Раздел 2
ПОЧВОВЕДЕНИЕ, АГРОХИМИЯ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ

УДК 581.1+579.64+631.871 doi: 10.31360/2225-3068-2026-96-137-153
EDN SRDQXM

КОМПОЗИТНОЕ БИОУДОБРЕНИЕ НА ОСНОВЕ БИОЧАРА И ГАЛОТОЛЕРАНТНОГО ШТАММА PGPR *PSEUDOMONAS* SP. СМЯГЧАЕТ NACL-ИНДУЦИРОВАННЫЙ СТРЕСС У ПОДСОЛНЕЧНИКА

Борисова Г.Г.[1], Малева М.Г.[1], Салата А.А.[1], Тугбаева А.С.[1], Авраменко А.В.[1], Собенин А.В.[2]

[1] Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

[2] Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук

г. Екатеринбург, Россия, e-mail: maria.maleva@mail.ru

Борисова Г.Г. orcid.org/0000-0001-6663-9948
Малева М.Г. orcid.org/0000-0003-1686-6071
Салата А.А. orcid.org/0000-0001-7285-1566
Тугбаева А.С. orcid.org/0000-0001-9231-3650
Авраменко А.В. orcid.org/0009-0000-3042-3643
Собенин А.В. orcid.org/0000-0001-5513-5680

Засоление почв является одной из глобальных проблем. Поэтому особую значимость имеет выявление механизмов солеустойчивости культурных растений. Изучено влияние композитного биоудобрения (КБУ) на основе древесного биочара и галотолерантных ростстимулирующих ризобактерий (PGPR *Pseudomonas* sp. STF13) на рост и физиолого-биохимические показатели подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) сорта ‘Енисей’ в норме и при натрий-хлоридном засолении. Вегетационный опыт включал 4 варианта: контрольный субстрат (КС); КС с внесением КБУ (2,5 % по объёму); КС с поливом 80 мМ NaCl; КС с совместным применением КБУ + NaCl. Растения выращивали в течение 5 недель при естественном освещении и комнатной температуре. Установлено, что КБУ достоверно улучшало морфометрические параметры растений, увеличивая сырую биомассу корней и листьев на 11 и 33 %, соответственно, по сравнению с КС. Добавление NaCl подавляло развитие корней, снижая их вес в 2 раза. Однако применение

КБУ + NaCl практически полностью нивелировало этот негативный эффект, стимулируя прирост биомассы корней до уровня контроля. На биохимическом уровне КБУ также демонстрировало защитное действие: при солевом стрессе снижалась интенсивность перекисного окисления липидов (содержание малонового диальдегида было в 1,3 раза ниже, чем при действии соли), и уменьшался выход электролитов из тканей в 1,4 раза, что свидетельствует об ослаблении окислительного стресса. Внесение КБУ также положительно влияло на ионный гомеостаз, повышая отношение K^+/Na^+ в органах растения в условиях засоления в среднем в 1,7 раз и препятствуя транслокации Na^+ в листья. Засоление вызывало 14-кратное увеличение удельной электропроводности почв в сравнении с КС, однако КБУ нивелировало данный эффект, снижая ее величину на 27 %. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования композитных биоудобрений на основе биочара и PGPR для повышения солеустойчивости сельскохозяйственных культур и восстановления плодородия засоленных почв.

***Ключевые слова*:** *Helianthus annuus* L., натрий-хлоридное засоление, ростстимулирующая активность, морфофизиологические параметры, солеустойчивость растений.

Введение. Засоление почв является одной из актуальных проблем современного сельского хозяйства, особенно в условиях глобального изменения климата и нерационального использования почвенных и водных ресурсов [1, 2]. Наиболее острой она стала для засушливых и полузасушливых регионов, на фоне повышения температуры и повторяющихся засух, при ведении сельского хозяйства с чрезмерным орошением водой низкого качества и неэффективным управлением земельными ресурсами [7, 10, 13]. Повышенное содержание солей в почве ускоряет процессы минерализации органического вещества, ухудшает ее физико-химические свойства и нарушает жизнедеятельность ассоциативных микроорганизмов, связанных с растениями [2, 4, 13]. Засоление негативно влияет на рост и развитие растений, нарушая водный баланс, осмотический статус, ионный гомеостаз и важнейшие физиологические процессы [4, 7, 11, 12, 16]. В условиях солевого стресса в клетках растений нередко усиливаются прооксидантные реакции, вызывающие повреждение клеточных мембран и нарушающие антиоксидантный баланс [10, 12, 14, 18].

Подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.), являясь одной из наиболее значимых масличных культур, также подвержен негативному действию засоления. В связи с этим все большую актуальность приобретает поиск эффективных способов повышения устойчивости этого растения к стрессовым условиям, вызванным повышенным

содержанием солей, что приводит к снижению урожайности и ухудшению качества продукции [17, 20, 24, 26].

Одним из перспективных подходов является использование биоудобрений на основе PGP-бактерий (от англ. “Plant Growth Promoting” – стимулирующих рост растений), к которым относят эндофитные (PGPE) и ризосферные (PGPR) бактерии, в последние десятилетия активно используемые в агротехнологиях [1, 2, 12, 19, 21]. Они играют важную роль в стимулировании роста и повышении продуктивности растений: способны улучшать их питание за счёт солюбилизации недоступных форм фосфатов, соединений калия, цинка и фиксации молекулярного азота; синтезировать гормоны роста, например, индолил-3-уксусную кислоту (ИУК); защищать от патогенов, продуцируя цианистый водород; увеличивать биодоступность эссенциальных микроэлементов за счёт образования сидерофоров. Кроме того, они поддерживают почвенную биоту, смягчая действие различных абиотических стрессовых факторов, таких как засуха, засоление, загрязнение ксенобиотиками [1, 3, 23]. Особый интерес представляют галотолерантные ризобактерии, которые обладают способностью выживать при повышенной концентрации солей и оказывать положительное влияние на растения в условиях засоления. Эти микроорганизмы могут не только стимулировать рост растений, но и улучшать водообмен, снижать окислительный стресс и индуцировать накопление антиоксидантов, а также осмотически активных веществ [1, 18, 23, 27].

