

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1321

EDN: EFBJTI

УДК 57.084.1:579.64



Научная статья

ВЛИЯНИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ РОДА *BACILLUS* НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ *ALLIUM CERA*

А.А. Касторнов, С.А. Петров, А.М. Субботин

Аннотация

Обоснование. Криосфера является хранилищем древних экосистем, в частности дисперсных грунтов, перешедших в мерзлое состояние. Известно, что данные грунты содержат определенное количество как абиотических, так и биотических компонентов, в том числе бактериальных клеток, находящиеся в гипометаболическом состоянии с содержанием в одном грамме грунта порядка 10^4 - 10^6 КОЕ. Многолетнемёрзлые породы (вечная мерзлота) широко распространены в северном полушарии, их возраст достигает от сотен тысяч до миллионов лет, поэтому содержащиеся в них бактериальные компоненты в полной мере можно отнести к палеобактериям. Ассоциации современной флоры с арктическими палеобактериями вызывает интерес не только с точки зрения изучения фундаментальных основ взаимодействия различных организмов, но и как перспективный биотехнологический ресурс в адаптивном растениеводстве.

Цель исследований. Оценить влияния арктических палеобактерии рода *Bacillus* на морфологические показатели корней и перьев лука *Allium cera*, а также на его фотосинтетическую активность при различных температурах культивирования.

Материалы и методы. Объектом исследования был выбран лук *Allium cera*, так как данное растение чувствительно к различным факторам окружающей среды и является эталоном для изучения токсичности. Использовали бактерии рода *Bacillus* (штамм 875 TS), зарегистрированный во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов под регистрационным номером В-12242.

Оценивали морфологические показатели: количество корней и перьев, их длину и массу, количество темных и изогнутых корней и перьев, кон-

центрацию пигментов фотосинтеза в зеленой части проростков *Allium cepa* методом абсорбционной спектрофотометрии.

Результаты. Проведенные исследования показали, что бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород в концентрации 10^4 при температуре их инкубации 36°C оказывают наибольшее положительное влияние на содержание пигментов фотосинтеза, на корнеобеспечение и развитие вегетативной части лука *Allium cepa*.

Заключение. Бактерии рода *Bacillus* оказывают воздействие на развитие растения, в частности на формирование корневого и вегетативного аппарата, обогащают растения полезными веществами и являются перспективным биологическим ресурсом для разработки биопрепаратов в повышении урожайности сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: бактерии рода *Bacillus*; дисперсные обводненные мерзлые породы; *Allium cepa*; морфометрия; корневая и вегетативная система; пигменты фотосинтеза

Для цитирования. Касторнов, А. А., Петров, С. А., & Субботин, А. М. (2025). Влияние микроорганизмов рода *Bacillus* на морфологические параметры и фотосинтетический аппарат *Allium cepa*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 45-63. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1321>

Original article

THE INFLUENCE OF BACTERIA OF THE GENUS *BACILLUS* ON THE MORPHOLOGICAL PARAMETERS AND PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF *ALLIUM CEPA*

A.A. Kastornov, S.A. Petrov, A.M. Subbotin

Abstract

Background. The cryosphere is a repository of ancient ecosystems, in particular dispersed soils that have become frozen. It is known that these soils contain a certain amount of both abiotic and biotic components, including bacterial cells in a hypometabolic state with a content of about 10^4 - 10^6 CFU per gram of soil. Permafrost is widespread in the northern hemisphere, and its age ranges from hundreds of thousands to millions of years, so the bacterial components they contain can be fully attributed to paleobacteria. Modern flora associations with arctic paleobacteria are

of interest not only from the point of researching view the fundamental principles of interaction between various organisms, but also as a promising biotechnological resource in adaptive plant growing.

Purpose. To assess the influence of arctic paleobacteria of the genus *Bacillus* on the morphophysiological parameters of the roots and feathers of the onion *Allium cepa*, as well as its photosynthetic activity at different cultivation temperatures.

Materials and methods. The object of the study was the onion *Allium cepa*, since this plant is sensitive to various environmental factors and is a standard for studying toxicity. We used bacteria of the genus *Bacillus* (strain 875 TS), registered in the Russian National Collection of Industrial Microorganisms under registration number B-12242.

The following morphophysiological parameters were assessed: the number of roots and feathers, their length and weight, the number of dark and curved roots and feathers, the concentration of photosynthesis pigments in the green part of *Allium cepa* seedlings using absorption spectrophotometry.

Results. The conducted research have shown that bacteria of the genus *Bacillus* strain 875 TS from permafrost rocks in a concentration of 10^4 at an incubation temperature of 36°C have the greatest positive effect on the content of photosynthetic pigments, root provision and development of the vegetative part of the onion *Allium cepa*.

Conclusion. Bacteria of the genus *Bacillus* influence plant development, in particular, the formation of the root and vegetative apparatus, enrich plants with useful substances and are a promising biological resource for the development of biopreparations to increase the yield of agricultural crops.

Keywords: bacteria of the genus *Bacillus*; dispersed waterlogged frozen rocks; *Allium cepa*; morphometry; root and vegetative system; photosynthesis pigments

For citation. Kastornov, A. A., Petrov, S. A., & Subbotin, A. M. (2025). The influence of bacteria of the genus *Bacillus* on the morphological parameters and photosynthetic apparatus of *Allium cepa*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 45-63. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1321>

Введение

Современное состояние криосферы определяется наличием льда в атмосфере, гидросфере, на поверхности земли и в подземных слоях, а также микробиоты, обитающей в дисперсных обводненных породах, находящихся в мёрзлом состоянии [11; 17]. Обводненные мерзлотные породы широко распространены в Северном полушарии и имеют возраст, достигающий сотен тысяч и миллионов лет [12]. Они содержат микроорганизмы, возраст

которых сопоставим с возрастом мерзлых почв [15]. Исследования показывают, что с начала индустриальной эпохи средняя температура воздуха на Земле увеличилась более чем на 1 градус. При этом процесс глобального потепления в Арктике происходит значительно быстрее, что приводит к деградации дисперсных обводненных пород, находящихся в мерзлом состоянии, и как следствие - к выносу реликтовой микробиоты в современные экосистемы. Однако информации о её влиянии на современную флору и фауну недостаточно.

