

Влияние бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород, на морфофизиологические и биохимические параметры растений в условиях хлоридного засоления

Е.О. Симонова*, О.А. Симонов, А.М. Субботин, С.А. Петров

ФГБУ ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия

*mailsimonova@gmail.com

Аннотация. Исследовано влияние бактериальных культур, выделенных из многолетнемерзлых пород (ММП), на солеустойчивость двадцатидневных проростков овса сорта Тюменский голозерный. Для исследования был применен один штамм (10-50-TS2) вида *Achromobacter spanius*, три штамма рода *Bacillus*: 875-TS вида *Bacillus cereus*, 312-TS и 2-06-TS1 вида *Bacillus megaterium*. Проведен вегетационный эксперимент на засоленном кварцевом песке в лабораторных условиях. Рассчитаны коэффициенты корнеобеспеченности и симметрии проростков, исследованы количество пигментов фотосинтеза в зеленой части растения. По результатам проведенного эксперимента оценено положительное влияние бактериальных инокулятов на некоторые измеряемые параметры проростков: все четыре штамма стимулируют увеличение количества корней, также в двух вариантах (10-50-TS2, 2-06-TS1) увеличена масса корней, в варианте с использованием штамма 10-50-TS2 отмечено увеличение длины корня. Рассчитанные коэффициенты корнеобеспеченности и симметрии позволяют сделать вывод о повышении солеустойчивости проростков в варианте с применением штамма 10-50-TS2. Анализ содержания пигментов фотосинтеза показал, что в трех вариантах (875-TS, 312-TS, 2-06-TS1) было повышенное содержание каротиноидов, содержание зеленых пигментов выше контрольного отмечено в варианте 10-50-TS2. Проведенное исследование позволило отнести штамм 10-50-TS2 (*Achromobacter spanius*) к широкой группе PGPB и предположить возможность его применения в качестве основы для создания биопрепарата, повышающего устойчивость растений, произрастающих на засоленных почвах.

Ключевые слова: стрессоустойчивость растений, пигменты фотосинтеза, PGPB, многолетнемерзлые породы, *Avena nudisativa* L.

Благодарности. Работа выполнена согласно государственному заданию на 2021–2030 годы «Пространственно-временные явления и процессы, протекающие в водах суши Сибири в условиях современного техногенеза и изменения климата».

Введение

Засоленность почв – распространенный стресс-фактор в биосистемах, оказывающий лимитирующее влияние на растения, повреждающее действие ионов натрия и хлора (при хлоридном засолении), осмотический стресс, все это приводит к образованию активных форм кислорода (АФК) в растениях [1]. В свою очередь переизбыток свободных радикалов, в том числе АФК, ведет к перекисному окислению липидов (ПОЛ) и окислительному стрессу: разрушению билипидного слоя клеток и других мембранных структур, таких как тилакоидные мембраны в хлоропластах, снижению содержания хлорофилла и падению интенсивности фотосинтеза и дыхания. Окисли-

тельный стресс приводит к нарушению энергетических и синтетических процессов в растительном организме, некрозу краев листьев и их опаданию, появлению слабых и невыровненных посевов, потере качества и количества собранного урожая [2]. Согласно статистике Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций, засоленные почвы в мире покрывают около 397 млн га, что негативно сказывается на эффективности растениеводства [3].

Одним из путей повышения стрессоустойчивости растений и биоремедиации маргинальных почв, к коим относятся засоленные почвы, является применение «стимулирующих рост расте-

ний бактерий» (СРРБ), или RGPB (plant grow the promoting bacteria) [4]. Взаимодействуя с ризосферой растения, RGPB способны индуцировать антиоксидантную защиту растительного организма, снижать образование активных форм кислорода [5] и в результате оказывать как непосредственное, так и косвенное положительное влияние на рост растений [6, 7].

При применении RGPB в условиях Сибири и других северных регионов обычно сталкиваются с проблемой приживаемости и активности бактерий в ризосфере и ризоплане [8]. Данную проблему можно решить, используя микроорганизмы, извлеченные из ММП. Климатические и антропогенные изменения, приводящие к деградации полярных льдов и ММП, обуславливают массовое проникновение сохранившихся в них микроорганизмов в современные биосистемы. Вследствие этого оценка влияния бактериальных штаммов из ММП на биологические объекты современных биосистем является актуальной [9].

Ряд исследований, проведенных на лабораторных животных [10], гидробионтах [11] и растениях [12], показали, что потенциал микроорганизмов из ММП достаточно высок.

Предположение о высокой биологической активности микроорганизмов обусловлено тем, что, пребывая в мерзлоте, в условиях гипометаболизма они подвергаются естественной селекции и в результате приобретают необходимый набор свойств для обеспечения выживания в неблагоприятных условиях: регенеративный и репаративный потенциал; способность синтезировать ряд ферментов, активных при низких и меняющихся температурах, и при этом экономить собственную энергию; способность активно выделять антибиотические факторы, чем положительно влиять на стрессоустойчивость, в том числе и на солеустойчивость, растений, [13].

В настоящее время существуют зарегистрированные биопрепараты на основе мерзлотных микроорганизмов, активно применяющиеся в ветеринарии и кормлении сельскохозяйственных животных [14].