В качестве носителя для PGPR все большее внимание привлекает биочар (биоуголь) – богатый углеродом продукт, который получают в процессе пиролиза органических материалов, в том числе растительных отходов [15, 22, 26]. Биочар положительно влияет на структуру почвы, улучшая показатели аэрации и влагоудерживающей способности, а его частицы выступают в качестве субстрата для различных ассоциативных микроорганизмов, повышающих доступность питательных веществ и способствующих почвообразовательным процессам [6, 15, 26, 28]. Отмечено, что добавление биочара в почву при засолении увеличивает содержание органических и минеральных веществ, а также нормализует pH [6, 29]. Кроме того, он обладает высокой абсорбционной способностью, благодаря которой может эффективно связывать различные токсичные ионы, что снижает их доступность для растений, предотвращая негативное влияние [6, 23]. В связи с этим сочетание биочара с PGPR представляет собой перспективную стратегию повышения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных культур в условиях засоления [23, 25, 27]. Более того, комбинированное использование биочара с галотолерантными

штаммами PGPR может создать не только синергетический эффект, но и способствовать восстановлению плодородия засоленных почв [21, 25]. Однако к настоящему времени ответные реакции растений, подвергающихся солевому стрессу, при совместном применении PGPR и биочара, изучены недостаточно.

Цель исследования – оценить эффекты композитного биоудобрения, приготовленного на основе древесного биочара и галотолерантного штамма PGPR (*Pseudomonas* sp. STF13), на морфофизиологические характеристики подсолнечника в норме и при натрий-хлоридном засолении.

Объекты и методы исследования. Для достижения поставленной цели был проведён вегетационный эксперимент на засухоустойчивом, раннеспелом масличном сорте подсолнечника ‘Енисей’. Он был выведен в Красноярском НИИСХ (г. Красноярск), относится к сортам масличного и кондитерского направления, обладает хорошей урожайностью, стабильно плодоносит даже в засушливых условиях, а также устойчив к полеганию и осыпанию [5, 8, 26].

Вегетационный эксперимент проводили летом 2024 г. (июнь-июль). Композитное биоудобрение (КБУ) было подготовлено на основе галотолерантного штамма PGPR и биочара, полученного из древесины березы. Используемый штамм был выделен из ризосферы *Tussilago farfara* L. в 2023 г., идентифицирован методом 16S рРНК как 100 % принадлежащий роду *Psedomonas* и зарегистрирован в 2024 г. в National Center for Biotechnology Information, NCBI как *Pseudomonas* sp. STF13 (PQ686311). Тестирование штамма на ростстимулирующие свойства показало, что он способен к солюбилизации нерастворимых соединений фосфора (до 289,2 мг PO_4^{3-}/л), цинка (ZnO, $ZnCO_3$, $Zn_3(PO_4)_2$), продукции ИУК (до 14,3 мг/л), продукции сидерофоров и аммиака [3]. Кроме того, он оказался устойчивым к высоким концентрациям NaCl – выдерживал до 800 мМ без угнетения роста. Культуру *Pseudomonas* sp. предварительно выращивали на среде Луриа-Бертани в течение 3 суток, затем отделяли от неё центрифугированием и разводили в стерильной дистиллированной воде до концентрации ~10^8 кл./мл. Биочар, полученный методом пиролиза из древесины березы (350–400 °C), был подготовлен, как описано ранее [19]. Культуру клеток смешивали с измельченным биочаром (фракция <2 мм) в пропорции 5 : 1 (по объёму) в стерильных условиях и подсушивали до воздушно-сухого состояния.

Перед посадкой семена подсолнечника поверхностно стерилизовали, замачивали в стерильной дистиллированной воде на ночь, затем высаживали (~10 шт.) в пластиковые вегетационные сосуды объёмом

3 л, заполненные садово-огородным нейтрализованным низинным торфогрунтом (ГК «Селигер-Агро», Россия) без внесения/с внесением КБУ (в зависимости от варианта). После прорастания семян в каждом сосуде оставляли по 6 здоровых проростков для их дальнейшей вегетации. Эксперимент включал 4 варианта: контрольный субстрат (КС); КС с добавлением КБУ (2,5 % по объёму); КС с внесением раствора хлорида натрия (80 мМ NaCl, 2 раза в неделю); КС с совместным применением КБУ и 80 мМ NaCl. Растения выращивали при естественном освещении и комнатной температуре (23 ±2 °С) в течение 5 недель.

Длину побега измеряли, начиная с 7-ми суток, и далее раз в неделю, в динамике, с помощью линейки; сырую биомассу – в конце эксперимента (на 35-ые сутки) весовым методом, используя аналитические весы («OHAUS», Китай).

Содержание малонового диальдегида (МДА), свободного пролина и фенольных соединений в свежих растительных образцах определяли в конце эксперимента спектрофотометрически («APEL» PD-303UV, Япония) [19], и пересчитывали на 1 г сухого веса. Количество МДА измеряли при длине волн 532 и 600 нм, после гомогенизации 0,3 г навески сырых листьев в 4 мл раствора 0,25%-ной тиобарбитуровой кислоты в 10%-ной трихлоруксусной кислоте. Содержание свободного пролина определяли в листьях и корнях после 15 мин экстрагирования кипящей водой (100 °С) с использованием кислого нингидринового реактива при длине волны 520 нм. Количество в листьях растворимых фенольных соединений, в том числе флавоноидов, оценивали после суточного экстрагирования в 80%-ном этаноле. Содержание растворимых фенолов измеряли при длине волны 760 нм после реакции с 0,1 Н реактивом Фолина-Чокальтеу, используя в качестве стандарта галловую кислоту. Количество флавоноидов измеряли при длине волны 415 нм после 15-мин реакции с 10%-ным раствором $AlCl_3$, используя в качестве стандарта раствор рутина. Для пересчёта значений показателей на сухой вес известные навески сырых листьев и корней высушивали в течение 24 часов при 75 °С.