Многообразие форм микроорганизмов в биоценозах определяют их взаимоотношения в виде фундаментальной стратегии к самосохранению. Некоторые виды симбиотически тесно связаны друг с другом и их выживание в значительной мере зависит от их союзников (мутуализм, комменсализм). Другие микроорганизмы, наоборот, вступают в жесткую конкуренцию (антагонизм) и борются за ограниченные ресурсы, такие как питательные вещества, свет и территория [16].

Арктические экосистемы, в которых обитают микроорганизмы, играют важную роль для северных территорий. По причине того, что эти экосистемы наиболее чувствительны и подвержены воздействию изменений климата, в том числе деградации вечной мерзлоты, биологический потенциал микробиоты в данных условиях стал определяющим. Новые технологии существенно расширили знания о составе, функциональном состоянии и поведении микроорганизмов дисперсных обводненных пород в холодных средах [2; 11].

Исследование биологических свойств *Bacillus sp.* из дисперсных обводненных мерзлых породах показало наличие у бактерий иммуномодулирующего и геронтологического эффекта: увеличение продолжительности жизни и улучшение физического состояния лабораторных животных [8; 16]. Имеются также литературные данные о влиянии палеобактерий рода *Bacillus sp.* на морфофизиологические показатели зерновых и зернобобовых культуры [1; 13; 23]. Тем не менее, остается недостаточно экспериментальных данных для обоснования использования биологического потенциала уникальных свойств арктических палеобактерий в разработке технологий для решения актуальных практических задач сельского хозяйства. В частности, исследование микробиоты арктических палеоэкосистем представляется перспективной и современной областью научных знаний в развитии адаптивного растениеводства [22].

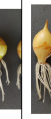
Цель исследований – оценка влияния палеобактерии рода *Bacillus* на морфофизиологические показатели *Allium cepa*, при различных температурах культивирования.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования был выбран лук *Allium cepa* (сорт Центурион F1), который является общепризнанной и популярной тест-системой *in vivo* для оценки биологических эффектов влияния различных химических, физических и биологических факторов и рекомендован экспертами ВОЗ в качестве стандарта при мониторинге окружающей среды и изучения влияния факторов окружающей среды на современные экосистемы [7; 10; 20].

Дизайн исследования приведен в табл. 1. Выборка луковиц для эксперимента была однородной. Масса луковицы составила в среднем 3,21 г, а диаметр их – от 1,6 до 2 см.

Таблица 1.

Дизайн исследования											
Контроль		Бактерий/мл									Сум.
		10 ⁵			10 ⁴			10 ³			
		t° культивирования									
1	2	5°C	23°C	36°C	5°C	23°C	36°C	5°C	23°C	36°C	
Количество лукоины, шт											
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	33
											

Использовали бактерии рода *Bacillus* (штамм 875 TS), зарегистрированный во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов под регистрационным номером В-12242. Бактерии культивировали 48 часов на скошенном питательном ГРМ при температуре 26°C после чего их дополнительно инкубировали 72 часа при температурах 5°C, 23°C и 36°C для модификации их метаболической активности.

Затем бактерии отмывали с поверхности агара 5 мл стерильной дистиллированной воды. В эксперименте использовались концентрации 10³, 10⁴, и 10⁵ микробных клеток в 1 мл дистиллированной воды. Луковицы находились в соответствующих суспензиях бактериальных клеток в фитотроне при средней температуре 25°C и влажности воздуха 27% в течение 5 суток. Корни и перья лука, выращенных на дистиллированной воде, служили контролем №1, а на смыве с чистого ГРМ агара – контролем №2. Для оценки морфометрических показателей использовали следующие параметры: количество корней и перьев, их длину и массу, а также количество темных и изогнутых корней и перьев.

Проводился анализ корнеобеспеченности по формуле [5]:

$$K = mП/mK, \quad (1),$$

где:

mП – масса перьев

mK – масса корней

Оценка концентрации пигментов фотосинтеза в зеленой части проростков *Allium cepa* проводилась методом абсорбционной спектрофотометрии. В качестве полярного растворителя использовали 96% этанол, навеску 100 мг. Зеленую часть каждого растения измельчали в фарфоровой ступке с добавлением небольшого количества безводного сульфата натрия (Na_2SO_4) до образования однородного окрашенного порошка. С помощью металлического шпателя порошок из ступки помещали в пробирку, добавляли 8 мл 96% этанола. Пробирку встряхивали и давали осадку отстояться. Надосадочную жидкость удаляли механическим дозатором, осторожно, не касаясь осадка и помещали в кюветы спектрофотометра с толщиной поглощающего слоя 10 мм. Оптическую плотность экстракта определяли с помощью спектрофотометра ПЭ-5400УФ и регистрировали при длине волны 665, 649 и 440 нм. В качестве контроля использовали чистый растворитель (96% спирт).

Концентрацию хлорофилла а и b в объеме кюветы спектрофотометра рассчитывали по формулам [24]:

$$Хл.а = 13,70 \cdot A_{665} - 5,76 \cdot A_{649} \quad (2);$$

$$Хл.б = 25,80 \cdot A_{649} - 7,60 \cdot A_{665} \quad (3);$$

$$Хл.а+б = 6,10 \cdot A_{665} - 20,04 \cdot A_{649} \quad (4);$$

где А – оптическая плотность при данной длине волны

Концентрацию β-каротина рассчитывали по формуле [3]:

$$Смг\% = (Dx \cdot W \cdot 1000) / (E_{1\text{ см}}^{1\%} \cdot A) \quad (5),$$

где:

Dx – оптическая плотность исследуемого раствора;

W – объем кюветы, равный 8 мл

$E_{1\text{ см}}^{1\%}$ – удельный показатель поглощения β-каротина, равный 2500

A – навеска экстракта, взятая на анализ, г.

