

Оригинальная статья

## Рост и развитие микрорастений картофеля *in vitro* под влиянием метаболитов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород

Н. О. Ренёв✉, В. А. Мальчевский, А. М. Субботин, С. А. Петров

Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация

✉solitary\_72@mail.ru

### Аннотация

В 2019–2021 гг. была проведена оценка влияния штаммов бактерий из многолетнемерзлых пород на морфогенез, ризогенез, активность протекания процессов фотосинтеза в микрорастениях картофеля в условиях *in vitro*. В исследовании использовали три штамма бактериальных культур из коллекции отдела биоресурсов криосферы Тюменского научного центра СО РАН. Исследования проводили на микрорастениях трех сортов картофеля: Жуковский ранний, Розара и Ред Скарлетт. В результате исследования из ядер многолетнемерзлых пород были выделены два штамма бактерий. Установлено, что при совместном выращивании микрорастений картофеля в условиях *in vitro* на питательной среде Мурасиге–Скуга с вторичными метаболитами бактерий штаммов *Bacillus cereus* 9-08-CH9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2, внесенными в пробирки в момент черенкования в дозе 250 мкл (1,63 мкл метаболитов на 1 мм<sup>2</sup> площади питательной среды), оказывают наибольший стимулирующий эффект на морфогенез растений, ризогенез и процесс фотосинтеза. Это способствует ускорению метода клонального микроразмножения *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля.

**Ключевые слова:** метаболиты, бактерии, картофель, *in vitro*, пигменты, спектрофотометрия

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания (№ 121041600036-6).

**Для цитирования:** Ренёв Н.О., Мальчевский В.А., Субботин А.М., Петров С.А. Рост и развитие микрорастений картофеля *in vitro* под влиянием метаболитов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):435–442. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-435-442>

Original article

## Growth and development of potato microplants *in vitro* under the influence of bacterial metabolites isolated from permafrost

N. O. Renev✉, V. A. Malchevskiy, A. M. Subbotin, S. A. Petrov

Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation

✉solitary\_72@mail.ru

### Abstract

The effects of permafrost bacterial strains on morphogenesis, rhizogenesis, and photosynthesis in potato micro-plants under *in vitro* conditions were assessed from 2019 to 2021. We used three bacterial culture strains from the collection of the Cryosphere Bioresources Department, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The study was conducted on microgrowers of three potato varieties: Zhukovsky Early, Rozara and Red Scarlett. Two strains of bacteria were isolated from the cores of perennially frozen rocks. We found that the combined cultivation of potato microgrowers under *in vitro* conditions on Murasige-Skug nutrient medium with secondary metabolites of the bacterial strains *Bacillus cereus* 9-08-CH9 and *Achromobacter spanius* 10-50TS2, introduced at the time of cutting at a dose of 250 µL, had the greatest stimulatory effect on its morphogenesis, rhizogenesis, and photosynthesis. Thus, the proposed cultivation method accelerates clonal micropropagation of *in vitro* materials for original potato seed production.

**Keywords:** metabolites, bacteria, potatoes, *in vitro*, pigments, spectrophotometry

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment (number 121041600036-6).

**For citation:** Renev N.O., Malchevskiy V.A., Subbotin V.A., Petrov S.A. Growth and development of potato microplants *in vitro* under the influence of bacterial metabolites isolated from permafrost. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):435–442. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-435-442>

## Введение

Повышение эффективности культивирования клеток и тканей растений *in vitro* является важной задачей для развития агробιοтехнологии. Традиционные подходы к решению данной проблемы основаны на поиске химических, физических или генетических параметров культивирования. Гораздо хуже изучена возможность применения биологических факторов, таких как ассоциативные бактерии и их метаболиты [1].

В настоящее время в России и за рубежом проводятся широкие исследования по изучению возможности использования полезных форм микроорганизмов для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и улучшения качества продукции [2, 3].

Микроорганизмы, присутствующие в тканях растений и в ризосферной почве, играют ключевую роль в росте и развитии растений, поддерживая баланс питательных веществ в экосистеме. Эти микроорганизмы обеспечивают важные преимущества для растений-хозяев, поэтому они ценятся как важный и перспективный инструмент для устойчивого сельского хозяйства [4, 5].