Оценку степени повреждения клеточных мембран проводили кондуктометрическим методом с небольшой модификацией [9]. Для этого в конце эксперимента из полностью сформированных свежих листьев подсолнечника делали высечки диаметром 1 см (по 10 высечек в 4 повторностях на каждый вариант), которые заливали 50 мл дистиллированной воды. Оценку интенсивности выхода (утечки) электролитов из клеток определяли трижды с помощью портативного pH-метра/кондуктометра (Hanna Instruments

GmbH, Австрия): через 10 мин после помещения дисков в воду и их встряхивания для удаления легкоподвижных электролитов ($ВЭ_0$); после 4-х часовой экспозиции при комнатной температуре и регулярном встряхивании ($ВЭ_1$); после кипячения в течение 5 мин с последующей доэкстракцией в течение 30 мин при комнатной температуре ($ВЭ_2$). Электропроводность дистиллированной воды вычитали из данных по выходу электролитов до и после кипячения. Расчёт полного выхода электролитов (ВЭ, %) проводили по формуле (1):

$$ВЭ = \frac{(ВЭ_1 - ВЭ_0)}{ВЭ_2} \times 100\,\% \qquad (1)$$

Дополнительно рассчитывали коэффициент повреждаемости (КП) клеток [9] после отдельного и совместного действия на растения КБУ и 80 мМ NaCl (формула 2):

$$КП = \frac{(ВЭ_t - ВЭ_c)}{(100 - ВЭ_c)} \times 100\,\% \qquad (2),$$

где:

$ВЭ_t$ – выход электролитов из ткани после воздействия КБУ и/или NaCl, в процентах от полного выхода электролитов;

$ВЭ_c$ – выход электролитов из ткани у контрольных растений, в процентах от полного выхода электролитов.

Общее содержание калия (K) и натрия (Na) в органах подсолнечника определяли при помощи атомно-абсорбционного спектрометра AA240FS (Varian Australia Pty Ltd., Австралия) после озоления растительного материала концентрированной HNO_3 (осч).

Величину pH и удельной электропроводности (EC) субстратов после эксперимента измеряли в почвенно-водной суспензии в соотношении 1 : 5 (почва : деионизированная вода) с помощью портативного pH-метра/кондуктометра (Hanna Instruments GmbH, Австрия). Определение подвижных форм K и Na проводили при помощи атомно-абсорбционного спектрометра AA240FS после экстракции 2,5 г почвы в 50 мл 5%-ного HNO_3 (осч).

Статистическая обработка включала в себя расчёт средних арифметических значений каждого параметра и их стандартных ошибок в программе MS Excel 16.0, которые отражены в таблицах и на рисунках. После проверки на нормальность распределения с помощью W-теста Шапиро-Уилка достоверность различий между вариантами оценивали с помощью критерия Тьюки и дисперсионного анализа (one-way и two-

way ANOVA) в программе STATISTICA 12.0. В таблицах и на рисунках разными буквами латинского алфавита обозначены достоверные различия между вариантами в диапазоне изменения каждого параметра при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1а показан внешний вид растений, выращенных при различных вариантах обработки, в конце эксперимента. При добавлении КБУ растения выглядели значительно лучше, чем при раздельном внесении NaCl, а также в сравнении с КС. Оценка морфометрических параметров подсолнечника показала, что во всех вариантах эксперимента наблюдалась сходная динамика увеличения длины побега: статистически значимых различий по её величине не зафиксировано (рис. 1б). При внесении КБУ сырая биомасса корней и листьев увеличивалась по сравнению с контролем на 11 и 33 %, соответственно. Солевой стресс ингибировал наращивание биомассы корней: после обработки NaCl их вес оказался в 2 раза ниже, чем в КС (рис. 1в). Снижение биомассы корней при засолении согласуется с данными, полученными другими авторами, которые отмечают, что солевой стресс часто приводит к нарушению водного баланса и угнетению роста растений [4, 10, 14, 23]. Однако в нашем исследовании совместное применение NaCl и КБУ оказывало положительный эффект: вес корней увеличивался на 85 % по сравнению с отдельным действием соли. Таким образом, КБУ нивелировало негативный эффект засоления, способствуя росту подземных органов практически до уровня контроля. Двухфакторный ANOVA подтвердил значимость влияния обоих факторов: как отдельное ($F_{(КБУ)} = 16,92$; $p = 0,001$; $F_{(NaCl)} = 328,79$; $p < 0,001$), так и совместное ($F_{(КБУ+NaCl)} = 38,44$; $p < 0,001$). Надземная биомасса оказалась более устойчива к засолению, поскольку её изменение при поливе NaCl было незначительным по сравнению с контролем ($F_{(NaCl)} = 2,14$; $p = 0,148$).

Одним из биохимических маркеров стресса для растений является содержание МДА – продукта перекисного окисления липидов. Добавление 80 мМ раствора NaCl увеличивало содержание МДА на 23 % (рис. 2а). Подобные результаты были описаны и в других исследованиях [4, 16]. В опытах на горчице салатной многократный полив 80 мМ раствором NaCl вызывал двукратное увеличение МДА по сравнению с контролем [4]. У томатов наблюдалась сходная реакция на засоление: 100 мМ концентрация NaCl увеличивала количество МДА в среднем в 1,8 раз [16]. Совместное использование КБУ и солевого раствора достоверно снижало значение этого показателя ($F_{(КБУ + NaCl)} = 81,85$; $p < 0,001$) на 30 % по сравнению с отдельным добавлением NaCl (рис. 4а).