Исследуемые данные были обработаны с использованием интегрированного статистического программного комплекса «SPSS Statistics 23 для операционной системы Windows 10». Различия принимались статистически значимыми при уровне значимости t-критерий Стьюдента $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе роста и развития лука на смыве с чистой питательной среды (контроль 2) на 5 сутки выявлено подавление только развития кор-

невой системы *Allium cepa* по сравнению с контролем 1, что проявилось в задержке образования количества корней в 1,35 раза и появлении темных деформированных корешков (табл. 2).

Тем не менее, это не повлияло на интегрированный показатель корнеобеспеченности. Поэтому в последующем при изучении влияния бактерий рода *Bacillus cereus* штамма 875 TS на развитие корневой системы лука *Allium cepa* полученные данные сравнивали с контролем 2.

Таблица 2.

Влияние штамма 875 TS на корневую систему лука в различных концентрациях и температурах инкубации на 5 день

№ п/п	Параметры	t°C	Контроль 1	Контроль 2	Концентрация			
					10 ⁵	10 ⁴	10 ³	Тренд
1.	Кол-во корней, шт	5°C	30,66±1,65	23,00±1,26**	24,67±1,80*	26,33±0,92*/#	15,67±5,34*	y = -4,5x + 31,22 R ² = 0,61
		23°C	30,66±1,65	23,00±1,26**	26,67±0,92*/#	25,00±0,73**	29,67±2,56	y = 1,5x + 24,11 R ² = 0,40
		36°C	30,66±1,65	23,00±1,26**	24,67±1,28*	20,33±0,76***	21,67±1,17***	y = -1,5x + 25,22 R ² = 0,46
2.	Длина корней, см	5°C	2,34±0,24	2,77±0,31	2,49±0,04	2,49±0,06	1,29±0,42*/#	y = -0,60x + 3,30 R ² = 0,75
		23°C	2,34±0,24	2,77±0,31	2,64±0,11	2,32±0,12	2,41±0,03	y = -0,12x + 2,69 R ² = 0,49
		36°C	2,34±0,24	2,77±0,31	2,58±0,13	2,03±0,13#	2,58±0,16	y = 0,00x + 2,39 R ² = 3E-05
3.	Масса корней, г	5°C	0,34±0,05	0,23±0,02	0,24±0,03	0,23±0,02	0,20±0,07	y = -0,02x + 0,27 R ² = 0,88
		23°C	0,34±0,05	0,23±0,02	0,23±0,01	0,33±0,02##	0,29±0,05	y = 0,03x + 0,22 R ² = 0,38
		36°C	0,34±0,05	0,23±0,02	0,30±0,03	0,17±0,01**/#	0,27±0,02	y = -0,01x + 0,27 R ² = 0,03
4.	Кол-во темных корней, шт	5°C	0,00±0,00	1,33±0,2***	1,00±0,36*	0,00±0,00##	0,00±0,00##	y = -0,5x + 1,33 R ² = 0,75
		23°C	0,00±0,00	1,33±0,2***	0,00±0,00###	0,00±0,00###	0,00±0,00###	
		36°C	0,00±0,00	1,33±0,2***	0,00±0,00##	0,00±0,00##	0,00±0,00##	

5.	Кол-во изогнутых корней, шт	5°C	1,33± 0,56	2,33± 0,21	1,00±0,00 ##	2,67±0,42	2,33±0,76	$y = 0,67x + 0,67$ $R^2 = 0,57$
		23°C	1,33± 0,56	2,33± 0,21	3,33±0,21 **/###	2,67±0,56	3,00±0,73	$y = -0,17x + 3,33$ $R^2 = 0,25$
		36°C	1,33± 0,56	2,33± 0,21	0,67±0,21 ##	1,67±0,42	0,00±0,00 */###	$y = -0,33x + 1,44$ $R^2 = 0,16$

Примечание: * - статистическая значимость различий с контролем 1 (* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$); # - статистическая значимость различий с контролем 2 (# - $p < 0,05$; ## - $p < 0,01$).

На первом этапе исследования было проанализировано влияние концентрации бактерий на развитие корневой и вегетативной части лука. Установлено, что при инкубации бактерий при температуре +5°C с увеличением концентрации бактериальных клеток имеется тенденция к росту количества корешков ($y = -4,5x + 31,22$ при $R^2 = 0,61$), их длины ($y = -0,60x + 3,30$ при $R^2 = 0,75$), массы ($y = -0,02x + 0,27$ при $R^2 = 0,88$) и появление патологических корешков ($y = -0,5x + 1,33$ при $R^2 = 0,75$) с высоким коэффициентом аппроксимации. В таблице 2 показано, что с увеличением концентрации бактерий с 10^3 до 10^5 наблюдается явная задержка развития корневой системы лука. Особенно выраженный эффект был получен при концентрации *Bacillus cereus* в 10^4 – количество корней увеличивалось до $26,33 \pm 0,92$ по сравнению с контролем 2 ($23,00 \pm 1,26$ при $p < 0,05$).

В тоже время, на развитие вегетативной части оказывало влияние концентрация бактерий при инкубации их при температуре +23°C (табл. 3).

При данной температуре с уменьшением концентрации бактерий с 10^5 до 10^3 наблюдается статистически значимая задержка как количества перьев ($y = -0,83x + 2,67$ при $R^2 = 0,89$), так и их длины ($y = -0,47x + 1,63$ при $R^2 = 0,61$). Инкубация бактерий при температуре +36°C с увеличением концентрации микробных клеток с 10^3 до 10^5 наблюдается возрастание количества ($y = 0,17x + 0,89$ при $R^2 = 0,75$) и длины перьев ($y = 0,09x + 0,64$ при $R^2 = 0,75$). Активация роста зелёной части растений соответствующим образом влияет на увеличение в 13,5 раз значения интегрального коэффициента корнеобеспеченности, который характеризует соотношения баланса между корневой и вегетативной системой растения.