Микроорганизмы способны осуществлять целый ряд функций: улучшать минеральное питание растений, фиксировать атмосферный азот, стимулировать рост растений, подавлять фитопатогенную микрофлору, повышать устойчивость растений к стрессам [6–8].

В Тюменском научном центре СО РАН создана коллекция микроорганизмов, выделенных из многолетнемерзлых пород Западной и Восточной Сибири (Коллекция почвенных микроорганизмов многолетнемерзлых пород Арктики (ПМММПА)). Используя бактериальные культуры из этой коллекции, мы исследуем влияние «реликтовых» микроорганизмов на морфофизиологические, биохимические и цитогенетические показатели современных биологических объектов разного уровня организации, от одноклеточных организмов до высших растений и животных. Результаты исследований указывают на положительное влияние ряда штаммов микроорганизмов, выделенных из толщи многолетнемерзлых пород, на морфофизиологические, био-

химические и адаптивные параметры культурных злаковых растений [9–12] и картофеля [13].

Цель работы – оценить влияние вторичных метаболитов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород, на рост и развитие микрорастений картофеля в условиях *in vitro*.

## Методы и материалы исследования

Исследования были проведены с использованием одного штамма вида *Achromobacter spanius* 10-50-TS2 и двух штаммов вида *Bacillus cereus*: 875-TS и 9-08-CH9.

Штаммы идентифицированы по 16SpPHK и депонированы во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов ФГУП ГосНИИГенетика: 875-TS – № В-12242, 9-08-CH9 – № В-12401, 10-50-TS2 – № В-12405.

Штамм 875-TS вида *Bacillus cereus* выделен из многолетнемерзлых пород возрастом 10–12 тысяч лет, отобранных из бурового керна с глубины 10 м при бурении скважины в районе Тарко-Сале (Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, Пуровский район). Штамм 9-08-CH9 вида *Bacillus cereus* выделен из многолетнемерзлых пород (серого ожелезненного песка ниже торфяного горизонта, глубина места отбора пробы 2 м ниже берегового растительного покрова) при отборе проб с правого берега реки Чара на 9 км выше по течению реки от пос. Новая Чара (Россия, Забайкальский край, Каларский район, пос. Новая Чара). Штамм 10-50-TS2 вида *Achromobacter spanius* выделен из многолетнемерзлых пород (сине-серых пластичномерзлых глин), отобранных из бурового керна с глубины 30 м при бурении скважины в районе Тарко-Сале (Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, Пуровский район).

Исследуемые штаммы бактериальных культур находятся в Коллекции почвенных микроорганизмов многолетнемерзлых пород Арктики (ПМММПА) ТюмНЦ СО РАН при ТРЦКП «Биокосные системы криосферы» ТюмНЦ СО РАН под номером скр\_77024, дата регистрации 02.09.2011 г.

Культивирование микроорганизмов проводили в лаборатории отдела биоресурсов криосфе-

ры ТюмНЦ СО РАН. Штаммы бактерий высевали в пробирки на приготовленный стандартным методом скошенный питательный агар (ГРМ-агар, г. Оболенск, ТУ 9398-020-78095326-2006) и культивировали в термостате 48 ч при  $t = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Затем производили смыв микроорганизмов из каждой пробирки 5 мл дистиллированной воды [14]. Концентрацию микроорганизмов определяли культуральным методом серийных разведений по количеству КОЕ на агаризованной питательной среде в чашках Петри [15]. После определения количества клеток бактерий в исходной маточной суспензии плотность культур доводили до рабочей концентрации в  $1 \times 10^9$  микробных клеток в 1 мл дистиллированной воды. Затем суспензию клеток замораживали на 8 ч при температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после чего ее оттаивали при температуре  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 16 ч. Цикл замораживания-оттаивания повторяли 3 раза. По экспериментальным данным отдела биоресурсов криосферы ТюмНЦ СО РАН, этот способ увеличивает выход вторичных метаболитов бактерий в водную среду в 2 раза. Общая масса пептидных комплексов в фильтрах составляла 200 мкг/мл. Масса пептидных комплексов определялась биуретовым методом [16] и методом жидкостной препаративной хроматографии на хроматографе фирмы «Gilson». Стерильный раствор метаболитов получали путем фильтрования бактериальных суспензий через фильтры фирмы «Millipore» с диаметром пор 0,22 мкм (Durapore membrane filters, type 0,22 mm GV). Полученные фильтраты, содержащие метаболиты бактерий, использовали для дальнейшей работы.