Сходный эффект был отмечен в исследовании Марковой с соавт. [12], проведённом на проростках фасоли, где было показано, что штамм PGPE *Bacillus subtilis* 26Д на 30 % снижал количество МДА при однократном внесении 1%-ного раствора NaCl.

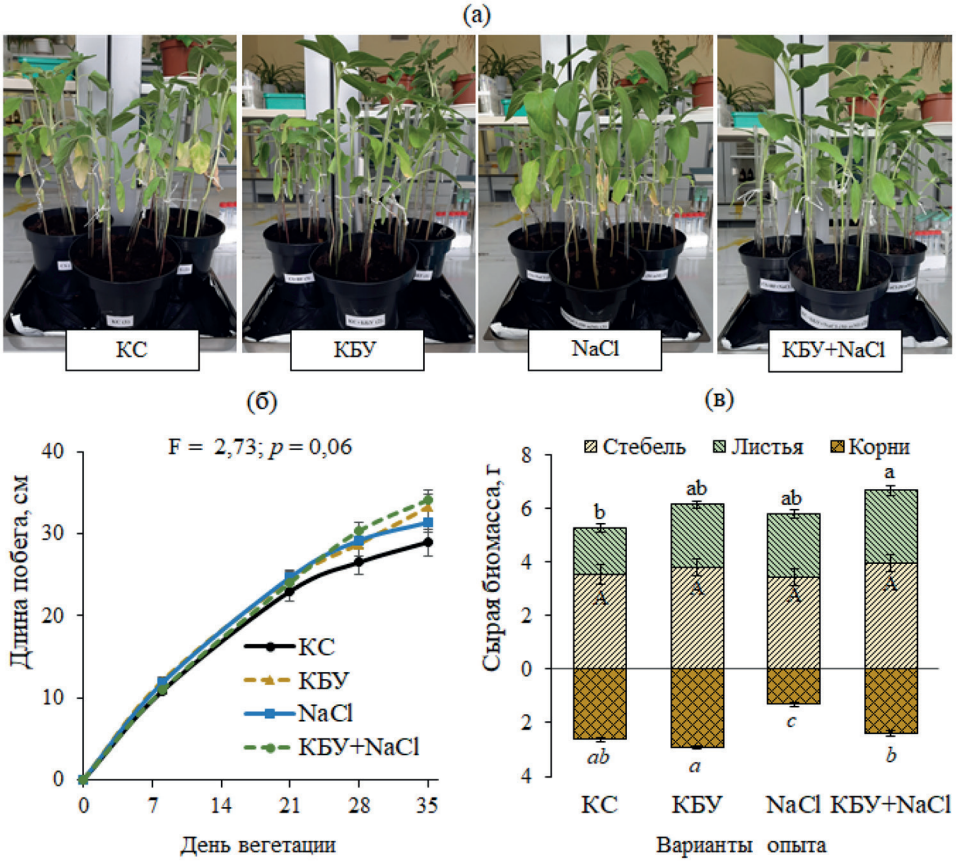

Рис. 1. Внешний вид растений подсолнечника в конце эксперимента (а), длина побега (б), сырая биомасса надземных и подземных органов (в). КС – контрольный субстрат, КБУ – композитное биоудобрение

Fig. 1. Appearance of sunflower plants at the end of the experiment (a), shoot length (b), fresh biomass of aboveground and underground organs (c). CS – control substrate, CBF – composite biofertilizer

Важным индикатором реакции растений на неблагоприятные условия среды является выход электролитов из клеток и коэффициент повреждения [9, 16]. Осмотический стресс приводит к разрушению мембран, поэтому по величине оттока электролитов из тканей в раствор можно судить о степени повреждения клеточных структур. В условиях

NaCl-индуцированного стресса выход электролитов оказался в 3,5 раза выше, чем в контроле (рис. 2б), при этом КП был равен 30,8 %. Отдельное внесение КБУ практически не влияло на выход электролитов (КП = 2,6 %). Добавление КБУ при солевом стрессе снижало данный показатель в 1,4 раза по сравнению с отдельной NaCl-обработкой, что свидетельствует об уменьшении повреждения мембран (КП = 17,7 %) и повышении солеустойчивости подсолнечника ($F_{(КБУ + NaCl)} = 38,44$; $p < 0,001$). Такой эффект, вероятно, в большей степени связан с применением биочара, входящего в состав КБУ, поскольку именно он способен связывать избыток ионов Na, уменьшая их транслокацию в надземные органы [6, 15]. Кроме того, PGPR *Pseudomonas* sp. в составе КБУ, обладая ростстимулирующими свойствами, могли способствовать синтезу различных метаболитов, повышающих общую устойчивость растений, а также индуцирующих их адаптивные реакции к солевому стрессу [23].

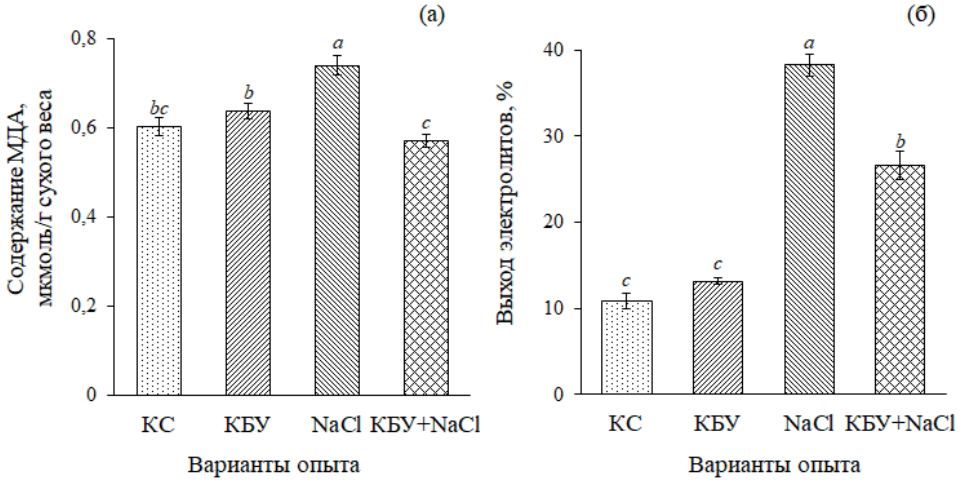

Рис. 2. Содержание малонового диальдегида (а) и выход электролитов (б) в листьях подсолнечника. КС – контрольный субстрат, КБУ – композитное биоудобрение

