетационных периодов на эффективность препаратов эндофитных *Bacillus subtilis* (Bs) при возделывании картофеля в лесостепной зоне Республики Башкортостан в 2023–2024 гг. Схема опыта включала следующие варианты: контроль без обработки, предпосадочная обработка клубней и опрыскивание растений в фазе бутонизации Bs 10-4 и 26Д (10^8 клеток/мл). В 2023 г. погода была засушливой, гидротермический коэффициент (ГТК) составил 0,56...0,61, в 2024 г. – более благоприятной (ГТК 0,85...1,55). Интродукция эндофитных бактерий рода *Bacillus* spp. привела к устойчивому снижению распространенности и развития болезней листового аппарата и клубней картофеля, эффект которого проявился вне зависимости от гидротермических условий вегетационного периода. В частности, в годы с благоприятным увлажнением наблюдали увеличение урожайности до 25 %, а в условиях засухи прибавка достигала 16 %. Отмечали снижение интенсивности развития альтернариоза (в 2023 г. в 1,5...1,8 раза), фитофтороза (в 2024 г. в 2,5...3,0 раза), серебристой парши (в 2023 и 2024 гг. в 3,5 и 1,5 раза соответственно) и сухой гнили (в 2023 г. в 4,8 раза, в 2024 г. – в 1,1 раза), а также доли фитопатогенных видов грибов в микробиоме клубней (в 2023 г. – на 5 %, в 2024 г. – на 9 %), по сравнению с контролем. В засуху при обработке Bs 26Д и Bs 10-4 содержание редуцирующих сахаров в клубнях было меньше, чем без их использования, соответственно на 34,8 и 71,7 %, одновременно концентрация азота выше на 20,6 и 14,7 %, фосфора – на 40,8 и 41,9 %, калия – на 19,4 и 9,6 %, антоцианов – на 33,8 и 67,1 %. Применение Bs 10-4 увеличивало синтез витамина С до 72,3 мг % (контроль 58,4 мг %).

Ключевые слова: картофель (*Solanum tuberosum* L.), эндофитные бактерии, продуктивность, болезни, грибной микробиом, засуха, влагообеспеченность.

Сведения об авторах: Л. И. Пусенкова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: bniish@rambler.ru); О. В. Ласточкина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Для цитирования: Пусенкова Л. И., Ласточкина О. В. Эффективность эндофитных бактерий на картофеле в контрастных по тепло- и влагообеспеченности вегетационных периодах в лесостепной зоне Республики Башкортостан // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39. № 5. С. 43–49. doi: 10.53859/02352451_2025_39_5_43

Efficiency of endophytic bacteria on potatoes in contrasting heat and moisture supply vegetation periods in the forest-steppe zone of the Republic of Bashkortostan

L. I. Pusenкова¹, O. V. Lastochkina²

¹Bashkiria Research Agricultural Institute, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, ul. R. Zorge, 19, Ufa, 450059, Russian Federation

²Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, prosp. Oktjabrja, 71, Ufa, 450054, Russian Federation

Abstract. The studies aimed to assess the impact of meteorological conditions of the growing seasons on the efficiency of endophytic *Bacillus subtilis* (Bs) preparations in potato cultivation in the forest-steppe zone of the Republic of Bashkortostan in 2023–2024. The experimental design included the following options: control without treatment, pre-planting treatment of tubers, and spraying plants in the budding phase with Bs 10-4 and 26D (10^8 cells/ml). In 2023, the weather was dry, the hydrothermal coefficient (HTC) was 0.56–0.61, while in 2024 it was more favourable (HTC 0.85–1.55). The introduction of endophytic bacteria of the genus *Bacillus* spp. led to a steady decrease in the prevalence and development of potato foliar and tuber diseases, the effect of which was manifested regardless of the hydrothermal conditions of the growing season. In particular, in years with favourable moisture, an increase in yield of up to 25% was observed, and in drought conditions, the increase reached 16%. A decrease in the intensity of development of early blight (in 2023 by 1.5–1.8 times), late blight (in 2024 by 2.5–3.0 times), silver scab (in 2023 and 2024 by 3.5 and 1.5 times, respectively) and dry rot (in 2023 by 4.8 times, in 2024 – by 1.1 times), as well as the proportion of phytopathogenic fungal species in the mycobiome of tubers (in 2023 – by 5%, in 2024 – by 9%) was observed, compared to the control. During drought, when treated with Bs 26D and Bs 10-4, the content of reducing sugars in tubers was lower than without their use, respectively, by 34.8 and 71.7%, while the nitrogen concentration was higher by 20.6 and 14.7%, phosphorus – by 40.8 and 41.9%, potassium – by 19.4 and 9.6%, anthocyanins – by 33.8 and 67.1%. The use of Bs 10-4 increased the synthesis of vitamin C to 72.3 mg% (control 58.4 mg%).

Keywords: potato (*Solanum tuberosum* L.); endophytic bacteria; productivity; diseases; fungal microbiome; drought; moisture supply.

Author Details: L. I. Pusenкова, Cand. Sc. (Agr.), leading research fellow (e-mail: bniish@rambler.ru); O. V. Lastochkina, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow.

For citation: Pusenкова LI, Lastochkina OV. [Efficiency of endophytic bacteria on potatoes in contrasting heat and moisture supply vegetation periods in the forest-steppe zone of the Republic of Bashkortostan]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2025;39(5):43–9. Russian. doi: 10.53859/02352451_2025_39_5_43

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – ключевая сельскохозяйственная культура, обеспечивающая продовольственную безопасность для значительной части населения планеты [1]. Клубни картофеля богаты крахмалом, высококачественным белком, пищевыми волокнами, витаминами (В₁, В₆, В₉, С и Е), минералами (натрий, магний, калий, цинк, железо и медь), различными

биологически активными соединениями (каротиноидами, антоцианами, фенолами и флавоноидами), которые приносят значительную пользу для здоровья [1]. Помимо пищевого использования, картофель находит применение в производстве кормов, спирта, биотоплива, а картофельный крахмал широко используют в пищевой, бумажной, косметической, текстильной и других отраслях [2].