Целью настоящей работы явилось проведение скрининговых исследований штаммов микроорганизмов, выделенных из ММП, для оценки их влияния на рост и развитие растений в условиях солевого стресса.

Материалы и методы

В работе использовали четыре штамма бактерий, выделенные из буровых кернов ММП, полученных при бурении в 2005 г. двух учебных скважин глубиной до 32 м в районе Тарко-Сале, Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа, Тюменская область. Материал кернов представлен озерно-аллювиальными супесчано-суглинистыми отложениями зырянского возраста Q2-3_{III}.

Исследования были проведены с использованием одного штамма (10-50-TS2) вида *Achromobacter spanius* Coenye et al. 2003, и трех штаммов рода *Bacillus*: 875-TS вида *Bacillus cereus* Frankland and Frankland 1887 (Approved Lists 1980), 312-TS и 2-06-TS1 вида *Bacillus megaterium* de Bary 1884 (Approved Lists 1980). Видовая принадлежность определена в результате молекулярно-генетического анализа нуклеотидной последовательности 16SpPHK.

Штаммы депонированы во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов ФГУП ГосНИИГенетика: 10-50-TS2 под номером № В-12405, 875-TS: № В-12242, 312-TS: № В-12244, 2-06-TS1: № В-12402.

Штамм 2-06-TS1 вида *Bacillus megaterium* выделен из бурового керна с глубины 10 м. Состав керна: глина серая, прослой торфа (оторфованных глин), с массивными прослоями льда. Лед на сколе – белый.

Штамм 875-TS вида *Bacillus cereus* выделен из бурового керна с глубины 2,5 м. Состав керна: суглинок серо-зеленый, бурый (зеленовато-серый), мерзлый, лед белый, структура слоистая, толщина прослоев – 0,3–2,0 см.

Штамм 10-50-TS2 вида *Achromobacter spanius* выделен из бурового керна с глубины 30,2 м. Состав керна: темно-сине-серые пластичномерзлые глины, шпильки льда по 4 мм, лед белого цвета.

Штамм 312-TS вида *Bacillus megaterium* выделен из бурового керна с глубины 4,2 м. Состав керна: суглинок оторфованный коричневый с включениями супеси. Переход на 3,7 м к пескам среднезернистым серого цвета. Включения древесины по всей глубине керна. На переходе от суглинка к пескам линза прозрачного и мутного льда 0,3 м.

Исследуемые штаммы бактериальных культур находятся в Коллекции почвенных микроорганизмов многолетнемерзлых пород Арктики (ПМММПА) ТюмНЦ СО РАН при ТРЦКП «Био-

косные системы криосферы» ТюмНЦ СО РАН под номером скр_77024, дата регистрации 02.09.2011 г.

Штаммы бактерий высевали штрихом на скошенный питательный мясопептонный агар (ТУ 9385-001-64786015-2012, г. Углич) и культивировали в течение суток в термостате при температуре +26 °С. Культуру бактерий смывали дистиллированной водой в объеме 5 мл с поверхности агара с помощью медицинского шприца, смыв сливали в стерильную емкость. Для дальнейшей работы методом серийных разведений доводили бактериальную суспензию стерильной дистиллированной водой до рабочей концентрации с содержанием 1×10^7 – 1×10^9 КОЕ в 1 миллилитре. Для подсчета КОЕ в бактериальной суспензии пользовались методом Коха.

Исследования проводились в лабораторных условиях на семенах овса *A. nudisativa* сорта Тюменский голозерный, предоставленных для эксперимента НИИСХ Северного Зауралья – филиала ТюмНЦ СО РАН. Голозерные сорта более требовательны к почвенно-климатическим условиям, что ограничивает их использование в неблагоприятных условиях среды: короткий безморозный период, избыток токсических веществ в окружающей среде, засоление почв и прочее. Тем не менее они представляют собой большую ценность для агротехнического комплекса, ввиду высокой вымолачиваемости зерна и отсутствия пленок, что позволяет значительно сократить затраты на производство круп, муки и других продуктов [15].

Предпосевную обработку семян проводили методом замачивания в бактериальных суспензиях в течение 1 ч, контрольную группу семян замачивали в дистиллированной воде.

Кварцевый песок с фракцией № 2 (1–1,2 мм), прокаливали в сушильном шкафу при температуре 250 °С, 1,5–2 часа. После остывания песок помещали по 6 кг в пластиковые кюветы размером 25×40×15 см и увлажняли до 60 % от полной влагоемкости песка, в соответствии с ГОСТ 12038-84. В экспериментальных вариантах для создания засоленного фона использовали 0,98%-й раствор NaCl в дистиллированной воде, для контрольного варианта, без провокационного фона, песок увлажняли дистиллированной водой.

Для работы отбирали равные по размеру семена (средний вес 100 семян $2,5 \pm 0,2$ г). По истечении времени замачивания их высаживали по 150 шт. в кювету с соблюдением одинакового

расстояния между семенами. Кюветы помещали в прозрачный бокс с искусственным освещением люминесцентными лампами дневного света (фотопериод свет/темнота: 14/10 ч, уровень освещения около 2000 лк.), при температуре 24 ± 2 °С и влажностью воздуха 60%. Полив, по мере подсыхания субстрата, производили профильтрованной кипяченой водопроводной водой с температурой 22 °С, не содержащей исследуемые штаммы бактерий. Таким образом сохранялась исходная концентрация NaCl в засоленном субстрате.