Исследования проводили на микрорастениях трех сортов картофеля: Жуковский ранний, Розара и Ред Скарлетт.

Для оценки влияния штаммов бактерий на морфометрические и биохимические показатели *in vitro* микрорастений картофеля в эксперименте использовали водные растворы метаболитов микроорганизмов. Метаболиты в количестве (дозе) 250 мкл (50 мкг по пептидным комплексам) раскпывали (наносили) на поверхность питательной среды Мурасиге–Скуга, разлитую по 5 мл в пробирки ПБ2-16x150 (ТУ 9461-008-52876351-2008) с внутренним диаметром 14 мм. Площадь поверхности питательной среды  $S$  равнялась  $153,86\text{ мм}^2$ , соответственно доза метаболитов составляла 1,63 мкл метаболитов (0,33 мкг по пептидным комплексам) на  $1\text{ мм}^2$  площади

питательной среды. В контрольном варианте, в том же объеме, добавляли отфильтрованный смыв с поверхности питательного агара для культивирования микроорганизмов. Через 60 минут в эти пробирки начинали высаживать микрочеренки растений картофеля. Размножение *in vitro* материала картофеля проводили методом клонального микроразмножения согласно методическим рекомендациям по тиражированию *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха [17]. После черенкования материал размещали для дальнейшего роста и развития в условиях фитотрона с температурой  $23\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и освещенностью 5000–8000 люкс с фотопериодом 16 ч. Повторность трехкратная по 10 микрорастений каждого сорта. На 10-, 20-, 30-й дни от начала эксперимента у растений проводили измерение биометрических показателей (количество междоузлий на побеге, длина побега, количество корней, максимальная длина корня).

На 30-е сутки исследовали количество пигментов фотосинтеза в соответствии со стандартными методиками [18, 19]. Эксперимент проводили в двух повторностях. В качестве растворителя при приготовлении вытяжки пигментов фотосинтеза применяли 96%-й этиловый спирт. Окрашенную жидкость помещали в кювету спектрофотометра с толщиной поглощающего слоя 10 мм и снимали оптическую плотность экстракта при длине волны 665, 649 и 440 нм. Количество хлорофилла *a* и *b* в объеме кюветы спектрофотометра рассчитывали по формулам I.F. Wintermans и A. DeMots (1965). Концентрацию каротиноидов в суммарной вытяжке пигментов рассчитывали по формуле D. Wettstein (1957).

Статистическая обработка результатов проведена с использованием программы IBM «SPSS 11,5 for Windows». Достоверность различий средних значений измеряемых морфометрических параметров между опытными и контрольным вариантами определена по *t*-критерию Стьюдента при уровне значимости  $p \leq 0,05$ . Все данные в таблицах представлены как среднее значение  $\pm$  стандартная ошибка среднего ( $\pm$  SE).

### Результаты и обсуждения

Одним из показателей при работе с культурой ткани является число сформированных междоузлий на регенерируемом растении. Чем выше их выход, тем больше микрорастений можно по-

**Влияние метаболитов штаммов бактерий из МПП  
на морфогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro***

Table 1

**Effects of metabolites of bacterial strains from permafrost  
on the morphogenesis of potato micro-plants under *in vitro* conditions**