Выращивание картофеля сопряжено с воздействием абиотических (дефицит питательных веществ, экстремальные температуры, засуха, засоление, наводнения) и биотических (болезни, вредители) стрессоров, а также с послеуборочными проблемами (ферментативное потемнение, накопление редуцирующих сахаров) [3], что приводит к снижению продуктивности и ухудшению качества клубней [4]. Водный стресс оказывает особенно сильное негативное влияние на картофель, превосходящее по интенсивности воздействие на другие культуры [5]. Засуха вызывает не только снижение урожайности, но и ухудшение качественных показателей клубней (растрескивание, полая сердцевина, внутренние коричневые пятна, вторичный рост), повышает содержание гликоалкалоидов и стимулирует превращение крахмала в редуцирующие сахара [6].

Одним из перспективных подходов к повышению устойчивости картофеля к стрессовым факторам считают использование взаимодействий между растениями и микроорганизмами [7]. Микроорганизмы снижают негативное воздействие стрессов, усиливая метаболическую активность растений посредством различных механизмов, таких как фиксация азота, растворение фосфатов, связывание железа и синтез растительных гормонов [8].

Бактеризация растений полезной микрофлорой – экологически безопасный метод, перспективный для применения в картофелеводстве [9]. Так, обработки почвы и растений эндофитами (4 штамма) *Bacillus subtilis* в полевых условиях снижали заболеваемость фитофторозом картофеля сорта Кафри Джоти [10]. При инокуляции растений картофеля сортов Чароит и Гусар эндофитными бактериями *B. amyloliquefaciens* P20 и *B. thuringiensis* W65 урожайность клубней увеличилась на 7,9...14,6 %. Биологическая эффективность *B. amyloliquefaciens* P20 в защите от фитофтороза на сорте Чароит составила 42,8 %, при отсутствии достоверно значимого влияния на развитие ризоктониоза [11]. Применение препарата на основе *B. atrophaeus* ВКПМ В-11474 методом предпосадочного опрыскивания дна борозды и двукратного пролива под корень по вегетации способствовало снижению заболеваемости картофеля сорта Рэд Скарлет альтернариозом на 51,8 % и повышению урожайности на 19,8 % в условиях аридного климата Астраханской области [12].

В то же время эффективность биопрепаратов во многом определяют метеорологические условия, а разные генотипы картофеля по-разному реагируют на комбинированный стресс, что обуславливает необходимость подбора бактерий для конкретных растений и условий среды [13]. Взаимодействие эндофитных бактерий с картофелем, влияние гидротермических условий на микробиом и нутриентный состав клубней остаются недостаточно изученными.

Цель исследования – оценка влияния метеорологических условий вегетационных периодов на эффективность микробиологических препаратов на основе эндофитных *Bacillus subtilis* при возделывании картофеля в лесостепной зоне Республики Башкортостан для оптимизации агротехнологий при меняющемся климате.

Условия, материалы и методы. Работу проводили в 2023–2024 гг. в лесостепной зоне Республики Башкортостан (пос. Чишмы) на растениях картофеля (*Solanum tuberosum* L.) раннеспелого сорта Башкирский (репродукция суперэлита), включенного в Государственный реестр по Уральскому региону.

Микробиологическими объектами исследования служили эндофитные бактерии *Bacillus subtilis*: штаммы

10-4 (из коллекции Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства, регистрационный номер ВКПМ В-12988) и 26Д (эталонный штамм – регистрационный номер ВКПМ 016-02-2491-1, основа препарата биофунгицидного действия Фитоспорин-М, БашИнком). Концентрация суспензии (10^8 клеток/мл) соответствовала рекомендациям по применению препарата Фитоспорин-М (жидкость) для предпосадочной обработки клубней картофеля – 0,8...1,0 л/т (Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории РФ; <https://www.pesticidy.ru/pesticide/fitosporin-m>).

Эндофитность штаммов *B. subtilis* 10-4 и 26Д для картофеля (колонизация внутренних тканей клубней и проростков при предпосадочной инокуляции) была подтверждена ранее [14].

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистого механического состава. Содержание гумуса в пахотном слое (по Тюрину) – 7,4 %, рН_{KCl} (ГОСТ 26483) – 7,12, подвижного калия и фосфора (ГОСТ 26205-91) – 179,4 и 107 мг/кг почвы соответственно.

Технология подготовки почвы включала вспашку на глубину 22...24 см (октябрь, агрегаты МТЗ 102.2 с плугом ПЛН-4-35), культивацию на глубину 15...17 см и нарезку гребней (май, агрегаты МТЗ 102.2 с культиватором КПС-4 и МТЗ 82.2 с культиватором-гребнеобразователем КГО-3), а также внесение минерального удобрения NPK 16:16:16 (100 кг/га, МТЗ 82.2 с разбрасывателем РДУ-1,5). Подготовленные клубни высаживали в предварительно нарезанные гребни 15 мая (2023 г.) и 24 мая (2024 г.). Закладку полевых опытов, учеты и наблюдения осуществляли согласно (Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 4. Картофель, овощные и бахчевые культуры / разраб. Д. Д. Брежнев, В. А. Бакулина, Н. К. Давидишвили. М.: Колос, 1975. 182 с.).

Схема опытов предусматривала предпосадочную обработку семенных клубней картофеля путем погружения на 30 минут в суспензию штаммов *Bs* 10-4 или 26Д (оба – 10^8 КОЕ/мл) с последующей сушкой на воздухе в течение двух дней, а также опрыскивание растений в фазе бутонизации той же суспензией (расход препарата – 2 л/га, рабочего раствора – 200 л/га); в контрольном варианте обработку не проводили. Общая площадь делянки – 30 м², учетная площадь – 15 м², повторность – четырехкратная.

Уход за посевами включал междурядную обработку (довсходовую, послеуборочную) и окучивание перед смыканием рядков (агрегаты МТЗ 82.2 с культиватором-гребнеобразователем КГО-3). Средства защиты растений не применяли. Численность колорадского жука в период проведения исследований была незначительной. Урожай учитывали сплошным методом, поделочно.

Агрометеорологические условия вегетационных периодов значительно различались. В 2023 г. гидротермический коэффициент (ГТК) составил 0,56...0,61, что соответствует засушливым условиям. Май характеризовался температурой воздуха ниже нормы на 2...6 °С и дефицитом осадков (56 % от нормы). В первой декаде июня наблюдали высокие температуры (до +40 °С) на фоне ураганных ветров и дефицита осадков, что привело к неравномерным всходам. В июле отмечали почвенную засуху и недостаток влаги (36...55 % от нормы), что способствовало раннему увяданию ботвы (10 августа).