Проведенные исследования показали, что наибольшее положительное влияние на корнеобеспеченность и развитие вегетативной части лука *Allium cepa* оказывают бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород в концентрации 10^4 при температуре их инкубации 36°C.

Таблица 3.

Влияние штамма 875 TS на вегетативную систему лука и корнеобеспеченность в различных концентрациях и температурах инкубации на 5 день

№ п/п	Параметры	t°C	Контроль 1	Контроль 2	Концентрация			
					10 ⁵	10 ⁴	10 ³	Тренд
1.	Кол-во перьев, шт	5°C	1,00±0,36	0,67±0,42	0,67±0,42	0,33±0,21	0,67±0,42	
		23°C	1,00±0,36	0,67±0,42	1,67±0,21 #	1,33±0,56	0,00±0,00 *	y = -0,83x + 2,67 R ² = 0,89
		36°C	1,00±0,36	0,67±0,42	1,00±0,36	1,33±0,42	1,33±0,42	y = 0,17x + 0,89 R ² = 0,75
2.	Длина перьев, см	5°C	1,10±0,40	0,77±0,48	0,58±0,37	0,30±0,19	0,73±0,46	y = 0,08x + 0,39 R ² = 0,12
		23°C	1,10±0,40	0,77±0,48	0,94±0,08	1,12±0,46	0,00±0,00 *	y = -0,47x + 1,63 R ² = 0,61
		36°C	1,10±0,40	0,77±0,48	0,77±0,25	0,77±0,31	0,95±0,31	y = 0,09x + 0,64 R ² = 0,25
3.	Масса перьев, г	5°C	0,07±0,02	0,04±0,03	0,02±0,02	0,01±0,00 *	0,04±0,02	y = 0,01x + 0,02 R ² = 0,10
		23°C	0,07±0,02	0,04±0,03	0,05±0,01	0,11±0,05	0,00±0,00 **	y = -0,03x + 0,11 R ² = 0,25
		36°C	0,07±0,02	0,04±0,03	0,04±0,02	0,39±0,17 #	0,04±0,02	y = 0,00x + 0,15 R ² = 0,00
4.	Корнеоб-сть, у.е.	5°C	0,17±0,05	0,16±0,10	0,14±0,09	0,03±0,02 *	0,18±0,12	y = 0,02x + 0,08 R ² = 0,07
		23°C	0,17±0,05	0,16±0,10	0,24±0,04	0,35±0,16	0,00±0,00 **	y = -0,12x + 0,44 R ² = 0,45
		36°C	0,17±0,05	0,16±0,10	0,12±0,06	2,17±0,91 */#	0,15±0,05	y = 0,01x + 0,78 R ² = 0,00

Примечание: * - достоверность различий с контролем 1 (* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$); # - достоверность различий с контролем 2 (# - $p < 0,05$; ## - $p < 0,01$).

Установлено, что при инкубации бактерий при температуре +36°C с увеличением концентрации бактериальных клеток имеется тенденция к росту показателя chl b ($y = 0,84x + 5,13$ при $R^2 = 0,90$), суммы chl a и b ($y = 1,06x + 7,53$ при $R^2 = 0,86$), β -каротина ($y = 1,03x + 11,09$ при $R^2 = 0,83$) с высоким коэффициентом аппроксимации (табл. 4).

Также показано, что с увеличением концентрации с 10^3 до 10^5 наблюдается увеличение показателей фотосинтетической активности зеленой части лука. Особенно выраженный эффект был получен при концентрации *Bacillus cereus* в 10^4 – показатель chl b увеличился в 7,5 раз и составил $4,44 \pm 1,72$ по сравнению с контролем 2 ($0,59 \pm 0,37$ при $p < 0,05$). Показатель суммы хлорофиллов а и b увеличился в 4,73 раза и составил $6,72 \pm 2,53$ по сравнению с контролем 2 ($1,42 \pm 0,90$ при $p < 0,05$).

Таблица 4.

**Влияние штамма 875 TS на фотосинтетическую активность лука
в различных концентрациях и температурах инкубации на 5 день**