Сорт Variety	Штамм Strain	Количество междоузлий, шт. Number of internodes, pcs.			Высота растений на 30-е сутки, мм Plant height on the 30th day, mm
		Период культивирования, дни Cultivation period, days			
		10	20	30	
Жуковский ранний	Контроль Control	2,7±0,15	4,1±0,16	5,2±0,22	87,4±2,13
	9-08-CH9	3,1±0,18*	4,5±0,13*	6,2±0,24*	90,2±2,69
	10-50TS2	2,7±0,15	4,7±0,11*	6,8±0,29*	89,8±2,52
	875TS	2,2±0,16*	3,4±0,17*	5,7±0,30	79,2±3,04*
Розара	Контроль Control	2,5±0,26	4,0±0,19	5,3±0,24	78,0±3,33
	9-08-CH9	2,7±0,25	4,9±0,16*	6,7±0,16*	83,5±2,41
	10-50TS2	2,9±0,24	5,1±0,22*	6,4±0,22*	89,0±2,75*
	875TS	2,4±0,21	4,4±0,21	5,2±0,23	74,8±2,77
Ред Скарлетт	Контроль Control	2,9±0,24	3,6±0,24	5,5±0,22	84,3±2,16
	9-08-CH9	3,3±0,25	4,2±0,19*	6,4±0,20*	89,8±2,22*
	10-50TS2	3,5±0,24*	4,4±0,21*	6,1±0,24*	92,4±3,17
	875TS	2,5±0,27	3,4±0,22	5,8±0,19	82,2±2,41

\* – достоверность отличия значений с опытным вариантом с использованием штамма бактерий из ММП от значений, полученных в контрольном варианте (\* –  $p \leq 0,05$ ).

\* – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the MMP bacterial strain from the values obtained in the control variant (\* –  $p \leq 0.05$ ).

лучать при черенковании в процессе ускоренного размножения.

Влияние метаболитов штаммов бактерий на морфогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro* показано в табл. 1.

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о том, что при совместном выращивании микрорастений картофеля в условиях *in vitro* на питательной среде Мурасиге–Скуга с метаболитами бактерий штаммов *Bacillus cereus* 9-08-CH9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2, внесенными в момент черенкования в дозе 250 мкл, оказывают наибольший стимулирующий эффект. Вторичные метаболиты данных штаммов бактерий достоверно ( $p \leq 0,05$ ) увеличивают число междоузлий на всех этапах культивирования микрорастений картофеля у сортов Жуковский ранний, Розара и Ред Скарлетт, что может способст-

вовать ускорению тиражирования *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля.

Метаболиты штаммов бактерий *Bacillus cereus* 875TS в указанных концентрациях вызывают достоверное ( $p \leq 0,05$ ) снижение числа междоузлий микрорастений картофеля сорта Жуковский ранний на начальных этапах культивирования.

Важным моментом при клональном микро-размножении является усиление процесса ризогенеза. Основными показателями ризогенеза для растений *in vitro* можно считать число корней и их длину. Хорошо сформированная корневая система оказывает положительное влияние на онтогенез микрорастений.

Влияние метаболитов штаммов бактерий на ризогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro* показано в табл. 2.

**Влияние метаболитов штаммов бактерий из МПП  
на ризогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro***

Table 2

**Effects of metabolites of bacterial strains from permafrost  
on rhizogenesis of potato micro-plants under *in vitro* conditions**

Сорт Variety	Штамм Strain	Количество корней, шт. Number of roots, pcs.			Длина корней на 30-е сутки, мм Root length on the 30th day, mm
		Период культивирования, дни Cultivation period, days			
		10	20	30	
Жуковский ранний	Контроль Control	3,5±0,48	4,9±0,59	7,9±0,45	74,5±3,01
	9-08-CH9	3,9±0,51	5,7±0,60	8,2±0,30	76,3±3,74
	10-50TS2	4,0±0,41	5,5±0,50	8,9±0,42*	79,3±3,86
	875TS	3,3±0,30	4,5±0,56	6,5±0,52*	67,5±3,45*
Розара	Контроль Control	3,1±0,37	4,6±0,33	5,7±0,42	61,5±3,33
	9-08-CH9	3,7±0,25	5,9±0,42*	7,5±0,41*	73,7±3,39*
	10-50TS2	3,7±0,27	6,1±0,39*	7,6±0,40*	83,5±3,44*
	875TS	3,5±0,36	4,5±0,44	5,9±0,39	71,5±4,11*
Ред Скарлетт	Контроль Control	2,8±0,47	5,7±0,33	7,1±0,32	73,8±3,33
	9-08-CH9	3,3±0,39	6,9±0,37*	8,8±0,41*	79,4±3,86
	10-50TS2	3,9±0,45*	6,5±0,40*	9,2±0,42*	88,2±3,77*
	875TS	3,5±0,51	5,3±0,54	8,5±0,33*	73,2±3,41