В 2024 г. погодные условия были более благоприятны (ГТК 0,85...1,55), однако посадку осложняли низкие температуры (ниже нормы на 4...6 °С, вплоть до заморозков)

и осадки в виде дождя и снега. В третьей декаде мая отмечали дефицит осадков (29 % от нормы). Июнь характеризовался превышением нормы по температуре на 2,3 °C и осадкам на 154 %, третья декада была холодной и дождливой (температура ниже нормы на 3 °C, осадки 282 % от нормы). В июле наблюдали неустойчивый характер погоды с обильными ливневыми дождями (300 % от нормы), что привело к переувлажнению почвы. В августе средняя температура была близка к норме, а количество осадков превышало норму на 186 %, однако в третьей декаде отмечали дефицит осадков и повышение температуры почвы, что способствовало раннему увяданию ботвы.

Таким образом, оба вегетационных периода характеризовались экстремальными условиями, при которых растения подвергались воздействию различных стрессовых факторов.

Оценку эффективности эндофитных бактерий проводили на основе учета массы урожая клубней и их товарности, а также распространенности болезней на растениях и клубнях (ГОСТ 33996-2016). Развитие болезней у вегетирующих растений и фитопатологический анализ клубней оценивали визуально по 5-балльной шкале (0 – отсутствие симптомов, 1 – поражение 1...25 % площади, 2 – 26...50 %, 3 – 51...75 %, 4 – более 75 %, 5 – 100 %).

Метагеномный анализ грибного микробиома выполняли с использованием ITS-региона на приборе MiSeq Illumina (США) по методике, охарактеризованной ранее [15]. Массовую долю крахмала определяли при помощи весов Парова (ГОСТ 7194-81), сухого вещества – высушиванием навески до постоянной массы при 105 °C (ГОСТ 31640-2012), витамина С – согласно методике, разработанной и аттестованной ООО «Люмэкс-маркетинг» («Методика измерений массовой доли аскорбиновой кислоты и ее солей методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель» М 04-86-2016), редуцирующих сахаров – с помощью реактива Самнера, антоцианов – спектрофотометрическим методом [16], азота – титриметрическим методом по Кьельдалю (ГОСТ 13496.4-93), фосфора – фотометрическим методом (ГОСТ 26657-97), калия – пламенно-фотометрическим методом (ГОСТ 30504-97). Визуализацию гранул крахмала проводили с использованием флуоресцентного сканирующего микроскопа Biozero BZ-8100E (Япония).

Статистическая обработка данных включала оценку достоверности различий средних арифметических (t-тест) при уровне значимости $p < 0,05$ с использованием программ Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. Начальный период вегетации (май–июнь) растений характеризовался дефицитом влаги и резкими колебаниями температуры, включая заморозки, а вторая половина – недостатком (2023 г.) или избытком (2024 г.) увлажнения. Эти агрометеорологические особенности обусловили значительную вариативность массы клубней с растения у контрольных рас-

тений (до 50 %). Так, в благоприятном 2024 г. масса клубней с куста в варианте без обработки составила 505,8 г, тогда как в засушливом 2023 г. – 253 г, количество клубней с куста – 9,9 и 4,8 шт. соответственно. Несмотря на стрессовые условия, обработка эндофитами продемонстрировала стабильную эффективность. Предпосадочная инокуляция клубней в сочетании с обработкой растений в фазе бутонизации препаратом *Bs* 26Д обеспечила увеличение, по сравнению с контролем, количества клубней с одного растения на 66,6 % (2024 г.) и 18,7 % (2023 г.), урожайности – 22,1 % и 12,3 % соответственно. В условиях дефицита влаги (2023 г.) обработка штаммом *Bs* 10-4 способствовала увеличению количества клубней с растения на 33,3 %. Прибавка урожая составила в 2023 г. 16,6 %, в 2024 г. – 25,3 % (табл. 1).

Таблица 1. Влияние предпосадочной обработки клубней и растений *Bs* на продуктивность картофеля

Вариант	2023 г.		2024 г.	
	количество клубней, шт./раст.	масса клубней, г/раст.	количество клубней, шт./раст.	масса клубней, г/раст.
Контроль	4,8 ^c	253 ^e	9,9 ^a	505,8 ^c
<i>B. subtilis</i> 26Д	5,7 ^{bc*}	284 ^{d*}	16,5 ^{a*}	617,6 ^{b*}
<i>B. subtilis</i> 10-4	6,4 ^{b*}	295 ^{d*}	9,3 ^{ab}	633,6 ^{a*}

a, b, c, d, e – разные буквы означают статистически достоверную разницу между вариантами по годам при $p < 0,05$; *различия между вариантами внутри одного года достоверны при $p < 0,05$ (здесь и в табл. 2, 3 и 5).

Увеличение количества клубней на одно растение, как одного из определяющих компонентов продуктивности картофеля, у бактеризованных эндофитами вариантов возможно связано с увеличением содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилла a, b и каротиноидов), что было зафиксировано в предыдущих исследованиях на сорте картофеля Удача [17].

Обработка эндофитными бактериями способствовала улучшению товарных качеств клубней (табл. 2). В варианте с *Bs* 26Д количество и масса товарных клубней превышали контрольные в 2023 г. на 38,8 % ($p < 0,05$) и 19,8 % ($p < 0,05$) в 2024 г. – на 34,2 % ($p < 0,05$) и 33,5 % ($p < 0,05$). Обработка *Bs* 10-4 привела к увеличению количества и массы товарных клубней на 44,4 % ($p < 0,05$) и 17,9 % ($p < 0,05$) в 2023 г. и на 21,1 % ($p < 0,05$) и 31,7 % ($p < 0,05$) в 2024 г. Полученные в полевых условиях данные подтверждают воспроизводимость результатов исследований на этом сорте в контролируемых условиях [14].