На 21-е сутки исследовали количество пигментов фотосинтеза и измеряли морфометрические параметры проростков в соответствии со стандартными методиками [16, 17]. Эксперимент проводили в двух повторностях. Также в эксперименте присутствовали варианты, в которых растения проращивали на засоленном фоне (0,98%-й раствор NaCl) без предпосевной обработки семян бактериями. К сожалению, эти варианты не подлежали дальнейшей обработки ввиду того что растения не доживали до контрольного дня, предположительно из-за неблагоприятного воздействия NaCl и недостатка питательных веществ в субстрате.

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 Statistics 21. Достоверность различий средних значений измеряемых морфометрических параметров между опытными и контрольным вариантами определена по t-критерию Стьюдента при уровне значимости $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,05$ и U-критерию Манна–Уитни при сравнении данных, полученных при анализе количества пигментов фотосинтеза, $p \leq 0,01$. Все данные в таблицах представлены как среднее значение $\pm$ стандартная ошибка среднего ($\pm$ SE).

Результаты и обсуждение

Установили, что длина корня проростков овса возросла по сравнению с контрольным опытом

Таблица 1

Влияние микроорганизмов из ММП на рост корневой системы и побега проростков овса сорта Тюменский голозерный, пророщенных на провокационном фоне (NaCl 0,98 %)

Table 1

Influence of microorganisms from permafrost on the growth of the root system and shoot of oat seedlings of the Tyumensky holozerny variety, germinated against a provocative background (NaCl 0,98 %)

Штамм Strain	Длина корня, мм Length root, mm	Длина побега, мм Length shoot, mm	Длина coleoptile, мм Length coleoptile, mm	Число корней Number of roots	Коэффициент симметрии, усл. ед. Symmetry coefficient, conv. units
10-50-TS2	151 ± 5 **	165 ± 5 **	22,0 ± 0,5 **	4,84 ± 0,15 **	1,1
875-TS	45,9 ± 1,6 **	92,5 ± 2,2 **	16,1 ± 0,7 **	5,52 ± 0,14 **	2
312-TS	58,9 ± 2,5 **	201 ± 10**	27,1 ± 0,8 **	4,28 ± 0,25 *	3
2-06-TS1	56,6 ± 2,8 **	82,6 ± 2,2 **	15,1 ± 0,5 **	5,96 ± 0,12 **	1,5
Контр. Control	81 ± 4	284 ± 6	29,8 ± 0,4	3,72 ± 0,10	4

Примечание: * – достоверность различия значений с опытным вариантом с использованием штамма бактерий из ММП от значений, полученных в интактном контрольном варианте (** – $p \leq 0,01$, * – $p \leq 0,05$).

Note: * – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the bacterial strain from the MMP from the values obtained in the intact control variant (** – $p \leq 0.01$, * – $p \leq 0.05$).

под воздействием штамма 10-50-TS2 (рост на 87 %). Воздействие штаммов 875-TS (–43 %), 312-TS (–27 %), 2-06-TS1 (–30 %) привело к явному уменьшению длины корня (табл. 1). При анализе морфометрических параметров побега выявили уменьшение длины coleoptile во всех опытных вариантах: 10-50-TS2 (–26 %), 875-TS (–46 %), 312-TS (–9 %), 2-06-TS1 (–49 %). Длина побега также была меньше в опытных вариантах: 10-50-TS2 (–42 %), 875-TS (–43 %), 312-TS (–29 %), 2-06-TS1 (–71 %). Число корней в опытных вариантах явно возросло по сравнению с контролем: штамма 10-50-TS2 (+30 %), 875-TS (+48 %), 312-TS (+15 %), 2-06-TS1 (+60 %).

Отношение средней длины наземной части к средней длине корневой системы является коэффициентом симметрии проростков [18], оптимальным значением принято считать 0,8–1,1. Значения выше или ниже данной границы обозначают, что один из вегетативных органов проростка значительно превалирует над другим и, как следствие, условия, в которых развивается растение, не являются для него комфортными. В варианте с использованием штамма 10-50-TS2 коэффициент симметрии находится на границе оптимума, тогда как в контрольном варианте и в варианте 312-TS длина побега значительно превалирует над длиной корня. В контрольном варианте достигнуто самое большое отклонение коэффици-

ента симметрии от оптимальных величин. Предположительно отсутствие гиперосмотического стресса позволило получить длинный побег и достаточно развитую корневую систему. В то же время недостаток минеральных веществ не создает оптимальные условия для роста и развития растения, что видно по нарушенному коэффициенту симметрии.

Анализируя массу проростков можно высчитать коэффициент корнеобеспеченности (табл. 2) – отношение массы корней к массе побега. Коэффициент корнеобеспеченности может служить показателем адаптивности растения к воздействию засоленной среды [19].