Fig. 2. Malondialdehyde content (a) and electrolyte leakage (b) in sunflower leaves. CS – control substrate, CBF – composite biofertilizer

Важное место при изучении влияния неблагоприятных факторов на растения занимает оценка содержания свободного пролина, как осмопротектора и индикатора стресса [4, 10, 16]. Пролин у подсолнечника накапливался преимущественно в листьях, где его содержание было в среднем в 8,5 раз выше, чем в корнях (рис. 3а). При поливе растений солевым раствором количество пролина возрастало в 1,5 раза (как в листьях,

так и в корнях). NaCl-индуцированное увеличение содержания пролина было зафиксировано и на других культурах. В условиях стресса при действии 80 мМ NaCl содержание свободного пролина в листьях горчицы салатной увеличивалось почти в 5 раз [4]. Почти пятикратное увеличение содержание пролина также наблюдалось у 21-дневных проростков фасоли при однократном поливе 1 %-раствором NaCl [12]. Слабое и умеренное (50 и 100 мМ) NaCl-засоление активировало накопление пролина у растений картофеля [10]. У томатов даже под влиянием 50 мМ NaCl содержание пролина увеличивалось почти в 11 раз [16]. При совместном использовании КБУ и NaCl содержание пролина у подсолнечника снижалось в 1,6 раз по сравнению с NaCl-вариантом ($F_{(КБУ+NaCl)}$.= 86,22; $p < 0,001$). Подобный результат был получен на рисе [23], где совместное использование биочара и PGPR существенно снижало NaCl-индуцированное накопление пролина.

К числу важнейших неэнзиматических антиоксидантов относятся фенольные соединения, включая флавоноиды [19]. Доля флавоноидов от общего количества растворимых фенолов при добавлении как солевого раствора, так и КБУ, существенно (почти в 2 раза) повышалась. В условиях солевого стресса общее содержание фенольных соединений в листьях подсолнечника возрастало, хотя и незначительно (на 7 %), тогда как накопление флавоноидов увеличивалось в 1,8 раз (рис. 3б). В варианте КБУ + NaCl содержание фенолов, как и свободного пролина, существенно снижалось по сравнению с раздельным добавлением соли ($F_{(КБУ + NaCl)}$.= 22,51; $p < 0,001$) Вероятно, NaCl-индуцированное накопление свободного пролина и фенольных соединений (особенно флавоноидов) способствовало снижению окислительного стресса у подсолнечника.

При изучении соотношения ионов калия и натрия в различных органах подсолнечника отмечено, что в контроле K^+/Na^+ в листьях было выше, чем в стебле и корне – в 1,8 и 4,6 раз, соответственно (табл. 1). Добавление КБУ увеличивало величину K^+/Na^+ как в надземных, так и подземных органах, в среднем на 40 %. В условиях солевого стресса это отношение существенно снижалось, причём в листьях – в меньшей степени (в 2 раза), а в корнях – в наибольшей (в 8 раз), что свидетельствует об избирательном накоплении Na^+ благодаря барьерным механизмам на границе корень–стебель. У гликофитов, к которым относится подсолнечник, ключевым механизмом защиты фотосинтетического аппарата является задержка ионов Na^+ в корнях и базальной части стебля путём их извлечения из ксилемного тока. Данный процесс опосредуется транспортерами семейства HKT1, локализованными в стеле корня, и достоверно

коррелирует с повышенной солеустойчивостью [30]. Следует отметить, что добавление КБУ смягчало негативный эффект NaCl, увеличивая отношение K^+/Na^+ во всех органах подсолнечника (в среднем в 1,7 раза).

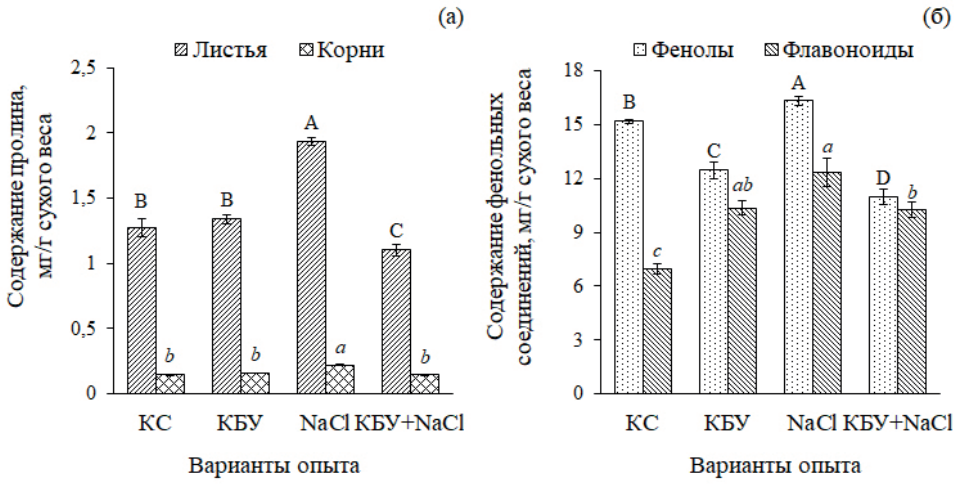

Рис. 3. Содержание свободного пролина в листьях и корнях (а) и растворимых фенольных соединений в листьях (б) подсолнечника.
КС – контрольный субстрат, КБУ – композитное биоудобрение