В 2023 г., благоприятном для развития альтернариоза (коричневые округло-угловатые пятна до 30 мм в диаметре с концентрическими кольцами), распространенность болезни на растениях, выросших из обработанных *Bs* клубней, была ниже, по сравнению с контролем, в межфазовом периоде бутонизация – начало цветения на 5 %, в конце цветения – на 13 %. Развитие болезни в вариантах с *Bs* также было незначительным (до 10 %). Метагеномный анализ ITS-региона показал, что в листьях контрольных растений с признаками поражения альтернариозом преобладали грибы (предположительные возбудители болезней) родов *Alternaria* spp. (альтернариоз), *Fusarium* spp. (фузариоз), *Cladosporium* sp. (кладоспориоз или

Таблица 2. Влияние эндофитных бактерий *Bs* на товарность картофеля

Вариант	2023 г.		2024 г.	
	количество товарных клубней, шт./раст.	масса товарных клубней, г/раст.	количество товарных клубней, шт./раст.	масса товарных клубней, г/раст.
Контроль	1,8 ^e	162 ^d	3,8 ^c	350 ^b
<i>B. subtilis</i> 26Д	2,5 ^{d*}	194 ^{c*}	5,1 ^{a*}	467,2 ^{a*}
<i>B. subtilis</i> 10-4	2,6 ^{d*}	191 ^{c*}	4,6 ^{b*}	460,8 ^{a*}

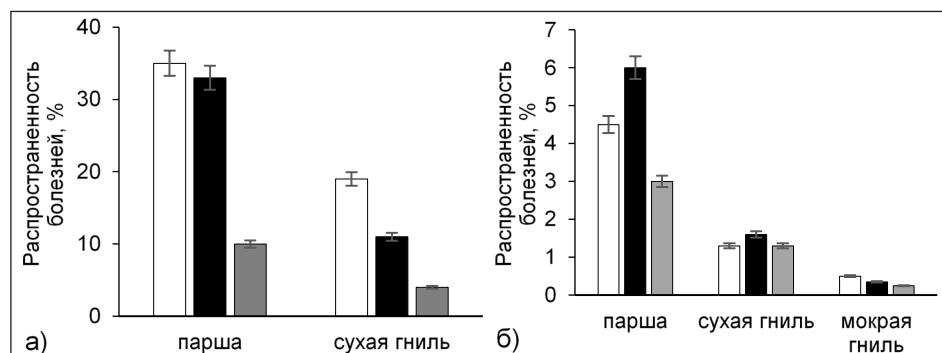


Рис. 1. Влияние обработок эндофитными бактериями на распространённость болезней на клубнях картофеля: а) 2023 г., б) 2024 г.; □ – контроль, ■ – 26Д, ▒ – 10-4.

грибковая плесень) и *Stemphylium* sp. (серая пятнистость листьев). В вариантах с обработкой *Bs* детектированы *Alternaria* sp., *Verticillium* sp. (вертициллезное увядание) и *Cladosporium* sp.

Согласно результатам фитопатологического анализа клубней распространённость парши и сухой гнили в 2023 г. в контроле составляла 35 % и 19 % соответственно, тогда как в вариантах с *Bs* эти показатели снизились до 10 % и 4 % (рис. 1а).

В 2024 г. неустойчивый характер погоды с резкими колебаниями температуры и количества осадков способствовал развитию фитофтороза, проявлявшегося в виде буро-коричневых пятен на листьях. В межфазный период бутонизация–начало цветения распространённость поражения листьев в контроле составила 25,0 %, тогда как в вариантах с обработкой клубней эндофитами – 14,0 % (26Д) и 10,0 % (10-4). Развитие болезни во всех вариантах было на уровне 10 %. В фазе окончания цветения (10 августа) распространённость поражения листьев в контроле увеличилась до 45,4 %, а в вариантах с обработкой клубней снизилась до 18,5 % (26Д) и 15,0 % (10-4). При этом развитие болезни во всех вариантах опыта было в пределах 10...15 %.

Фитопатологический анализ клубней, проведенный после сбора урожая, выявил поражение паршой, сухой (фузариозной) и мокрой гнилями (рис. 1б). Распространённость парши на клубнях в контроле составила 4,5 %, сухой гнили – 1,3 %, мокрой гнили – 0,5 %, а в

экологическая роль этих грибов требует дальнейших комплексных исследований [18, 19, 20]. В варианте с обработкой штаммом 10-4 состав потенциальных патогенов был схожим, но без *Thanatephorus* sp. и включал дополнительно *F. solani*, *Neonectria* sp., *Dactylonectria* sp. и *Parastagonospora* sp.

В условиях 2023 г. (засуха) обработка эндофитами способствовала снижению доли потенциально фитопатогенных видов с 25 % (контроль) до 20 % (10-4) и 7 % (26Д) и увеличению доли сапротрофных видов с 6 % (контроль) до 20 % (10-4) и 7 % (26Д) (рис. 2а). В 2024 г. при достаточной влагообеспеченности доля потенциальных фитопатогенов снижалась с 35 % (контроль) до 26 % (10-4) и 8,3 % (26Д), а доля сапротрофов повышалась с 20 % (контроль) до 26 % (10-4) и 33,3 % (26Д) (рис. 2б). В условиях достаточной влагообеспеченности (2024 г.) видовое разнообразие грибного микробиома было выше, чем в засушливых условиях (2023 г.). При этом в засушливых условиях в обработанных эндофитами клубнях были обнаружены предположительно полезные виды грибов с потенциалом биоконтроля и стимуляции роста (*Plectosphaerella cucumerina*, *Clonostachys rosea*, *Penicillium canescens*, *Edenia gomezpompae*).