№ п/п	Параметры	t°C	Контроль 1	Контроль 2	Концентрация			Тренд
					10 ⁵	10 ⁴	10 ³	
	Chl a, мг/г	5°C	1,89±0,60	0,83±0,53	1,12±0,71	0,73±0,46	1,21±0,77	$y = 0,05x + 0,92$ $R^2 = 0,04$
		23°C	1,89±0,60	0,83±0,53	2,28±0,08 #	2,11±0,75	0,00±0,00 **	$y = -1,14x + 3,74$ $R^2 = 0,81$
		36°C	1,89±0,60	0,83±0,53	2,27±0,81	1,77±0,56	1,83±0,58	$y = -0,22x + 2,40$ $R^2 = 0,65$
2.	Chl b, мг/г	5°C	0,85±0,35	0,59±0,37	1,93±1,22	1,36±0,86	1,56±0,98	$y = -0,19x + 1,99$ $R^2 = 0,42$
		23°C	0,85±0,35	0,59±0,37	3,78±0,41 ***/###	2,79±0,89 */#	0,00±0,00 *	$y = -1,89x + 5,98$ $R^2 = 0,93$
		36°C	0,85±0,35	0,59±0,37	4,44±1,72 */#	3,12±1,06 */#	2,76±0,90 #	$y = -0,84x + 5,13$ $R^2 = 0,90$
3.	a+b, мг/г	5°C	2,74±0,89	1,42±0,90	3,05±1,93	2,09±1,32	2,77±1,75	$y = -0,14x + 2,92$ $R^2 = 0,08$
		23°C	2,74±0,89	1,42±0,90	6,06±0,47 **/###	4,90±1,61	0,00±0,00 **	$y = -3,03x + 9,72$ $R^2 = 0,89$
		36°C	2,74±0,89	1,42±0,90	6,72±2,53 #	4,90±1,59 #	4,59±1,46	$y = -1,06x + 7,53$ $R^2 = 0,86$
4.	β-каротин, мг/г	5°C	8,20±2,59	4,32±2,73	5,78±3,66	3,27±2,07	6,05±3,82	$y = 0,13x + 4,77$ $R^2 = 0,01$
		23°C	8,20±2,59	4,32±2,73	10,45±0,62 #	9,49±3,49	0,00±0,00 **	$y = -5,23x + 17,10$ $R^2 = 0,82$
		36°C	8,20±2,59	4,32±2,73	10,34±3,68	8,49±2,69	8,28±2,64	$y = -1,03x + 11,09$ $R^2 = 0,83$
5.	a/b, у.е.	5°C	2,02±0,87	0,47±0,30	0,19±0,12 *	0,18±0,11 *	0,26±0,16 *	$y = 0,03x + 0,14$ $R^2 = 0,60$
		23°C	2,02±0,87	0,47±0,30	0,63±0,05	0,49±0,17	0,00±0,00 *	$y = -0,31x + 1,00$ $R^2 = 0,90$
		36°C	2,02±0,87	0,47±0,30	0,36±0,12	0,40±0,14	0,46±0,15	$y = 0,05x + 0,31$ $R^2 = 0,99$

Примечание: * - достоверность различий с контролем 1 (* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$); # - достоверность различий с контролем 2 (# - $p < 0,05$; ## - $p < 0,01$).

Таким образом, показано, что бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород оказывают существенное влияние на фотосинтетическую активность и тем самым регулирует трансформирование энергии солнечного света в энергию химических связей органических соединений через такие ключевые пигменты фотосинтеза как chl a, chl b и β-каротин.

Заключение

Все чаще становится очевидным, что для поддержания устойчивого производства сельскохозяйственных культур в изменяющихся условиях окружающей среды разработка и внедрение возможностей инженерии корневой системы растений предоставляет перспективной. Специфические для корней черты, такие как архитектура корневой системы, восприятие эдафического стресса и коммуникация между корнями и побегами, могут быть использованы для улучшения захвата полезных веществ, воды из почвы и повышения адаптационных потенциалов растения. Эти реакции часто используют микроорганизмы и их метаболиты, которые можно применять с помощью обычных (например, прививка) или биотехнологических генетических подходов (например, промоторы, специфичные для корней) для непосредственного улучшения этих черт и, следовательно, производительности растений.

Последние данные свидетельствуют о том, что биопрепараты влияют на синтез корнями цитокининов и могут повышать устойчивость растений к абиотическим факторам внешней среды, вызванное экологическим стрессом [19], а также опосредовать устойчивость к болезням и вредителям [14; 21]. Манипулирование биотическими взаимодействиями в ризосфере на уровне коммуникации (гормоны и другие биоактивные соединения) можно использовать в адаптивном растениеводстве.

Известно, что бактерии рода *Bacillus* участвуют во время роста растения, принимая участие в формировании корневого и вегетативного аппарата, насыщают растения полезными веществами и являются перспективными ресурсами в качестве биоудобрения и повышения урожайности зерновых и зернобобовых культур [23].

Проведенные нами исследования показали, что наибольшее положительное влияние на корнеобеспечение лука *Allium cepa* оказывают бактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS из многолетнемерзлых пород в концентрации 10^4 при температуре их инкубации 36°C. Достигнутый оптимальный баланс корнеобеспечения под воздействием *Bacillus* штамм 875 TS проявляется в активном развитии и вегетативной системы растения, что выражается в показателях урожайности *Allium cepa*: масса перьев увеличивается в 9,75 раз. Следовательно, палеобактерии рода *Bacillus* штамм 875 TS являются перспективным биотехнологическим ресурсом в развитии адаптивного растениеводства. При этом показано, что влияние палеобактерий рода *Bacillus* штамма 875 TS из арктических палеоэкосистем на морфофизиологические характеристики *Allium cepa* значительно зависит от таких факторов как: концентрация микроорганизмов и температура их инкубации.

Один из механизмов оптимальной регуляции корневой системы на развития биологическую продуктивность растений является фотосинтетическая система, ключевыми пигментами которой являются хлорофилл а и хлорофилл b [4; 6]. Через хлорофилл а происходит преобразование энергии света в энергию разделения зарядов в процессе оксигенного фотосинтеза, а через хлорофилл b – сбор света при слабом освещении и рассеиванию избытка поглощенной энергии при сильном освещении [8]. Через другой компонент фотосинтеза – β -каротин происходит защита фотосинтетического аппарата от фотоокисления на слишком ярком свете. Механизм защитного действия его заключается в том, что энергия возбуждения триплетного хлорофилла и синглетного кислорода резонансным путем передается на каротиноиды, а затем рассеивается в виде тепла.

Установлено, что бактерий палеобактерий рода *Bacillus* штамма 875 TS через корневую систему растения вызывают рост chl b, суммы chl a и b, β -каротина. Особенно выраженный эффект был получен при концентрации *Bacillus cereus* в 10^4 – показатель chl b увеличился в 7,5 раз, сумма хлорофиллов а и b - в 4,73 раза.