Действительно, если значение коэффициента корнеобеспеченности больше единицы, то подземная часть растения преобладает над надземной. Отметим, что соль в первую очередь оказывает повреждающее действие на корневую систему, особенно на начальных этапах онтогенеза, поэтому глубокая и развитая корневая система у растений, растущих на засоленной почве, является одним из признаков адаптации к стрессу в случае, если сохраняется пропорциональность развития растения. Если подземная часть значительно преобладает над надземной частью растения, это показывает неэффективность корней и невозможность обеспечить необходимый для развития приток питательных веществ. Сравнивая показате-

**Влияние микроорганизмов из ММП на массу корневой системы
и побега проростков овса сорта Тюменский голозерный,
пророщенных на провокационном фоне (NaCl 0,98 %)**

Table 2

**Influence of microorganisms from permafrost on the mass of the root system
and shoot of oat seedlings of the Tyumensky Holozerny variety,
germinated against a provocative background (NaCl 0.98 %)**

Штамм Strain	Масса побега, мг Weight shoot, mg	Масса корней, мг Weight root, mg	Масса проростка, мг Weight plants, mg	Корнеобеспеченность, усл. ед. Root-availability, conv. units
10-50-TS2	137 ± 5 **	114 ± 6 **	252,1 ± 7,1 **	1,2
875-TS	60,9 ± 2,5 **	32,9 ± 1,6 **	93,8 ± 3,7 **	1,9
312-TS	148,4 ± 7,9 **	32,8 ± 3,8 **	181 ± 10 **	4
2-06-TS1	66,2 ± 2,5 **	83,2 ± 2,9 **	149,4 ± 3,9 **	0,8
Контр. Control	217,2 ± 5,5	61,4 ± 3,5	278,7 ± 6,8	4

Примечание: * – достоверность различия значений полученных в опытном варианте с использованием штамма бактерий из ММП от значений, полученных в интактном контрольном варианте (** – $p \leq 0,01$, * – $p \leq 0,05$).

Note: * – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the bacterial strain from the MMP from the values obtained in the intact control variant (** – $p \leq 0.01$, * – $p \leq 0.05$).

тель корнеобеспеченности для растений одного вида, находящихся под воздействием различных неблагоприятных факторов, можно судить о стрессоустойчивости, адаптивности и продуктивности растений. При воздействии штамма 10-50-TS2 у растений не отмечено значительного преобладания одной системы над другой. Масса корней была увеличена в двух вариантах с применением бактериальных инокулятов: 10-50-TS2 (+ 86%), 2-06-TS1 (+ 35%). Общая масса растения в контрольном опыте остается самой большой, но масса набрана за счет корневой системы, растения имеют длинный, но очень легкий проросток при доминирующей корневой системе. Такие же отклонения имеют проростки, имеющие самый высокий коэффициент корнеобеспеченности в эксперименте со штаммом 312-TS. Более гармонично развиваются растения, обработанные штаммами 10-50-TS2.

Анализируя листовые параметры, можно судить о фотосинтетической активности проростков. Одним из таких параметров является площадь листовой поверхности, его применяют для оценки устойчивости растений в неблагоприятных условиях внешней среды [20]. PGPB (штамм 10-50-TS2) в эксперименте при обработке семян вызывал увеличение площади листовой поверхности первого листа на 6% по сравнению с интактным контролем (табл. 3). Это потенциально может увеличивать фотосинтетическую продуктив-

ность, что подтверждается массой проростка (см. табл. 2), самой высокой из опытных вариантов.

При этом площадь листовой поверхности была значительно ниже по сравнению с контрольным вариантом при воздействии на семена штаммов 875-TS (–39%), 312-TS и 2-06-TS1 (–44%).

Современные исследования позволяют использовать соотношения пигментов фотосинтеза для анализа устойчивости растений к неблагоприятным условиям внешней среды [21]. Хлорофилл *a* содержится как в реакционных центрах фотосистемы, так и в светособирающем комплексе (ССК), при этом хлорофилл *b* рассматривается как дополнительный пигмент, находящийся преимущественно в ССК. Таким образом, низкое значение отношения хлорофиллов *a/b* говорит о повышении содержания хлорофилла *b* и «включении» его синтеза для повышения устойчивости растения и увеличении количества ССК фотосистем, являясь вспомогательным пигментом фотосинтеза, увеличивается в концентрации только при состоянии экологического неблагополучия, увеличение его концентрации может свидетельствовать о снижении чувствительности растения к яркому свету. Отношения хлорофиллов *a/b* по всем вариантам не превышает значения 2,1, что указывает на неблагоприятные условия вегетации и лишний раз подтверждает повреждающее действие засоления и недостатка минеральных веществ ввиду отсутствия дополнительного вне-

Таблица 3

**Площадь первого листа и количество пигментов фотосинтеза (мг.) на 100 г навески
в зеленой части проростков *Avena nudisativa* L. после предпосевной обработки
различными штаммами бактерий из ММП**

Table 3

**The area of the first leaf and the amount of photosynthetic pigments (mg) per 100 g
of the sample in the green part of *Avena nudisativa* L. seedlings after pre-sowing treatment
with various bacterial strains from MMP**