Fig. 3. Content of free proline in leaves and roots (a) and soluble phenolic compounds in leaves (b) of sunflower. CS – control substrate, CBF – composite biofertilizer

Таблица 1. Соотношение K^+/Na^+ в различных органах подсолнечника

Table 1. K^+/Na^+ ratio in various sunflower organs

Варианты	Листья	Стебель	Корень
КС	16,55 ±0,24[b]	9,06 ±0,16[b]	3,62 ±0,13[b]
КБУ	20,54 ±0,19[a]	13,14 ±0,08[a]	5,32 ±0,10[a]
NaCl	8,24 ±0,18[d]	3,15 ±0,05[d]	0,45 ±0,02[d]
КБУ + NaCl	11,18 ±0,10[c]	5,73 ±0,21[c]	0,99 ±0,02[c]

Измерения pH контрольного субстрата, а также в варианте с внесением КБУ, выявили слабокислую реакцию среды (в среднем 6,1), не претерпевшую статистически значимых изменений (табл. 2). Величина EC в этих вариантах также значимо не менялась. Индуцирование солевого стресса посредством полива раствором NaCl приводило к достоверному снижению

pH и резкому возрастанию величины EC, которая превысила контрольный показатель в 14 раз. Добавление в почву КБУ существенно смягчало негативный эффект засоления: в варианте КБУ + NaCl зафиксировано достоверное увеличение pH (почти до нейтрального значения) и снижение EC на 27 % (по сравнению с NaCl-вариантом). Данный позитивный результат коррелировал с уменьшением содержания подвижного натрия: несмотря на его 22-кратное возрастание при засолении, добавление КБУ снижало его накопление на 13 %. Основной причиной выявленных закономерностей является выраженная сорбционная способность биочара, которая, как показано в исследованиях [6, 23], обеспечивает связывание ионов Na, уменьшая их мобильность и, как следствие, токсическое воздействие на растения. Содержание подвижного калия достоверно увеличивалось лишь в варианте с добавлением КБУ, что, вероятно, могло быть связано с солюбилизирующей активностью PGPR.

Таблица 2. Физико-химические показатели почвы после вегетации подсолнечника

Table 2. Physicochemical parameters of soil after sunflower vegetation

Вариант	pH	EC, *мСм/см*	Содержание подвижного Na, *мг/100 г почвы*	Содержание подвижного K, *мг/100 г почвы*
КС	6,18 ±0,01[b]	0,46 ±0,01[c]	23,94 ±0,47[c]	39,59 ±1,07[b]
КБУ	6,09 ±0,03[b]	0,39 ±0,01[c]	18,22 ±0,41[c]	44,54 ±0,80[a]
NaCl	5,59 ±0,01[c]	6,41 ±0,08[a]	525,90 ±7,2[a]	36,22 ±1,16[b]
КБУ + NaCl	6,48 ±0,05[a]	4,68 ±0,10[b]	455,89 ±11,7[b]	39,28 ±0,63[b]

Выводы. Результаты проведённого исследования демонстрируют негативное влияние солевого стресса на физиолого-биохимические показатели подсолнечника однолетнего сорта ‘Енисей’: двукратное ингибирование биомассы корней, значимое увеличение содержания продуктов перекисного окисления липидов (в 1,2 раза) и утечки электролитов (в 3,5 раза), а также снижение соотношения K^+/Na^+. На действие NaCl растения подсолнечника отвечали статистически значимым возрастанием содержания свободного пролина и растворимых фенольных соединений (особенно флавоноидов). Однако внесение биоудобрения на основе древесного биочара и галотолерантного штамма PGPR *Pseudomonas* sp. STF13 смягчало негативное действие засоления на подсолнечник, нивелируя его влияние на корневую систему, в том числе за счёт снижения содержания МДА в 1,3 раза и уменьшения выхода

электролитов в 1,4 раза по сравнению с отдельным действием NaCl. Кроме того, биоудобрение снижало NaCl-индуцированное накопление свободного пролина и фенольных соединений, что свидетельствует об ослаблении окислительного стресса. Важным механизмом защитного действия КБУ является повышение соотношения K^+/Na^+ во всех органах растений (в среднем в 1,7 раза) благодаря сорбционной способности биочара, что подтверждается снижением содержания доступного натрия и удельной электропроводности почвы на 13 и 27 %, соответственно. Полученные данные свидетельствуют о том, что композитное бактериально-биочарное удобрение обеспечивало двойную защиту от токсического действия NaCl, эффективно повышало устойчивость подсолнечника к натрий-хлоридному засолению, стимулируя рост, снижая окислительный стресс и стабилизируя ионный баланс. В дальнейшем представляется перспективным поиск новых штаммов PGPR с комплексом полезных свойств и оптимизация состава биоудобрений с использованием различных видов биочара для создания адаптивных систем земледелия в условиях изменения биосферы.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 24-76-10062,
https://rscf.ru/project/24-76-10062/