Таким образом, независимо от гидротермических условий года и доминирующих видов фитопатогенов, инокуляция клубней и растений эндофитами способствовала снижению распространённости и

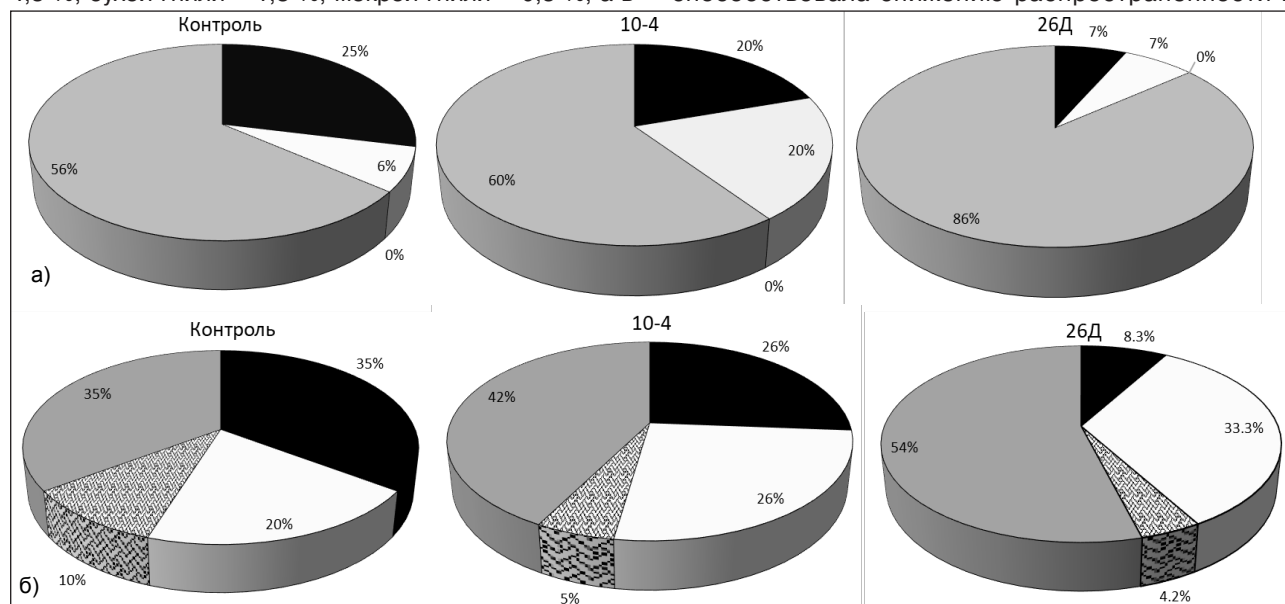


Рис. 2. Влияние *B. subtilis* (26Д и 10-4) на распределение грибных родов по предполагаемым функциям в клубнях картофеля в 2023 г. (а) и 2024 г. (б): ■ – потенциальные фитопатогены, □ – потенциальные сапротрофы, ▒ – неидентифицированы, ▨ – остальные.

Таблица 3. Влияние обработки эндофитами на содержание в клубнях сухого вещества, крахмала и редуцирующих сахаров, %

Вариант	2023 г.			2024 г.		
	сухое вещество	крахмал	редуцирующие сахара	сухое вещество	крахмал	редуцирующие сахара
Контроль	21,7±0,9 ^a	15,9±0,7 ^a	0,46±0,02 ^a	19,88±0,6 ^c	14,2±0,5 ^b	0,19±0,02 ^d
<i>B. subtilis</i> 26Д	21,6±0,9 ^a	15,8±0,7 ^a	0,30±0,01 ^{b*}	20,49±0,6 ^b	14,7±0,5 ^b	0,24±0,02 ^{c*}
<i>B. subtilis</i> 10-4	22,3±0,7 ^a	16,5±0,4 ^a	0,13±0,01 ^{e**}	20,05±0,6 ^b	14,3±0,5 ^b	0,19±0,02 ^d

разнообразия заболеваний листовой поверхности и клубней, особенно в засушливых условиях. Возможно колонизация растительных тканей эндофитами препятствует проникновению аборигенной микрофлоры почвы, повышая устойчивость клубней к патогенным микроорганизмам. Известно, что *Bacillus spp.* продуцируют антимикробные метаболиты (биопептиды и гидролитические ферменты), эффективно подавляющие фитопатогены и стимулирующие рост растений [21].

Гидротермические условия вегетационного периода оказывают определяющее влияние на качественные показатели клубней, в том числе на их антиоксидантные свойства. Неравномерное распределение осадков и резкие колебания температур влияют на качество урожая. В условиях оптимального увлажнения содержание крахмала в клубнях контрольного варианта составило 14,2 %, а в засушливых условиях – 15,9 %. Обработка эндофитами не оказывала существенного влияния на накопление крахмала (табл. 3).

Увеличение размера крахмальных зёрен под влиянием эндофитов может быть результатом комплексного воздействия (активация ферментов, улучшение транспорта са-

харов, гормональная регуляция), что требует дальнейшего изучения. Накопление редуцирующих сахаров зависело как от погодных условий, так и от обработки эндофитами. В засушливых условиях содержание редуцирующих сахаров в урожае инокулированных *Bs* 26Д и 10-4 клубней снижалось на 34,8 % ($p < 0,05$) и 71,7 % ($p < 0,05$) соответственно, по сравнению с контролем (0,46 %), возможно, из-за потребления сахаров эндофитами, колонизирующими ткани клубня [14]. Кроме того, снижение содержания сахаров при неизменном уровне крахмала может быть связано с перераспределением ассимилятов в пользу запасовых тканей под влиянием эндофитов, что согласуется с данными о роли бактерий в регуляции углеводного метаболизма растений.

Наименьшее содержание редуцирующих сахаров (0,13 %) обнаружено в клубнях, выращенных из обработанных *Bs* 10-4 клубней, что определяет их пригодность к промышленной переработке, поскольку низкая массовая доля редуцирующих сахаров в картофеле предотвращает потемнение конечного продукта и появление горького привкуса, которые негативно влияют на восприятие потребителем. В благоприятных по влагообеспеченности условиях содержание редуцирующих сахаров было близко к контролю (0,19 %).

Аналогичная тенденция отмечена по выносу элементов питания из почвы в условиях засухи: содержание азота (N), фосфора (P) и калия (K) в клубнях бактеризованных растений существенно превышало аналогичные показатели в контроле. Так, накопление N в бактеризованных *Bs* 26Д и 10-4 клубнях превышало контроль на 20,6 и 14,7 %, P – на 40,8 и 41,9 %, K – на 19,4 и 9,6 % соответственно (табл. 4). В то же время в условиях достаточной влагообеспеченности содержание P и K в контрольных клубнях (0,21 % и 0,51 %) было выше в 2,3 и 1,6 раза соответственно, чем в условиях засухи. При этом, содержание P и K в инокулированных *Bs* 10-4 вариантах повышалось на 9,5 % и 7,8 % соответственно, по сравнению с контролем, тогда как в варианте с 26Д существенных различий обнаружено не было. Полученные данные указывают на то, что обработка эндофитами улучшает обмен веществ в растениях, повышая эффективность использования NPK из почвы и их утилизацию в клубнях наиболее существенно в условиях дефицита влаги. Вероятно, бактериальные эндофиты, выделяя сидерофоры и растворяя фосфор, инициируют симбиотические взаимодействия с растениями-хозяевами [21], что согласуется с данными о роли микроорганизмов в обеспечении растений азотом и фосфатами в условиях стресса [7].