Штамм Strain	Площадь первого листа, мм ² Area of the first leaf, mm ²	Chl.a, мг Chl.a, mg	Chl.b, мг Chl.b, mg	Car., мг Car., mg	Chl.a Chl.b	ΣChl Car.
10-50-TS2	381 ± 7	2,689 ± 0,002 **	1,944 ± 0,002 **	0,078 ± 0,001 **	1,383 ± 0,003 *	59,40 ± 0,05 *
875-TS	218 ± 10 **	1,348 ± 0,003 **	0,715 ± 0,009 **	0,38 ± 0,001 **	1,89 ± 0,03 *	5,40 ± 0,06 *
312-TS	295 ± 15 **	2,417 ± 0,001 **	1,337 ± 0,001 **	0,382 ± 0,002 **	1,807 ± 0,002 *	9,480 ± 0,005 *
2-06-TS1	202 ± 8 **	1,173 ± 0,001 **	0,541 ± 0,001 **	0,371 ± 0,001 **	2,168 ± 0,002 *	4,619 ± 0,003 *
Контр. Control	359 ± 17	2,451 ± 0,001	1,341 ± 0,001	0,23 ± 0,001	1,827 ± 0,002	16,416 ± 0,004

Примечание: * – достоверность различия значений полученных в опытном варианте с использованием штамма бактерий из ММП от значений, полученных в интактном контрольном варианте (** – $p \leq 0,01$, * – $p \leq 0,05$).

Note: * – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the bacterial strain from the MMP from the values obtained in the intact control variant (** – $p \leq 0,01$, * – $p \leq 0,05$).

сения удобрений. В варианте с использованием штамма 10-50-TS2 он значительно ниже контрольного и самый низкий из всех вариантов эксперимента (см. табл. 3). Судя по литературным данным, снижение отношения хлорофиллов *a/b* может свидетельствовать о повышении устойчивости растений к неблагоприятным условиям внешней среды и их урожайности [22, 23].

Количество хлорофилла *a* в растениях после предпосевной обработки их семян штаммом 10-50-TS2 было на 10 % больше, чем в интактном контроле. При этом количество хлорофилла *b* возросло на 45 %. В остальных вариантах содержание хлорофиллов было ниже контрольного варианта.

Известно, что каротиноиды, являясь низкомолекулярными антиоксидантами, способны гасить образование АФК, защищая тем самым жирные кислоты липидов от перекисного окисления и позволяя сохранять целостность мембран. Каротиноиды также несут антенную функцию и входят в состав ССК [24]. Существуют данные, полученные в эксперименте на микроводорослях и растениях, что солевой стресс способен спровоцировать синтез каротиноидов, тогда как содержание общего числа хлорофиллов уменьшается в

1,5–2 раза. Показано, что накопление каротиноидов происходит в прямой зависимости от концентрации NaCl, а значит, и уровня стресса [25]. Содержание каротиноидов отмечено самое низкое в варианте со штаммом 10-50-TS2, во всех остальных значениях превышало контрольное. Вторым по величине является показатель в контрольном варианте без провокационного фона и использования микроорганизмов.

Таким образом, показателем стрессоустойчивости растений может служить отношение суммы количества хлорофилла *a* и хлорофилла *b* к количеству каротиноидов, наивысшее значение которого из полученных имеет вариант с применением штамма 10-50-TS2. В ранее проведенных нами экспериментах можно отметить отсутствие единообразия действия штаммов из ММП на зерновые культуры при различных условиях [12]. Именно поэтому важным является подбор штаммов, оказывающих протекторные свойства на растения при различных стрессовых условиях.

Выводы

Объединяя полученные данные, можно сделать вывод, что растения, обработанные штаммами 10-50-TS2, оказались более солеустойчи-

выми по сравнению с другими опытными вариантами. Синтез хлорофилла зависит от работы корневой системы, проростки, обработанные штаммом 10-50-TS2, наряду с развитой корневой системой, обладали оптимальной длиной проростка в стрессовых условиях. Штамм микроорганизмов *Achromobacter spanius* 10-50-TS2 может быть использован самостоятельно [26] или в составе комплексных биологически активных препаратов в качестве средства повышения устойчивости растений в условиях хлоридного засоления почв.