Список литературы / References

1. Аликулов Б.С. Механизмы снижения солевого стресса у растений при помощи солеустойчивых бактерий, выделенных из галофитов, Научное обозрение. Биологические науки. 2023; 1 : 98-104. [Alikulov B.S. Mechanisms of reducing salt stress in plants using salt-tolerant bacteria isolated from halophytes, Scientific Review. Biological Sciences. 2023; 1 : 98-104 (In Rus)]. DOI: 10.17513/srbs.1321.
2. Артамонова В.С., Дитц Л.Ю., Елизарова Т.Н. и др. Техногенное засоление почв и их микробиологическая характеристика, Сибирский экологический журнал. 2010; 3 : 461-470 [Artamonova V.S., Dietz L.Yu., Elizarova T.N., et al. Technogenic salinization of soils and their microbiological characteristics, Siberian Ecological Journal. 2010; 3 : 461-470. (In Rus)].
3. Борисова Г.Г., Малева М.Г., Дарказанли М. и др. Влияние Zn-солюбилизирующих PGP-ризобактерий на рост и содержание биогенных элементов в сеянцах пшеницы озимой в условиях микрокосма, Аграрный вестник Урала. 2024; 24(12) : 1636-1647. [Borisova G.G., Maleva M.G., Darkazanli M., et al. Effect of Zn-solubilizing PGP-rhizobacteria on growth and content of biogenic elements in winter wheat seedlings under microcosm conditions. Agrarian Bulletin of the Urals. 2024; 24 (12) : 1636-1647. (In Rus)]. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-12-1636-1647.
4. Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С. и др. Влияние бактериального биоудобрения на морфофизиологические показатели горчицы в условиях солевого стресса, Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025; 1(69) : 4-14. [Borisova G.G., Avramenko A.V., Tugbaeva A.S., et al. Influence of Bacterial Biofertilizer

on Morphophysiological Indicators of Mustard Under Salt Stress, Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2025; 1(69) : 4-14 (in Russ)]. DOI: 10.36906/2311-4444/25-1/01.
5. Бетехтина А.А., Малева М.Г., Малахеева А.В. и др. Влияние дефицита азота на морфофизиологические параметры *Helianthus annuus* и пул N-трансформирующих бактерий в его ризосфере, Субтропическое и декоративное садоводство. 2025; 95 : 255-270. [Betekhtina A.A., Maleva M.G., Malaheeva A.V., et al. Effect of nitrogen deficiency on the morphophysiological parameters of *Helianthus annuus* and the pool of N-transforming bacteria in its rhizosphere, Subtropical and Ornamental Horticulture. 2025; 95 : 255-270. (In Rus)]. DOI: 10.31360/2225-3068-2025-95-255-271.
6. Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Шимански В. и др. Изменение биологических и физических параметров почв разного гранулометрического состава после внесения биоугля, Сельскохозяйственная биология. 2017; 52(3) : 471-477. [Buchkina N.P., Balashov E.V., Shimansky V., et al. Changes in biological and physical parameters of soils of different particle size distribution after the application of biochar, Agricultural Biology. 2017; 52(3) : 471-477. (In Rus)]. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.471rus.
7. Воеводина Д.Е., Осипова А.В. Влияние натриево-хлоридного засоления на прорастание семян и биометрические показатели яровой пшеницы на ранних этапах онтогенеза, Биологические науки Казахстана. 2025; 2 : 8-22. [Voevodina D.E., Osipova A.V. The influence of sodium-chloride salinity on seed germination and biometric indicators of spring wheat at the early stages of ontogenesis, Biological Sciences of Kazakhstan. 2025; 2 : 8-22 (In Rus)]. DOI: 10.52301/1684-940X-2025-2-8-22.
8. Гаврилова В.А., Ступникова Т.Г., Исаева М.В. и др. Линии декоративного подсолнечника генетической коллекции ВИР, Масличные культуры. 2025; 1(201) : 29-40. [Gavrilova V.A., Stupnikova T.G., Isaeva M.V., et al. Lines of ornamental sunflower from the genetic collection of VIR, Oilseeds. 2025; 1(201) : 29-40. (In Rus)]. DOI: 10.25230/2412-608X-2025-1-201-29-40.
9. Гришенкова Н.Н., Лукаткин А.С. Определение устойчивости растительных тканей к абиотическим стрессам с использованием кондуктометрического метода, Поволжский экологический журнал. 2005; 1 : 3-11. [Grishenkova N.N., Lukatkin A.S. Determination of plant tissue resistance to abiotic stress using the conductometric method, Volga Region Ecological Journal. 2005; 1 : 3-11. (In Rus)].
10. Данилова Э.Д., Медведева Ю.В., Ефимова М.В. Влияние хлоридного засоления на ростовые и физиологические процессы растений *Solanum tuberosum* среднеспелых сортов. Вестник Томского государственного университета, Биология. 2018; 44 : 158-171. [Danilova E.D., Medvedeva Yu.V., Efimova M.V. Effect of chloride salinity on the growth and physiological processes of mid-season *Solanum tuberosum* varieties. Bulletin of Tomsk State University, Biology. 2018; 44 : 158-171. (In Rus)]. DOI: 10.17223/19988591/44/9.
11. Иванищев В.В., Евграшкина Т., Бойкова О.И. и др. Засоление почвы и его влияние на растения, Известия ТулГУ. 2020; 3 : 28-42. [Ivanishchev V.V., Evgrashkina T., Boykova O.I., et al. Soil salinization and its effect on plants, Izvestiya Tula State University. 2020; 3 : 28-42. (In Rus)]. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-3-1-28-42.
12. Маркова О.В., Гарипова С.Р., Пусенкова Л.И. Изменение физиолого-биохимических показателей растений *Phaseolus vulgaris* L. Сорта ‘Эльза’ в норме и при солевом стрессе в ответ на инокуляцию различными по эффективности штаммами эндофитных бактерий *Bacillus subtilis*, Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2025; 18(4) : 534-549. [Markova O.V., Garipova S.R., Pusenkova L.I. Physiological and biochemical parameters of *Phaseolus vulgaris* L. ‘Elsa’ under normal conditions and under salt stress: effects of inoculation with different strains of the endophytic *Bacillus*