Таблица 4. Влияние обработки эндофитами на содержание макроэлементов в клубнях картофеля, %

Вариант	2023 г.			2024 г.		
	азот (N)	фосфор (P)	калий (K)	азот (N)	фосфор (P)	калий (K)
Контроль	2,18	0,09	0,31	1,92	0,21	0,51
<i>B. subtilis</i> 26Д	2,63	0,13	0,37	1,99	0,19	0,51
<i>B. subtilis</i> 10-4	2,50	0,13	0,34	1,65	0,23	0,55

Выявили зависимость накопления важнейших природных антиоксидантов в клубнях от агрометеорологических условий и обработки эндофитами. В засушливых условиях накопление аскорбиновой кислоты происходило более интенсивно: от 0,58 г/кг в контроле до 0,63 г/кг ($p < 0,05$) и 0,72 г/кг ($p < 0,05$) в вариантах обработки *Bs* 26Д и 10-4 соответственно. В благоприятных условиях содержание витамина С в контрольных клубнях составляло 0,19 г/кг, а инокуляция не оказывала влияния на его накопление (табл. 5).

Обнаружена тенденция к увеличению антоцианов в клубнях картофеля под влиянием инокуляции *Bs* 10-4 и 26Д в оба исследованных года (табл. 5). Так, их содержание в вариантах с обработкой *Bs* 26Д и 10-4 превышало контроль на 33,8 % ($p < 0,05$) и 67,1 % ($p < 0,05$) соответственно в засуху (2023 г.) и на 104 % и 100 % ($p < 0,05$) в благоприятных по влагообеспеченности условиях (2024 г.). Следует отметить, что в контрольных вариантах без обработок содержание антоцианов было на 16 % выше в благоприятный по влагообеспеченности 2024 г., по сравнению с засушливым 2023 г. Это может быть связано с тем, что биосинтез антоцианов, требует значительных ресурсов, доступность которых выше именно в оптимальных условиях. Выявленное значительное 2-кратное увеличение накопления антоцианов под влиянием эндофитных бактерий (*Bs* 10-4 и 26Д), особенно выраженное в благоприятный 2024 г. (см. табл. 5), может свидетельствовать о

Таблица 5. Влияние инокуляции семенных клубней *Bacillus subtilis* на содержание витамина С (г/кг) и антоцианов (мг %) в урожае клубней картофеля

Вариант	2023 г.		2024 г.	
	витамин С	антоцианы	витамин С	антоцианы
Контроль	0,58±0,9 ^c	1,98±0,07 ^e	0,19±0,03 ^e	2,29±0,07 ^d
<i>B. subtilis</i> 26Д	0,63±0,9 ^{b*}	2,65±0,03 ^{c*}	0,19±0,91 ^d	4,67±0,08 ^{a*}
<i>B. subtilis</i> 10-4	0,72±0,9 ^{a**}	3,31±0,03 ^{b**}	0,19±0,06 ^d	4,59±0,05 ^{a*}

вовлечении данных бактерий в стимуляцию синтеза этих соединений как компонента преадаптации растений к потенциальным стрессам [22, 23]. Поскольку в 2024 г. сильного окислительного стресса (засухи) не наблюдали, то расходования антоцианов на нейтрализацию активных форм кислорода, вероятно, не происходило, что могло обусловить их более высокий уровень в клубнях, по сравнению с засушливым 2023 г.

Повышенный уровень содержания витамина С (или аскорбиновой кислоты) и антоцианов в клубнях свидетельствует не только о более высокой питательной ценности продукции, но и потенциальной их способности противостоять различным биотическим и абиотическим стрессам как в процессе вегетации, так и при хранении [22]. Кроме того, *Bs* также может запускать сигнальные пути и активировать специфические ферменты, участвующие в синтезе витамина С и антоцианов [23].

Выводы. Независимо от гидротермических условий года и видового состава фитопатогенов инокуляция клубней и растений эндофитными *Bacillus* spp. способствовала снижению распространенности и разнообразия заболеваний листовой поверхности и клубней, повышению продуктивности растений (в благоприятных условиях – до 25 %, в засушливых – до 16 %), снижению распространенности альтернариоза (в 2023 г. в 1,5...1,8 раза), фитофтороза (в 2024 г. в 2,5...3,0 раза), парши серебристой (в 2023 г. и 2024 г. соответственно в 3,5 и 1,5 раза) и сухой гнили (в 2023 г.