Литература

1. Mokrani S., Nabti E.-H., Cruz C. Current advances in plant growth promoting bacteria alleviating salt stress for sustainable agriculture // Appl. Sciences. 2020. No. 10(20). P. 7025. <https://doi.org/10.3390/app10207025>
2. Болдырев М.И., Каширская Н.Я. Действие стрессовых факторов на растения // Защита и карантин растений. 2008. № 4. С. 14–15.
3. Koohafkan P., Stewart B.A. Water and cereals in drylands // Rome: The Food and Agriculture Organization of the United Nations and Earthscan, 2012. 113 p.
4. Goswami M., Deka S. Plant growth-promoting rhizobacteria—alleviators of abiotic stresses in soil: A review // Pedosphere. 2020. Vol. 30(1): 4061. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(19\)60839-8](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(19)60839-8).
5. Артамонова М.Н., Потатуркина-Нестерова Н.И., Беззубенкова О.Е. Роль бактериальных симбионтов в растительно-микробных ассоциациях // Вестник Башкирского университета. 2014. № 1. С. 81–84.
6. Majeed A., Muhammad Z., Ahmad H. Plant growth promoting bacteria: role in soil improvement, abiotic and biotic stress management of crops // Plant Cell Rep. 2018. Vol. 37(12). P. 1599–1609. doi: 10.1007/s00299-018-2341-2.
7. Ramakrishna W., Rathoe P., Kumari R., Yadav R. Brown gold of marginal soil: Plant growth promoting bacteria to overcome plant abiotic stress for agriculture, biofuels and carbon sequestration // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135062>
8. Etesami H., Glick B.R. Halotolerant plant growth-promoting bacteria: Prospects for alleviating salinity stress in plants // Environmental and Experimental Botany. 2020. Vol. 178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104124>.
9. Каленова Л.Ф., Мельников В.П. Экосистемы криосферы источник микроорганизмов с оригинальным биологическим потенциалом // Научные исследования в Арктике. 2018. № 3. С. 56–64. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-56-64
10. Субботин А.М., Маркевич Т.В., Петров С.А. Лечение экспериментальной эрозии роговицы глаза // Морфология. 2019. № 2 (155). С. 272–273.
11. Субботин А.М., Гнатченко Л.Н., Петухова Л.А. Исследование физиологических параметров культуры инфузорий *Paramecium caudatum* при воздействии фильтратов бактериальных культур рода *Acinetobacter* // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 12 (131). С. 149–150.
12. Влияние микроорганизмов из многолетнемерзлых пород на морфофизиологические показатели яровой пшеницы / А.М. Субботин, М.В. Нарушко, Н.А. Боме, С.А. Петров, В.А. Мальчевский, М.А. Габдуллин // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016. № 20(5). С. 666–672. DOI 10.18699/VJ16.119
13. Acuña-Rodríguez I.S., Hansen H., Gallardo-Cerda J., Atala C., Molina-Montenegro M.A. Antarctic Extremophiles: Biotechnological Alternative to Crop Productivity in Saline Soils // Front. Bioeng. Biotechnol. 2019. doi: 10.3389/fbioe.2019.00022
14. Владимиров Л.Н., Неустроев М.П., Тарабукина Н.П. Арктические штаммы *Bacillus subtilis* в современной микробиотехнологии // Ветеринария и кормление. 2020. № 2. С. 17–20. DOI 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2020-2-4.
15. Заушницена А.В., Борисова Ю.В. Основные факторы, ограничивающие технологичность голозерного овса // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2007. № 6. С. 75–81.
16. Удовенко Г.В., Семушина Л.А., Синельникова В.Н. Особенности различных методов оценки солеустойчивости растений // Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды. Л.: Колос, 1976. С. 228–238.
17. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Большой практикум по фотосинтезу / под ред. И.П. Ермакова. М.: АCADEMIA, 2003. 256 с.
18. Журнова Д.Ф., Пантюхов И.В., Голдман И.В. Влияние азотных удобрений на ростовые характеристики различных сортов яровой пшеницы // Известия Красноярского государственного аграрного университета. 2008. № 1. С. 64–70.
19. Коробко В.В., Волков Д.П. Устойчивость некоторых сортов зернового сорго к разнокачественному засолению // Изв. Саратов. ун-та Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2013. № 2. С. 107–111.
20. Корнясова Н.А., Неверова О.А. Листовые параметры овса в условиях инокуляции почвенными микроорганизмами породных отвалов угольного разреза // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2012. № 3. С. 71–73.
21. Davison P.A., Hunter C.N., Horton P. Over expression of β -carotene hydroxylase enhances stresstolerance in *Arabidopsis* // Nature. 2002. P. 418. DOI: 10.1038/nature00861
22. Дерендовская А., Жосан С. Хлорофильные показатели и их связь с продуктивностью растений озимого ячменя // Stiinta Agricola. 2008. № 1. С. 4–7.
23. Рыктор И.А., Зубкова Ю.Н., Бутюгин А.В., Погромская Я.А. Влияние буроугольных гуминовых

удобрений на антистрессовую устойчивость растений // АБУ. 2012. № 12 (104). С. 45–47.

24. Маслова Т.Г., Марковская Е.Ф., Слемнев Н.Н. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор) // Журнал общей биологии 2020. Т. 81. № 4. С. 297–310. DOI: 10.31857/S0044459620040065.

25. Romanenko K.O., Romanenko P.O., Babenko L.M., Kosakivska I.V. Peculiarities of the growth and photosynthetic pigments content in algaeculture of *Acutodesmus*

dimorphus (Tupin) P.M. Tsarenko under salt and acetate stresses // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. 2017. № 2. Р. 45–54.

26. Субботин А.М., Симонова Е.О., Петров С.А. Штамм микроорганизмов *Achromobacter spanius* 10-50-TS2 в качестве средства повышения устойчивости растений к хлоридному засолению // Патент РФ № 2607028, 10.01.2017.

Поступила в редакцию 19.03.2021

Принята к публикации 27.04.2021

Об авторах

СИМОНОВА Екатерина Олеговна, младший научный сотрудник, ФГБУ ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, Researcher ID: R-6370-2017, <https://orcid.org/0000-0002-0238-6993>, mailsimonova@gmail.com;

СИМОНОВ Олег Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, Researcher ID: ААН-3938-2019, <https://orcid.org/0000-0003-2362-3588>, s_o_a@ikz.ru;

СУББОТИН Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-5135-3194>, researcherID: S-3256-2017, subbotin.prion@yandex.ru;

ПЕТРОВ Сергей Анатольевич, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, ФГБУ ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-1566-2299>, Researcher ID: A-7886-2016, tumiki@yandex.ru.