Таким образом, возможно создание биопрепарата для повышения урожайности лука, который будет представлять собой культуральную жидкость, содержащие природные штаммы микроорганизмов из многолетних мерзлых пород, улучшенные естественным и искусственным отбором. Действующими веществами будет являться комплекс биологически активных веществ - продукты метаболизма бактериальных клеток. Данные продукты участвуют в стимуляции растений в ризосфере. В дальнейшем подобные исследования должны быть сосредоточены на получении информации о физиологических и генетических детерминантах такой производительности и о механизмах оптимальной регуляции *in radix*.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках государственного задания на 2021-2030 годы «Пространственно-временные явления и процессы, происходящие в водах земли Сибири в условиях современного техногенеза и изменения климата» (Приоритетное направление 1.5.11. Программа 1.5.11.1).

Список литературы

1. Бажин, А. С., Субботин, А. М., Петров, С. А., Нарушко, М. В., & Каленова, Л. Ф. (2021). Влияние буровых шламов разной степени очистки на морфофизиологические показатели злаковых растений. В *Сборник материалов международной конференции «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике»* (с. 43–46). Салехард. <https://doi.org/10.7868/9785604610848009>. EDN: <https://elibrary.ru/YTRKWN>
2. Петров, С. А., Еноктаева, О. В., Субботин, А. М., & Мальчевский, В. А. (2015). Комплексная балловая система оценки воздействия микроорганизмов на пролиферацию клеток корневой меристемы *Allium cepa* L. *Фундаментальные исследования*, 7-4, 687–690. EDN: <https://elibrary.ru/UGAQNJ>
3. Ландина, Л. Н. (2021). Стандартизация сухого экстракта сока мякоти тыквы, обладающего гиполипидемическим действием по содержанию β-каротина. *Медицина*, 1, 79–92. <https://doi.org/10.29234/2308-9113-2021-9-1-79-92>. EDN: <https://elibrary.ru/JIHQOO>
4. Лаханов, А. П., Коломейченко, В. В., & Фесенко, Н. В. (2004). *Морфофизиология и продукционный процесс гречихи* (435 с.). Орёл: Орловский государственный аграрный университет. EDN: <https://elibrary.ru/PBXPZZ>
5. Коробко, В. В., Пчелинцева, Н. В., Лунёва, М. А., & Самсонова, Е. А. (2017). Особенности роста и развития проростков пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при действии 2,4,6-трифенил-3,5-дихлорпиридина и 2,6-дифенил-3-хлорпиридина. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*, 17(1), 72–78. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2017-17-1-72-78>. EDN: <https://elibrary.ru/YKKJAB>
6. Иванов, Л. А., Ронжина, Д. А., Юдина, П. К., Золотарева, Н. В., & Калашникова, И. В. (2020). Сезонная динамика содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях степных и лесных растений на уровне вида и сообщества. *Russian Journal of Plant Physiology*, 67(3), 278–288. <https://doi.org/10.31857/S0015330320030112>. EDN: <https://elibrary.ru/XMYDPZ>
7. Курбанова, М. Н., Сураева, Н. М., Рачкова, В. П., & Самойлов, А. В. (2018). Сравнительное изучение показателей токсической активности в Аллиум-тесте. *Аграрный вестник Урала*, 4(171), 25–30. EDN: <https://elibrary.ru/XUCOKD>
8. Тютерева, Е. В., Иванова, А. Н., & Войцеховская, О. В. (2014). К вопросу о роли хлорофилла b в онтогенетических адаптациях растений. *Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН*, 134(3), 249–256. EDN: <https://elibrary.ru/SGZRUX>

9. Субботин, А. М., Петров, С. А., Мальчевский, В. А., & Хрупа, Д. А. (2018). Цитогенетический анализ влияния бактерий *Serratia fonticola*, выделенных из проб многолетнемерзлых пород, на клетки корневой системы *Allium cepa* L. В *Тезисы докладов XI Международной конференции «Биология клеток растений in vitro и биотехнология»* (с. 220–221). Минск. EDN: <https://elibrary.ru/YRDMFV>
10. Basu, S., & Tripura, K. (2021). Differential sensitivity of *Allium cepa* L. and *Vicia faba* L. to aqueous extracts of *Cascabela thevetia* (L.) Lippold. *South African Journal of Botany*, 139, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.033>. EDN: <https://elibrary.ru/UKTTBB>
11. Collins, T., & Margesin, R. (2019). Microbial ecology of the cryosphere (glacial and permafrost habitats): current knowledge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 2537–2549. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09631-3>. EDN: <https://elibrary.ru/UOMKYI>
12. Liang, R., Li, Z., Lau Vetter, M. C. Y., et al. (2021). Genomic reconstruction of fossil and living microorganisms in ancient Siberian permafrost. *Microbiome*, 9, 110. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01057-2>. EDN: <https://elibrary.ru/DCXMWZ>
13. Renev, N. O., Rodina, E. S., Subbotin, A. M., & Malchevskiy, V. A. (2021). Influence of bacterial metabolites from permafrost on morphophysiological parameters of potato material in vitro. In *International Scientific and Practical Conference “Fundamental Scientific Research and Their Applied Aspects in Biotechnology and Agriculture” (FSRAABA 2021)* [BIO Web of Conferences, vol. 36, article 05009]. Tyumen. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213605009>. EDN: <https://elibrary.ru/XSQJDD>
14. Smigocki, A. C., Heu, S., Mccanna, I., Wozniak, C., & Buta, G. (1997). Insecticidal compounds induced by regulated overproduction of cytokinins in transgenic plants. In N. Carozzi & M. Koziel (Eds.), *Advances in insect control: the role of transgenic plants* (pp. 225–236). Bristol.
15. Jansson, J. K., & Taş, N. (2014). The microbial ecology of permafrost. *Nature Reviews Microbiology*, 12, 414–425. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3262>. EDN: <https://elibrary.ru/SOEPQH>
16. Bauer, M. A., Kainz, K., Carmona-Gutierrez, D., & Madeo, F. (2018). Microbial wars: competition in ecological niches and within the microbiome. *Microbial Cell*, 5(5), 215–219.
17. Panikov, N. S. (2009). Microbial activity in frozen soils. In R. Margesin (Ed.), *Permafrost Soils* (pp. 119–147). Innsbruck.
18. Brouckov, A. V., Trofimova, Y. B., Melnikov, V. P., Sukhovei, Y. G., Griva, G. I., Kalenova, L. F., Subbotin, A. M., Repin, V. E., Brenner, E. V., Tanaka, M., Katayama, T., & Utsumi, M. (2011). Relict microorganisms of cryolithozone as