и 2024 г. соответственно в 4,8 и 1,1 раза), а также обеспечила снижение доли фитопатогенных видов грибов в клубнях на 5 и 9 %, по сравнению с контролем. В вариантах обработки *Bs* 26Д и 10-4 в засушливых условиях отмечено снижение редуцирующих сахаров в клубнях на 34,8 и 71,7 %, повышение содержания азота на 20,6 и 14,7 %, фосфора – на 40,8 и 41,9 %, калия – на 19,4 и 9,6 %, суммы антоцианов – на 33,8 и 67,1 %, по сравнению с контролем, а также аскорбиновой кислоты до 72,3 мг % (контроль 58,4 мг %) при обработке *Bs* 10-4.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что эндофитные бактерии *Bacillus subtilis* повышают адаптивность картофеля к стрессовым факторам, изменяя биохимический профиль клубней, подавляя фитопатогены и регулируя структуру грибного микробиома, что имеет важное значение для оптимизации агротехнологий в условиях меняющегося климата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-26-00262 (<https://rscf.ru/project/23-26-00262/>).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Potato: From functional genomics to genetic improvement / L. Qu, X. Huang, X. Su, et al. // *Molecular Horticulture*. 2024. Vol. 4. Article 34. URL: <https://molhort.biomedcentral.com/articles/10.1186/s43897-024-00105-3> (дата обращения: 21.02.2025). doi: 10.1186/s43897-024-00105-3.
2. Dupuis J. H., Liu Q. Potato starch: A review of physicochemical, functional and nutritional properties // *American Journal of Potato Research*. 2019. Vol. 96. P. 127–138. doi: 10.1007/s12230-018-09696-2.
3. Handayani T., Gilani S. A., Watanabe K. N. Climatic changes and potatoes: How can we cope with the abiotic stresses? // *Breed Sci*. 2019. Vol. 69. No. 4. P. 545–563. doi: 10.1270/jsbbs.19070.
4. Marketable yield of potato and its quantitative parameters after application of herbicides and biostimulants / K. Zarzecka, M. Gugala, A. Sikorska, et al. // *Agriculture*. 2020. Vol. 10. No. 2. Article 49. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/2/49> (дата обращения: 29.01.2025). doi: 10.3390/agriculture10020049.
5. Кошкин Е. И., Андреева И. В., Гусейнов Г. Г. Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 83–96. doi: 10.1134/S0002188119120068.
6. Improving potato stress tolerance and tuber yield under a climate change scenario – a current overview / K. Dahal, X. Q. Li, H. Tai, et al. // *Front. Plant Sci*. 2019. Vol. 10. Article 563. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.00563/full> (дата обращения: 30.01.2025). doi: 10.3389/fpls.2019.00563.
7. Phytomicrobiome communications: Novel implications for stress resistance in plants / K. Khanna, S. K. Kohli, N. Sharma, et al. // *Front. Microbiol*. 2022. Vol. 13. Article 912701. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2022.912701/full> (дата обращения: 05.02.2025). doi: 10.3389/fmicb.2022.912701.
8. Amelioration of drought stress in Foxtail millet (*Setaria italica* L.) by P-solubilizing drought-tolerant microbes with multifarious plant growth promoting attributes / D. Kou, K. L. Rana, A. N. Yadav, et al. // *Environmental Sustainability*. 2020. Vol. 3. P. 23–34. doi: 10.1007/s42398-020-00094-1.
9. Plant biostimulants in sustainable potato production: An overview / F. Caradonia, D. Ronga, A. Tava, et al. // *Potato Research*. 2022. Vol. 65. P. 83–104. doi: 10.1007/s11540-021-09510-3.
10. Field application of *Bacillus subtilis* isolates for controlling late blight disease of potato caused by *Phytophthora infestans* / B. Kumber, R. Mahmood, S. N. Nagesha, et al. // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2019. Vol. 22. Article 101366. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818119305365?via%3Dihub> (дата обращения: 12.02.2025). doi: 10.1016/J.BCAB.2019.101366.
11. Урожайность и поражаемость картофеля ризоктониозом и фитофторозом под влиянием эндофитных бактерий *Bacillus thuringiensis* W65 и *Bacillus amyloliquefaciens* P20 / В. К. Чеботарь, А. Н. Заплаткин, С. В. Балакина и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2023. Т. 58. № 3. С. 429–446. doi: 10.15389/agrobiol.2023.3.429rus.
12. Изучение влияния биопрепарата на основе *Bacillus atrophaeus* на урожайность картофеля / В. Е. Сопрунова, О. Б. Сопрунова, Ш. Б. Байрамбеков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии»*. 2020. Т. 8. № 4. С. 86–95. doi: 10.14529/food200411.
13. Yarte M. E., Llorente B. E., Larraburu E. E. Native putatively endophytic bacteria from *Handroanthus impetiginosus* improve its in vitro rooting // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2022. Vol. 151. P. 265–274. doi: 10.1007/s11240-022-02349-7.
14. Pusenkov L., Lastochkina O., Ercisli, 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. Article 1626. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/8/1626> (дата обращения: 25.01.2025). doi: 10.3390/agriculture13081626.
15. Pusenkov L. I., Lastochkina O. V. Enhancing disease resistance in plants and stored potato tubers through inoculation of seed tubers with the endophyte *Bacillus subtilis* 10-4 and genomic analysis of its antimicrobial properties // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2024. Vol. 60. P. 1338–1350. doi: 10.3390/agriculture13081626.
16. Starch from Alberta potatoes: Wet isolation and some physicochemical properties / T. Vasanthan, W. Berghaller, D. Driedger,

et al. // Food Research International. 1999. Vol. 32. P. 355–365. doi: 10.1016/S0963-9969(99)00096-4.

17. Влияние кратности обработок картофеля эндифитными бактериями *Bacillus subtilis* на содержание пигментов в листьях, продуктивность и устойчивость к болезням / Л. И. Пусенкова, С. Р. Гарипова, К. А. Федорова и др. // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 10. С. 11–17. doi: 10.53859/02352451_2022_36_10_11.

18. DeMers M. *Alternaria alternata* as endophyte and pathogen // Microbiology. 2022. Vol. 168. No. 3. Article 001153. URL: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.001153> (дата обращения: 06.05.2025). doi: 10.1099/mic.0.001153.

19. The endophytic *Fusarium* strains: A treasure trove of natural products / A. M. Ahmed, B. K. Mahmoud, N. Millan-Aguinaga, et al. // RSC Adv. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 1339–1369. doi: 10.1039/d2ra04126j.

20. Видовой состав грибов, ассоциированных с листьями картофеля / Л. Ю. Кокаева, Т. И. Хуснетдинова, Ю. И. Березов и др. // Защита картофеля. 2017. № 2. С. 8–11.

21. The hidden world within plants: Ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes / P. R. Hardoim, L. S. van Overbeek, G. Berg, et al. // Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2015. Vol. 79. P. 293–320. doi: 10.1128/MMBR.00050-14.

22. Landi M., Tattini M., Gould K. S. Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions // Environ. Exp. Bot. 2015. Vol. 119. P. 4–17. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.05.012.

23. Поливанова О. Б., Гинс Е. М. Антиоксидантная активность пигментированного картофеля (*Solanum tuberosum* L.), содержание антоцианов, их биосинтез и физиологическая роль // Овощи России. 2019. Т. 6. С. 84–90. doi: 10.18619/2072-9146-2019-6-84-90.