Информация для цитирования

Симонова Е.О., Симонов О.А., Субботин А.М., Петров С.А. Влияние бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород, на морфофизиологические и биохимические параметры растений в условиях хлоридного засоления // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 2. С. 149–158. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-10>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-2-10

Influence of bacteria isolated from permafrost on morphophysiological and biochemical parameters of plants under the conditions of chloride salinity

E.O. Simonova*, O.A. Simonov, A.M. Subbotin, S.A. Petrov

Federal State Institution Federal Research Center Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russia

*mailsimonova@gmail.com

Abstract. The effect of bacterial cultures isolated from permafrost (MMP) on the salt tolerance of twenty-day-old oat seedlings of the Tyumensky Holozerny variety was studied. One strain (10-50-TS2) of the *Achromobacter spanius* species and three strains of the *Bacillus* genus: 875-TS of the *Bacillus cereus* species, 312-TS and 2-06-TS1 of the *Bacillus megaterium* species were used for the study. A vegetation experiment was carried out on saline quartz sand under laboratory conditions. The coefficient of root supply and the coefficient of symmetry of seedlings were calculated, and the amount of photosynthetic pigments in

the green part of the plant was investigated. According to the results of the experiment, it is possible to evaluate the positive effect of bacterial inoculums on some measured parameters of seedlings: all four strains stimulate an increase in the number of roots, also in two variants (10-50-TS2, 2-06-TS1), the mass of roots is increased, in the variant with the use of the strain 10-50-TS2, an increase in root length was noted. The calculated coefficients of root supply and symmetry make it possible to conclude that the salt tolerance of seedlings increased in the variant with the use of the 10-50-TS2 strain. Analysis of the content of photosynthetic pigments showed that in three variants (875-TS, 312-TS, 2-06-TS1) there was an increased content of carotenoids, the content of green pigments was higher than the control one in variant 10-50-TS2. The study allowed us to conclude that the strain 10-50-TS2 (*Achromobacter spanius*) can be attributed to a wide group of PGPB, and it is possible to use it as a basis for creating a biological product that increases the resistance of plants growing on saline soils.

Key words: plant stress resistance, photosynthetic pigments, PGPB, permafrost, *Avena nudisativa* L.

References

1. Mokrani S., Nabti E.-H., Cruz C. Current advances in plant growth promoting bacteria alleviating salt stress for sustainable agriculture // Appl. Sciences. 2020. No. 10(20). P. 7025. <https://doi.org/10.3390/app10207025>
2. Boldyrev M.I., Kashirskaya N.Ya. Deistviya stressovykh faktorov na rasteniya // Zashchita i Karantin Rasteniy. 2008. No. 4. P. 14–15.
3. Koohafkan P., Stewart B.A. Water and cereals in drylands // Rome: The Food and Agriculture Organization of the United Nations and Earthscan, 2012. 113 p.
4. Goswami M., Deka S. Plant growth-promoting rhizobacteria—alleviators of abiotic stresses in soil: A review // Pedosphere. 2020. Vol. 30(1): 4061. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(19\)60839-8](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(19)60839-8).
5. Artamonova M.N., Potaturkina-Nesterova N.I., Bez-zubenkova O.E. Rol bakterialnykh simbiotov v rastitel'no-mikrobnnykh assotsiatsiyakh // Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2014. No. 1. P. 81–84.
6. Majeed A., Muhammad Z., Ahmad H. Plant growth promoting bacteria: role in soil improvement, abiotic and biotic stress management of crops // Plant Cell Rep. 2018. Vol. 37(12). P. 1599–1609. doi: 10.1007/s00299-018-2341-2.
7. Ramakrishna W., Rathoe P., Kumari R., Yadav R. Brown gold of marginal soil: Plant growth promoting bacteria to overcome plant abiotic stress for agriculture, biofuels and carbon sequestration // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135062>
8. Etesami H., Glick B.R. Halotolerant plant growth-promoting bacteria: Prospects for alleviating salinity stress in plants // Environmental and Experimental Botany. 2020. Vol. 178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104124>.
9. Kalenova L.F., Melnikov V.P. Ekosistemy kriofery istochnik mikroorganizmov s originalnym biologicheskim potencialom // Nauchnye issledovaniya v Arktike. 2018. No. 3. P. 56–64. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-56-64
10. Subbotin A.M., Markevich T.V., Petrov S.A. Lechenie eksperimental'noj erozii rogovicy glaza // Morfologiya. 2019. No. 2(155). P. 272–273.
11. Subbotin A.M., Gnatchenko L.N., Petukhova L.A. Issledovanie fizologicheskikh parametrov kultury infuzorij Paramecium caudatum pri vozdejstvii filtratov bakterialnykh kultur roda Acinetobacter // Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2011. No. 12(131). P. 149–150.
12. Subbotin A.M., Narushko M.V., Bome N.A., Petrov S.A., Malchevsky V.A., Gabdullin M.A. Vliyanie mikroorganizmov iz mnogoletnemerzlykh porod na morfofizologicheskie pokazateli yarovoj pshenicy // Vavilovskij Zhurnal Genetiki i Selekcii. 2016. No. 20(5). P. 666–672. DOI 10.18699/VJ16.119
13. Acuña-Rodríguez I.S., Hansen H., Gallardo-Cerda J., Atala C., Molina-Montenegro M.A. Antarctic Extremophiles: Biotechnological Alternative to Crop Productivity in Saline Soils. // Front. Bioeng. Biotechnol. 2019. doi: 10.3389/fbioe.2019.00022
14. Vladimirov L.N., Neustoev M.P., Tarabukina N.P. Arkticheskie shtammy Bacillus subtilis v sovremennoj mikrobiotekhnologii // Veterinariya i Kormlenie. 2020. No. 2. P. 17–20. DOI 10.30917/ATT-VK-1814-9588-2020-2-4.
15. Zashintsena A.V., Borisova Yu.V. Osnovnye faktory, ograniчивayushchie tekhnologichnost golozernogo ovsa // Vestnik Krasnoyarskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta. 2007. No. 6. P. 75–81.
16. Udovenko G.V., Semushina L.A., Sinelnikova V.N. Osobennosti razlichnykh metodov ocenki soleustojchivosti rastenij // Metody Ocenki Ustojchivosti Rastenij k Neblagopriyatnym Usloviyam Sredy. L.: Kolos, 1976. P. 228–238.
17. Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V. Bolshoj praktikum po fotosintezu / pod red. I.P. Ermakova. M.: ACADEMIA, 2003. 256 p.
18. Zhirnova D.F., Pantyukhov I.V., Goldman I.V. Vliyanie azotnykh udobrenij na rostovye harakteristiki razlichnykh sortov yarovoj pshenicy // Izvestiya Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2008. No. 1. P. 64–70.
19. Korobko V.V., Volkov D.P. Ustojchivost nekotorykh sortov zernovogo sorgo k raznokachestvennomu zasoleniyu // Izv. Sarat. un-ta Nov. ser. Ser. Himiya. Biologiya. Ekologiya. 2013. No. 2. P. 107–111.