- possible objects of gerontology. *Advances in Gerontology*, 39–44. <https://doi.org/10.1134/S207905701101005X>. EDN: <https://elibrary.ru/RHEVRD>
19. Ghanem, M. E., Albacete, A., Smigocki, A. C., Frebort, I., Pospíšilová, H., Martínez-Andújar, C., Acosta, M., Sanchez-Bravo, J., Lutts, S., Dodd, I. C., & Pérez-Alfocea, F. (2011). Root-synthesised cytokinins improve shoot growth and fruit yield in salinised tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 62, 125–140. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq266>. EDN: <https://elibrary.ru/OARSPZ>
 20. Smigocki, A. C., Heu, S., & Buta, S. G. (2000). Analysis of insecticidal activity in transgenic plants carrying the IPT plant growth hormone gene. *Acta Physiologiae Plantarum*, 22, 295–299. <https://doi.org/10.1007/s11738-000-0038-x>. EDN: <https://elibrary.ru/VAHFDA>
 21. Souza, C. P., Guedes, T. A., & Fontanetti, C. S. (2016). Evaluation of herbicides action on plant bioindicators by genetic biomarkers: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188.
 22. Kastornov, A. A., Subbotin, A. M., & Petrov, S. A. (2022). The influence of microorganisms of the Arctic paleoecosystems on the morphometric parameters and the cytogenetic apparatus of *Allium cepa*. In *Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N. I. Vavilov* [BIO Web of Conferences, vol. 43, article 03013]. Saratov. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224303013>. EDN: <https://elibrary.ru/UCFFKT>
 23. Timofeev, V. N., & Subbotin, A. M. (2024). Preparations based on bacteria from frozen rocks during the dressing of spring wheat seeds. *BIO Web of Conferences*, 108, article 10006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410810006>. EDN: <https://elibrary.ru/SMQVPA>
 24. Winternans, J. F., & de Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their phenophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Biophysics including Photosynthesis*, 109, 448–453. [https://doi.org/10.1016/0926-6585\(65\)90170-6](https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6)

References

1. Bazin, A. S., Subbotin, A. M., Petrov, S. A., Narushko, M. V., & Kalenova, L. F. (2021). Effect of drilling cuttings with different purification degrees on morphophysiological parameters of cereal plants. In *Proceedings of the international conference “Modern studies of cryosphere transformation and issues of geo-technical safety of structures in the Arctic”* (pp. 43–46). Salekhard. <https://doi.org/10.7868/9785604610848009>. EDN: <https://elibrary.ru/YTRKWN>
2. Petrov, S. A., Enoktaeva, O. V., Subbotin, A. M., & Malchevsky, V. A. (2015). Comprehensive scoring system for assessing the impact of microorganisms on

- cell proliferation of *Allium cepa* L. root meristem. *Fundamental Research*, 7-4, 687–690. EDN: <https://elibrary.ru/UGAQNJ>
3. Landina, L. N. (2021). Standardization of dry extract of pumpkin pulp juice with hypolipidemic effect by β -carotene content. *Medicine*, 1, 79–92. <https://doi.org/10.29234/2308-9113-2021-9-1-79-92>. EDN: <https://elibrary.ru/JIHQOO>
 4. Lakhanov, A. P., Kolomeichenko, V. V., & Fesenko, N. V. (2004). *Morphophysiology and production process of buckwheat* (435 pp.). Oryol: Oryol State Agrarian University. EDN: <https://elibrary.ru/PBXPZZ>
 5. Korobko, V. V., Pchelintseva, N. V., Luneva, M. A., & Samsonova, E. A. (2017). Features of growth and development of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) under the influence of 2,4,6-triphenyl-3,5-dichloropyridine and 2,6-diphenyl-3-chloropyridine. *Proceedings of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*, 17(1), 72–78. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2017-17-1-72-78>. EDN: <https://elibrary.ru/YKKJAB>
 6. Ivanov, L. A., Ronzhina, D. A., Yudina, P. K., Zolotareva, N. V., & Kalashnikova, I. V. (2020). Seasonal dynamics of chlorophyll and carotenoid content in leaves of steppe and forest plants at species and community levels. *Russian Journal of Plant Physiology*, 67(3), 278–288. <https://doi.org/10.31857/S0015330320030112>. EDN: <https://elibrary.ru/XMYDPZ>
 7. Kurbanova, M. N., Suraeva, N. M., Rachkova, V. P., & Samoilov, A. V. (2018). Comparative study of toxic activity indicators in the *Allium* test. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 4(171), 25–30. EDN: <https://elibrary.ru/XUCOKD>
 8. Tytereva, E. V., Ivanova, A. N., & Voitsukhovskaya, O. V. (2014). On the role of chlorophyll b in ontogenetic adaptations of plants. *Komarov Botanical Institute of the RAS*, 134(3), 249–256. EDN: <https://elibrary.ru/SGZRUX>
 9. Subbotin, A. M., Petrov, S. A., Malchevsky, V. A., & Khrupa, D. A. (2018). Cytogenetic analysis of the impact of *Serratia fonticola* bacteria isolated from permafrost samples on *Allium cepa* L. root system cells. In *Abstracts of the XI International Conference “Plant Cell Biology in vitro and Biotechnology”* (pp. 220–221). Minsk. EDN: <https://elibrary.ru/YRDMFV>
 10. Basu, S., & Tripura, K. (2021). Differential sensitivity of *Allium cepa* L. and *Vicia faba* L. to aqueous extracts of *Cascabela thevetia* (L.) Lippold. *South African Journal of Botany*, 139, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.033>. EDN: <https://elibrary.ru/UKTTBB>
 11. Collins, T., & Margesin, R. (2019). Microbial ecology of the cryosphere (glacial and permafrost habitats): current knowledge. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 2537–2549. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09631-3>. EDN: <https://elibrary.ru/UOMKYI>