References

1. Qu L, Huang X, Su X, et al. Potato: From functional genomics to genetic improvement. Molecular Horticulture [Internet]. 2024 [cited 2025 Feb 21];4: Article 34. Available from: <https://molhort.biomedcentral.com/articles/10.1186/s43897-024-00105-3>. doi: 10.1186/s43897-024-00105-3.

2. Dupuis JH, Liu Q. Potato starch: A review of physicochemical, functional and nutritional properties. American Journal of Potato Research. 2019;96:127-38. doi: 10.1007/s12230-018-09696-2.

3. Handayani T, Gilani SA, Watanabe KN. Climatic changes and potatoes: How can we cope with the abiotic stresses? Breed Sci. 2019;69(4):545-63. doi: 10.1270/jsbbs.19070.

4. Zarzecka K, Gugala K, Sikorska A, et al. Marketable yield of potato and its quantitative parameters after application of herbicides and biostimulants. Agriculture [Internet]. 2020 [cited 2025 Jan 29];10(2): Article 49. Available from: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/2/49>. doi: 10.3390/agriculture10020049.

5. Koshkin EI, Andreeva IV, Guseinov GG. [Impact of global climate change on crop productivity and resilience to stressors]. Agrokhimiya. 2019;(12):83-96. Russian. doi: 10.1134/S0002188119120068.

6. Dahal K, Li XQ, Tai H, et al. Improving potato stress tolerance and tuber yield under a climate change scenario – a current overview. Front. Plant Sci [Internet]. 2019 [cited 2025 Jan 30];10: Article 563. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.00563/full>. doi: 10.3389/fpls.2019.00563.

7. Khanna K, Kohli SK, Sharma N, et al. Phytomicrobiome communications: Novel implications for stress resistance in plants. Front. Microbiol [Internet]. 2022 [cited 2025 Feb 5];13: Article 912701. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2022.912701/full>. doi: 10.3389/fmicb.2022.912701.

8. Kou D, Rana KL, Yadav AN, et al. Amelioration of drought stress in Foxtail millet (*Setaria italica* L.) by P-solubilizing drought-tolerant microbes with multifarious plant growth promoting attributes. Environmental Sustainability. 2020;3:23-34. doi: 10.1007/s42398-020-00094-1.

9. Caradonia F, Ronga D, Tava A, et al. Plant biostimulants in sustainable potato production: An overview. Potato Research. 2022;65:83-104. doi: 10.1007/s11540-021-09510-3.

10. Kumbhar B, Mahmood R, Nagesha SN, et al. Field application of *Bacillus subtilis* isolates for controlling late blight disease of potato caused by *Phytophthora infestans*. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology [Internet]. 2019 [cited 2025 Feb 12];22: Article 101366. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818119305365?via%3Dihub>. doi: 10.1016/J.BCAB.2019.101366.

11. Chebotar' VK, Zaplatkin AN, Balakina SV, et al. [Potato yield and susceptibility to rhizoctonia and late blight under the influence of endophytic bacteria *Bacillus thuringiensis* W65 and *Bacillus amyloliquefaciens* P20]. Sel'skokhozyaistvennaya biologiya. 2023;58(3):429-46. Russian. doi: 10.15389/agrobiologiya.2023.3.429rus.

12. Soprunova VE, Soprunova OB, Bairambekov ShB, et al. [Study of the influence of the biopreparation based on *Bacillus atrophaeus* on potato yield]. Vestnik YuURGU. Seriya «Pishchevy e i biotekhnologii». 2020;8(4):86-95. Russian. doi: 10.14529/food200411.

13. Yarte ME, Llorente BE, Larraburu EE. Native putatively endophytic bacteria from *Handroanthus impetiginosus* improve its in vitro rooting. Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 2022;151:265-74. doi: 10.1007/s11240-022-02349-7.

14. Pusenkova L, Lastochkina O, Ercisli, 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 [Internet]. 2023 [cited 2025 Jan 25];13(8): Article 1626. Available from: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/8/1626>. doi: 10.3390/agriculture13081626.

15. Pusenkova LI, Lastochkina OV. Enhancing disease resistance in plants and stored potato tubers through inoculation of seed tubers with the endophyte *Bacillus subtilis* 10-4 and genomic analysis of its antimicrobial properties. Applied Biochemistry and Microbiology. 2024;60:1338-50. doi: 10.3390/agriculture13081626.

16. Vasanthan T, Bergthaller W, Driedger D, et al. Starch from Alberta potatoes: Wet isolation and some physicochemical properties. Food Research International. 1999;32:355-65. doi: 10.1016/S0963-9969(99)00096-4.

17. Pusenkova LI, Garipova SR, Fedorova KA, et al. [Effect of the frequency of potato treatments with endophytic bacteria *Bacillus subtilis* on the pigment content in leaves, productivity and resistance to diseases]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022;36(10):11-7. Russian. doi: 10.53859/02352451_2022_36_10_11.

18. DeMers M. *Alternaria alternata* as endophyte and pathogen. Microbiology [Internet]. 2022 [cited 2025 May 6];168(3): Article 001153. Available from: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.001153>. doi: 10.1099/mic.0.001153.

19. Ahmed AM, Mahmoud BK, Millan-Aguinaga N, et al. The endophytic *Fusarium* strains: A treasure trove of natural products. RSC Adv. 2023;13(2):1339-69. doi: 10.1039/d2ra04126j.

20. Kokaeva LY, Khusnetdinova TI, Berezov Yul, et al. [Species composition of fungi associated with potato leaves]. Zashchita kartofelya. 2017;(2):8-11. Russian.

21. Hardoim PR, van Overbeek LS, Berg G, et al. The hidden world within plants: Ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2015;79:293-320. doi: 10.1128/MMBR.00050-14.

22. Landi M, Tattini M, Gould KS. Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. Environ. Exp. Bot. 2015;119:4-17. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.05.012.

23. Polivanova OB, Gins EM. [Antioxidant activity of pigmented potato (*Solanum tuberosum* L.), anthocyanin content, their biosynthesis and physiological role]. Ovoshchiki Rossii. 2019;6:84-90. Russian. doi: 10.18619/2072-9146-2019-6-84-90.

Поступила в редакцию 10.04.2025 После доработки 08.05.2025 Принята к публикации 28.05.2025