20. Korniyasova N.A., Neverova O.A. Leaf parameters of oats under conditions of inoculation with soil microorganisms of rock dumps of a coal mine // *Izv. vuzov. North Caucasian region. Series: Natural Sciences*. 2012. No. 3. P. 71–73.
21. Davison P.A., Hunter C.N., Horton P. Over expression of β -carotene hydroxylase enhances stresstolerance in *Arabidopsis* // *Nature*. 2002. P. 418. DOI: 10.1038/nature00861
22. Derendovskaya A., Zhosan S. Hlorofilnye pokazateli i ih svyaz s produktivnostyu rastenij ozimogo yachmenya // *Stiinta Agricola*. 2008. No. 1. P. 4–7.
23. Ryktor I.A., Zubkova Yu.N., Butyugin A.V., Pogromskaya Ya.A. Vliyanie burougolnyh guminovyh udobrenij na antistressovuyu ustojchivost rastenij // *AVU*. 2012. No. 12 (104). P. 45–47
24. Maslova T.G., Markovskaya E.F., Slemnev N.N. Funkcii karotinoidov v listyah vysshih rastenij (obzor) // *ZHurnal obshchej biologii* 2020. Vol. 81, No. 4. P. 297–310. DOI: 10.31857/S0044459620040065.
25. Romanenko K.O., Romanenko P.O., Babenko L.M., Kosakivska I.V. Peculiarities of the growth and photosynthetic pigments content in algaeculture of *Acutodesmus dimorphus* (Tupin) P.M. Tsarenko under salt and acetate stresses // *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2017. № 2. P. 45–54.
26. Subbotin A.M., Simonova E.O., Petrov S.A. Shtamm mikroorganizmov *Achromobacter spanius* 10-50-TS2 v kachestve sredstva povysheniya ustojchivosti rastenij k hloridnomu zasoleniyu // Patent RF No. 2607028, 10.01.2017.

About the authors

SIMONOVA Ekaterina Olegovna, junior researcher, Federal State Institution Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86 Malygina st., Tyumen 625026, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-0238-6993>, Researcher ID: R-6370-2017, mailsimonova@gmail.com;

SIMONOV Oleg Anatolevich, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), senior researcher, Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86 Malygina st., Tyumen 625026, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2362-3588>, Researcher ID: AAH-3938-2019, s_o_a@ikz.ru;

SUBBOTIN Andrey Mikhailovich, Cand. Sci. (Biology), leading researcher, Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86 Malygina st., Tyumen 625026, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5135-3194>, Researcher ID: S-3256-2017, subbotin.prion@yandex.ru;

PETROV Sergei Anatolevich, Dr. Sci. (Medicine), chief researcher, Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86 Malygina st., Tyumen, 625026 Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1566-2299>, Researcher ID: A-7886-2016, tumiki@yandex.ru.

Citation

Simonova E.O., Simonov O.A., Subbotin A.M., Petrov S.A. Influence of bacteria isolated from permafrost on morphophysiological and biochemical parameters of plants under the conditions of chloride salinity // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, Vol. 26, No. 2. P. 149–158. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-10>