\* – достоверность отличия значений с опытным вариантом с использованием штамма бактерий из МПП от значений, полученных в контрольном варианте (\* –  $p \leq 0,05$ ).

\* – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the MMP bacterial strain from the values obtained in the control variant (\* –  $p \leq 0.05$ ).

Лучшее корнеобразование на 30-е сутки отмечается на питательной среде с добавлением вторичных метаболитов штаммов бактерий *Achromobacter spanius* 10-50TS2, *Bacillus cereus* 9-08-CH9 и *Bacillus cereus* 875TS. Вторичные метаболиты данных штаммов достоверно ( $p \leq 0,05$ ) оказывают положительное влияние на количество и длину корней на заключительном этапе культивирования микрорастений. Достаточно развитая корневая система способствует в будущем хорошей приживаемости, более полному поглощению питательных веществ, а также развитию всего микрорастения.

Метаболиты штаммов бактерий *Bacillus cereus* 875TS в указанных концентрациях вызывают достоверное ( $p \leq 0,05$ ) снижение числа и длины корней у микрорастений картофеля сорта

Жуковский ранний на заключительном этапе культивирования.

Известно, что пигменты (хлорофиллы *a* (Chl.a) и *b* (Chl.b), каротиноиды (Car.)) играют решающую роль в процессе фотосинтеза и, в конечном итоге, продуктивности растений в целом [20]. Хлорофилл *a* – главный функциональный пигмент, служащий донором энергии для фотосинтезирующих реакций. Хлорофилл *b* – компонент фотосинтетического аппарата высших растений, основной функцией которого считается повышение светособирающей способности [21, 22]. Содержание хлорофилла может быть использовано в качестве важного диагностического показателя для исследования роста растений [23]. Каротиноиды играют роль вспомогательных пигментов. Они передают дополнительную энергию

**Влияние метаболитов штаммов бактерий из ММП на содержание пигментов фотосинтеза  
в листьях микрорастений картофеля**

Table 3

**Effects of metabolites of bacterial strains from permafrost on photosynthetic pigments  
in leaves of potato micro-plants**

Сорт Variety	Штамм Strain	Chl.a*, мг Chl.a, mg	Chl.b*, мг Chl.b, mg	Chl.a Chl.b	Car. *, мг Car., mg
Жуковский ранний	Контроль Control	0,227±0,00067	0,139±0,00033	0,366±0,00088	0,038±0,00033
	9-08-СН9	0,225±0,00033	0,193±0,00068*	0,418±0,00058*	0,034±0,00072
	10-50TS2	0,236±0,00058*	0,180±0,00033*	0,416±0,00067*	0,035±0,00033
	875TS	0,219±0,00033*	0,158±0,00033*	0,377±0,00033*	0,025±0,00088*
Розара	Контроль Control	0,222±0,00066	0,124±0,00033	0,346±0,00077	0,033±0,00013
	9-08-СН9	0,233±0,00021*	0,199±0,00019*	0,432±0,00033*	0,038±0,00042*
	10-50TS2	0,236±0,00033*	0,187±0,00027*	0,423±0,00033*	0,033±0,00011
	875TS	0,220±0,00054	0,161±0,00033*	0,381±0,00068*	0,030±0,00033*
Ред Скарлетт	Контроль Control	0,240±0,00067	0,159±0,00033	0,399±0,00088	0,041±0,00011
	9-08-СН9	0,246±0,00033*	0,193±0,00068*	0,439±0,00058*	0,050±0,00033*
	10-50TS2	0,242±0,00058*	0,189±0,00053*	0,431±0,00067*	0,045±0,00031*
	875TS	0,230±0,00033*	0,180±0,00077*	0,410±0,00033*	0,033±0,00065*

\* – достоверность различия значений с опытным вариантом с использованием штамма бактерий из ММП от значений, полученных в контрольном варианте (\* –  $p \leq 0,05$ ).

\* – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the bacterial strain from the MMP from the values obtained in the control variant (\* –  $p \leq 0.05$ ).

на хлорофиллы, выполняя светособирающую функцию, и отводят избыточную энергию от хлорофиллов, выполняя светозащитную функцию [24, 25].

Влияние метаболитов штаммов бактерий на содержание пигментов фотосинтеза в листьях микрорастений картофеля показано в таблице 3.

Анализ полученных данных по влиянию вторичных метаболитов штаммов бактерий на содержание пигментов фотосинтеза в листьях микрорастений картофеля показывает, что штаммы *Bacillus cereus* 9-08-СН9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2 достоверно ( $p \leq 0,05$ ) повышают содержание хлорофилла *a*. Метаболиты штаммов бактерий *Bacillus cereus* 875TS в указанных концентрациях вызывают достоверное ( $p \leq 0,05$ ) снижение содержания хлорофилла *a* и каротиноидов в микрорастениях картофеля всех изучаемых сортов, тем самым снижая рост и развитие микрорастений.

В свою очередь все варианты штаммов достоверно повышают содержание хлорофилла *b*,

тем самым активизируя светособирающую способность растения и повышая общую активность процесса фотосинтеза. Это говорит о том, что штаммы *Bacillus cereus* 875TS потенциально могут обладать уникальными биохимическими, физиологическими свойствами, способными влиять на морфофизиологические и биохимические показатели растений.

### Выводы

В результате исследования из кернов многолетнемерзлых пород были выделены два штамма бактерий Установлено, что при совместном выращивании микрорастений картофеля в условиях *in vitro* на питательной среде Мурасиге–Скуга с вторичными метаболитами бактерий штаммов *Bacillus cereus* 9-08-СН9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2, внесенными в момент черенкования в дозе 250 мкл, оказывают наибольший стимулирующий эффект на морфогенез, ризогенез и процесс фотосинтеза что способствует ускорению метода клонального микрораз-

множения *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля.

### Список литературы / References

1. Ткаченко О.В., Евсеева Н.В., Бурьгин Г.Л., Каргаполова К.Ю., Лобачев Ю.В., Матора Л.Ю., Щеголев С.Ю. Эффективность культивирования клеток и тканей растений *in vitro* в присутствии бактерий и их метаболитов. *Биология клеток растений in vitro и биотехнология. Медисонт. XI Международная конференция «Биология клеток растений in vitro и биотехнология» (23–27 сентября 2018 года, г. Минск, Республика Беларусь)*. Минск; 2018:238–239.

Tkachenko O.V., Yevseeva N.V., Burygin G.L., Kargapolova K.Yu., Lobachev Yu.V., Matora L.Yu., Shchegolev S.Yu. *The biology of plant cells in vitro and biotechnology: Proceedings of the 11th International conference, September 23-27, 2018. Minsk, Republic of Belarus*. Minsk; 2018:238–239. (In Russ.)

2. Devi A.R., Kotoky R., Pandey P., Sharma G.D. Application of Bacillus spp. for Sustainable Cultivation of Potato (*Solanum tuberosum* L.) and the Benefits. *Bacilli and Agrobiotechnology*. Islam M., Rahman M., Pandey P., Jha C., Aeron A. (eds) 2016:185–221. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3_9)

3. Poveda J., González-Andrés F. *Bacillus* as a source of phytohormones for use in agriculture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2021;105:8629–8645. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11492-8>

4. Yadav A.N., Singh J., Rastegari A.A., Yadav N. *Plant microbiomes for sustainable agriculture*. Berlin: Springer; 2020.

5. Тимофеева С.В. *Исследование роли биотических и абиотических факторов в приживаемости интродуцируемых бактерий на первых этапах онтогенеза растений*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб.; 2000. 22 с.