12. Liang, R., Li, Z., Lau Vetter, M. C. Y., et al. (2021). Genomic reconstruction of fossil and living microorganisms in ancient Siberian permafrost. *Microbiome*, 9, 110. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01057-2>. EDN: <https://elibrary.ru/DCXMWZ>
13. Renev, N. O., Rodina, E. S., Subbotin, A. M., & Malchevskiy, V. A. (2021). Influence of bacterial metabolites from permafrost on morphophysiological parameters of potato material in vitro. In *International Scientific and Practical Conference "Fundamental Scientific Research and Their Applied Aspects in Biotechnology and Agriculture" (FSRAABA 2021)* [BIO Web of Conferences, vol. 36, article 05009]. Tyumen. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213605009>. EDN: <https://elibrary.ru/XSQJDD>
14. Smigocki, A. C., Heu, S., Mccanna, I., Wozniak, C., & Buta, G. (1997). Insecticidal compounds induced by regulated overproduction of cytokinins in transgenic plants. In N. Carozzi & M. Koziel (Eds.), *Advances in insect control: the role of transgenic plants* (pp. 225–236). Bristol.
15. Jansson, J. K., & Taş, N. (2014). The microbial ecology of permafrost. *Nature Reviews Microbiology*, 12, 414–425. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3262>. EDN: <https://elibrary.ru/SOEPQH>
16. Bauer, M. A., Kainz, K., Carmona-Gutierrez, D., & Madeo, F. (2018). Microbial wars: competition in ecological niches and within the microbiome. *Microbial Cell*, 5(5), 215–219.
17. Panikov, N. S. (2009). Microbial activity in frozen soils. In R. Margesin (Ed.), *Permafrost Soils* (pp. 119–147). Innsbruck.
18. Brouckov, A. V., Trofimova, Y. B., Melnikov, V. P., Sukhovei, Y. G., Griva, G. I., Kalenova, L. F., Subbotin, A. M., Repin, V. E., Brenner, E. V., Tanaka, M., Katayama, T., & Utsumi, M. (2011). Relict microorganisms of cryolithozone as possible objects of gerontology. *Advances in Gerontology*, 39–44. <https://doi.org/10.1134/S207905701101005X>. EDN: <https://elibrary.ru/RHEVRD>
19. Ghanem, M. E., Albacete, A., Smigocki, A. C., Frebort, I., Pospíšilová, H., Martínez-Andújar, C., Acosta, M., Sanchez-Bravo, J., Lutts, S., Dodd, I. C., & Pérez-Alfocea, F. (2011). Root-synthesised cytokinins improve shoot growth and fruit yield in salinised tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 62, 125–140. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq266>. EDN: <https://elibrary.ru/OARSPZ>
20. Smigocki, A. C., Heu, S., & Buta, S. G. (2000). Analysis of insecticidal activity in transgenic plants carrying the IPT plant growth hormone gene. *Acta Physiologiae Plantarum*, 22, 295–299. <https://doi.org/10.1007/s11738-000-0038-x>. EDN: <https://elibrary.ru/VAHFDA>
21. Souza, C. P., Guedes, T. A., & Fontanetti, C. S. (2016). Evaluation of herbicides action on plant bioindicators by genetic biomarkers: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188.

22. Kastornov, A. A., Subbotin, A. M., & Petrov, S. A. (2022). The influence of microorganisms of the Arctic paleoecosystems on the morphometric parameters and the cytogenetic apparatus of *Allium cepa*. In *Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N. I. Vavilov* [BIO Web of Conferences, vol. 43, article 03013]. Saratov. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224303013>. EDN: <https://elibrary.ru/UCFFKT>
23. Timofeev, V. N., & Subbotin, A. M. (2024). Preparations based on bacteria from frozen rocks during the dressing of spring wheat seeds. *BIO Web of Conferences*, 108, article 10006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410810006>. EDN: <https://elibrary.ru/SMQVPA>
24. Wintermans, J. F., & de Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their phenophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biophysics including Photosynthesis*, 109, 448–453. [https://doi.org/10.1016/0926-6585\(65\)90170-6](https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6)

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Касторнов Александр Александрович, младший научный сотрудник Отдела биоресурсов криосферы
ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, 625026, Российская Федерация
AlexKastornov@yandex.ru

Петров Сергей Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела биоресурсов криосферы
ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, 625026, Российская Федерация
tumiki@yandex.ru

Субботин Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Отдела биоресурсов криосферы

*ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, 625026, Российская Федерация
subbotin.prion@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr A. Kastornov, Junior Research Scientist of Department of Biore-sources Cryosphere

*Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences*

86, Malygina Str., Tyumen, 625026, Russian Federation

AlexKastornov@yandex.ru

SPIN-code: 7133-1500

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0116-5291>

Sergei A. Petrov, Doctor of Medicine, Professor, Principal Researcher of De-partment of Bioresources Cryosphere

*Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences*

86, Malygina Str., Tyumen, 625026, Russian Federation

tumiki@yandex.ru

SPIN-code: 8382-8583

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1566-2299>

Andrey M. Subbotin, Cand. Sc. Biology, Assistant Professor, leading research scientist of Department of Bioresources Cryosphere

*Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences*

86, Malygina Str., Tyumen, 625026, Russian Federation

subbotin.prion@yandex.ru

SPIN-code: 9865-7586

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5135-3194>

Поступила 10.04.2025

После рецензирования 07.05.2025

Принята 15.05.2025

Received 10.04.2025

Revised 07.05.2025

Accepted 15.05.2025