Timofeeva S.V. *Investigation of the role of biotic and abiotic factors in the survival of introduced bacteria at the first stages of plant ontogenesis*: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., St.-Petersburg. 2000. 27 p. (In Russ.)

6. Субботин А.М., Нарушко М.В., Симонова Е.О. Отбор штаммов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород, по влиянию на адаптивные показатели растений. *Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции, г. Тюмень, 02–05 июля 2015 г.* Тюмень: Эпоха; 2015:372–374.

Subbotin A.M., Narushko M.V., Simonova Ye.O. Selection of strains of bacteria isolated from permafrost, according to their influence on the adaptive parameters of plants: *Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the Cryosphere: Proceedings of the International conference, Tyumen, July 02-05, 2015 Tyumen': Ehpokha*. 2015:372–374. (In Russ.)

7. Субботин А.М., Нарушко М.В., Боме Н.А., Петров С.А., Мальчевский В.А., Габдуллин М.А. Влияние микроорганизмов из многолетнемерзлых пород

на морфофизиологические показатели яровой пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016; 20(5):666–672. <https://doi.org/10.18699/VJ16.119>

Subbotin A.M., Narushko M.V., Bome N.A., Petrov S.A., Malchevskiy V.A., Gabdullin M.A. Influence of permafrost microorganisms on morphophysiological indicators of spring wheat. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(5):666–672. (In Russ.). <https://doi.org/10.18699/VJ16.119>

8. Субботин А.М., Нурпеисова А.С., Нарушко М.В. Влияние метаболитов бактерий из многолетнемерзлых пород на развитие меристемных растений *SALANUM TUBEROSUM*. *ВАВИЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2018: Международная научно-практическая конференция, посвященная 131-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова. Саратов, 28–29 ноября 2018 года*. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова; 2018:94–96.

Subbotin A.M., Nurpeisova A.S., Narushko M.V. Influence of bacterial metabolites from permafrost on the development of meristem plants *SALANUM TUBEROSUM*. *VAVILOV READINGS – 2018: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 131st anniversary of Academician N.I. Vavilov*. Saratov, November 28–29, 2018. Saratov: Saratov State Vavilov Agrarian University; 2018:94–96. (In Russ.)

9. Ренев Н.О., Мальчевский В.А., Субботин А.М. Использование метаболитов бактерий из многолетнемерзлых пород для повышения урожайности мини-клубней меристемных растений картофеля. *Биологически активные препараты для растениеводства: научное обоснование – рекомендации – практические результаты, г. Минск, 22 октября 2020*. Минск: БГУ; 2010:131–133.

Renev N.O., Malchevskiy V.A., Subbotin A.M. The use of bacterial metabolites from permafrost to increase the yield of mini-tubers of potato meristem plants. *Biologically active preparations for crop production: scientific rationale – recommendations – practical results, Minsk, October 22, 2020*. Minsk: BSU; 2020;131–133. (In Russ.)

10. Gerhardt P. *Manual of methods for general bacteriology*. Washington, DC 20006: American Society for Microbiology; 1981.

11. Dawson R.M.C., Elliott Daphne C., Elliott W.H., Jones K.M. (eds). *Data for Biochemical Research*. Oxford: Clarendon press, 1986.

12. Овэс Е.В., Анисимов Б.В. *Методические рекомендации по тиражированию in vitro материала для оригинального семеноводства картофеля*. М.: ФГБНУ ВНИИКХ; 2017. 25 с.

Oves Ye.V., Anisimov B.V. *Guidelines for in vitro replication of material for original potato seed production*. Moscow; 2017. 25 p. (In Russ.)

13. Удовенко Г.В., Семушина Л.А., Синельникова В.Н. Особенности различных методов оценки со-

леустойчивости растений. *Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды*. Л.: Колос; 1976:228–238.

Udoenko G.V., Semushina L.A., Sinelnikova V.N. Osobennosti razlichnykh metodov otsenki soleustoychivosti rasteniy. *Metody otsenki ustoychivosti rasteniy k neblagopriyatnym usloviyam sredy*. Leningrad: Kolos; 1976:228–238. (In Russ.)

14. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. *Большой практикум по фотосинтезу*. М.: АКАДЕМИА; 2003. 256 с.

Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V. *A guide to photosynthesis*. Moscow: ACADEMIA; 2003. 256 p. (In Russ.)

15. Wellburn A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.* 1994. 144 (3):307.

16. Björn L.O., Papageorgiou G.C., Blankenship R.E. Govindjee. A viewpoint: why chlorophyll a? *Photosynth. Res.* 2009;(99):85–98.

17. Esteban R., Barrutia O., Artetxe U., Fernández-Marín B., Hernández A., García-Plazaola J.I. Internal and external factors affecting photosynthetic pigment composition in plants: a meta-analytical approach. *N. Phytol.*; 2015:268–280.

18. Kiang N.Y., Siefert J., Govindjee, Blankenship R.E. Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of Earth organisms. *Astrobiology.* 2007;7(1):222–251

19. Kunugi M., Satoh S., Ihara K., Shibata K., Yamagishi Y., Kogame K., Obokata J., Takabayashi A., Tanaka A. Evolution of green plants accompanied changes in light-harvesting systems. *Plant Cell Physiol.*; 2016:1231–1243

20. Croft H., Chen J.M. *Leaf pigment content*. Amsterdam: Elsevier Inc. 2017.

21. Croft H. Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity. *Global Change Biol.* 2017. 23 (9). P. 3513–24.

22. Tamburini E. Development of FT-NIR models for the simultaneous estimation of chlorophyll and nitrogen content in fresh apple (*Malus domestica*) leaves. *Sensors*; 2015; 15(2):2662–2679.

23. Hotta Y. New physiological effects of 5-aminolevulinic acid in plants: the increase of photosynthesis, chlorophyll content, and plant growth. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 1997; 61 (12):2015–2028.

24. Wilkinson D.M. The adaptive significance of autumn leaf colours. *Oikos.* 2002; 99 (2): 402–407.

25. Davison P.A., Hunter C.N., Horton P. Overexpression of  $\beta$ -carotene hydroxylase enhances stress tolerance in *Arabidopsis*. *Nature*; 2002:418.

#### Об авторах

РЕНЁВ Николай Олегович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3531-2624>, Scopus AuthorID: 57222066155, РИНЦ AuthorID: 1034698, e-mail: solitary\_72@mail.ru

МАЛЬЧЕВСКИЙ Владимир Алексеевич, доктор медицинских наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1308-2899>, Scopus AuthorID: 57190758790, ResearcherID: G-9557-2015, РИНЦ AuthorID: 194927, e-mail: malchevski@mail.ru

СУББОТИН Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5135-3194>, Scopus AuthorID: 35776939200, ResearcherID: S-3256-2017, РИНЦ AuthorID: 607480, e-mail: subbotin.prion@yandex.ru

ПЕТРОВ Сергей Анатольевич, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1566-2299>, Scopus AuthorID: 57190756454, ResearcherID: A-7886-2016, РИНЦ AuthorID: 607480, e-mail: tumiki@yandex.ru

#### About the authors

RENEV, Nikolay Olegovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3531-2624>, Scopus AuthorID: 57222066155, RISC AuthorID: 1034698, e-mail: solitary\_72@mail.ru

MALCHEVSKY, Vladimir Alekseevich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Med.), <https://orcid.org/0000-0002-1308-2899>, ResearcherID: G-9557-2015, Scopus AuthorID: 57190758790, RISC AuthorID: 194927, e-mail: malchevski@mail.ru

SUBBOTIN, Andrey Mikhailovich, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5135-3194>, ResearcherID: S-3256-2017, Scopus AuthorID: 35776939200, RISC AuthorID: 607480, e-mail: subbotin.prion@yandex.ru

PETROV, Sergey Anatolievich, Dr. Sci. (Med.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1566-2299>, ResearcherID: A-7886-2016, Scopus AuthorID: 57190756454, RISC AuthorID: 607480, e-mail: tumiki@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 17.08.2022

Поступила после рецензирования / Revised 14.07.2023

Принята к публикации / Accepted 31.08.2023