subtilis, Journal of Siberian Federal University, Biology. 2025; 18(4) : 534-549. (In Rus)].
13. Осипов А.В., Колесниченко Т.В., Димитриенко О.В. Влияние антропогенных изменений на биологическую активность почв, Научный журнал «GLOBUS». 2021; 7(64) : 26-29. [Osipov A.V., Kolesnichenko T.V., Dimitrienko O.V. The influence of anthropogenic changes on the biological activity of soils, Scientific journal "GLOBUS". 2021; 7(64) : 26-29. (In Rus)].
14. Рахматуллина Н.Ш., Насриддинова П.М., Акиншина Н.Г. и др. Адаптация фотосинтетического аппарата растений к солевому стрессу, Научное обозрение. Биологические науки. 2022; 1 : 56-61. [Rakhmatullina N.Sh., Nasriddinova P.M., Akinshina N.G., et al. Adaptation of the photosynthetic apparatus of plants to salt stress, Scientific Review. Biological Sciences. 2022; 1 : 56-61. (In Rus)].
15. Шафигуллина Л.Р. Различные аспекты применения биочара, Вестник магистратуры. 2020; 5-5(104) : 7-10. [Shafigullina L.R. Various aspects of biochar application, Magistracy Bulletin. 2020; 5-5(104) : 7-10. (In Rus)].
16. Aazami M.A., Rasouli F., Ebrahimzadeh A. Oxidative damage, antioxidant mechanism and gene expression in tomato responding to salinity stress under in vitro conditions and application of iron and zinc oxide nanoparticles on callus induction and plant regeneration, BMC Plant Biology. 2021; 21 : 597. DOI: 10.1186/s12870-021-03379-7.
17. Adeleke B.S., Babalola O.O. Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits, Food Science & Nutrition. 2020; 8(9) : 4666-4684. DOI: 10.1002/fsn3.1783.
18. Azeem M., Sultana R., Ahmed N., et al. Salinity stress resilience in *Sorghum bicolor* through *Pseudomonas*-mediated modulation of growth, antioxidant system, and eco-physiological adaptations, ACS Omega. 2025; 10(1) : 940-954. DOI: 10.1021/acsomega.4c08110.
19. Borisova G., Maleva M., Tripti, et al. Amalgamation of metal tolerant PGPR *Buttiauxella* sp. EA20 with birch wood biochar enhanced growth and biofortification of rapeseed under copper action, Frontiers in Bioscience (Elite Ed). 2024; 16(4) : 34. DOI: 10.31083/j.fbe1604034.
20. Chen F., Xiao L., Huang Q., et al. Physiological evaluation of salt tolerance in sunflower seedlings across different genotypes, Agronomy. 2024; 14(12) : 2995. DOI: 10.3390/agronomy14122995.
21. Gul-Lalay, Ullah S., Shah S., et al. Combined effect of biochar and plant growth-promoting rhizobacteria on physiological responses of canola (*Brassica napus* L.) subjected to drought stress, Journal of Plant Growth Regulation. 2024; 43(6) : 1814-1832. DOI: 10.1007/s00344-023-11219-1.
22. Gunarathne V., Senadeera A., Gunarathne U., et al. Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil, Biochar. 2020; 2(1) : 107-120. DOI: 10.1007/s42773-020-00036-4.
23. Hafez E.M., Alsohim A.S., Farig M. Synergistic effect of biochar and plant growth promoting rhizobacteria on alleviation of water deficit in rice plants under salt-affected soil, Agronomy. 2019; 9 : 847. DOI: 10.3390/agronomy9120847.
24. Li W., Zhang H., Zeng Y., et al. A salt tolerance evaluation method for sunflower (*Helianthus annuus* L.) at the seed germination stage, Scientific Reports. 2020; 10(1) : 10626. DOI: 10.1038/s41598-020-67210-3.
25. Liang S., Wang S.-N., Zhou L.-L., et al. Combination of biochar and functional bacteria drives the ecological improvement of saline–alkali soil, Plants. 2023; 12(2) : 284. DOI: 10.3390/plants12020284.
26. Maleva M., Malakheeva A., Salata A., et al. Effect of various doses of birch-derived bio-

char on the growth of *Helianthus annuus* L., BIO Web of Conferences. 2024; 121 : 02006. DOI: 10.1051/bioconf/202412102006.
27. Malik L., Sanaullah M., Mahmood F., et al. Co-application of biochar and salt tolerant PGPR to improve soil quality and wheat production in a naturally saline soil, Rhizosphere. 2024; 29 : 100849. DOI: 10.1016/j.rhisph.2024.100849.
28. Pan L., Mao L., Zhang H., et al. Modified biochar as a more promising amendment agent for remediation of pesticide-contaminated soils: Modification methods, mechanisms, applications, and future perspectives, Applied Sciences. 2022; 12(22) : 11544. DOI: 10.3390/app122211544.
29. Saifullah D.S., Naeem A., Rengel Z., et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities, Science of the Total Environment. 2018; 625 : 320-335. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.257.
30. Su Y., Luo W., Lin W., et al. Model of cation transportation mediated by high-affinity potassium transporters (HKTs) in higher plants, Biological Procedures Online. 2015; 17 : 1. DOI: 10.1186/s12575-014-0013-3.

A COMPOSITE BIOCHAR-BASED BIOFERTILIZER WITH A HALOTOLERANT PGPR *PSEUDOMONAS* SP. MITIGATES NACL-INDUCED STRESS IN SUNFLOWER

Borisova G.G.[1], Maleva M.G.[1], Salata A.A.[1], Tugbaeva A.S.[1], Avramenko A.V.[1], Sobenin A.V.[2]

[1] Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

[2] Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Yekaterinburg, Russia, e-mail: maria.maleva@mail.ru

Soil salinization is one of the global problems. Therefore, it is of particular importance to identify the mechanisms of salt resistance in cultivated plants. The effect of composite biofertilizer (CBF) based on wood biochar and halotolerant growth-stimulating rhizobacteria (PGPR *Pseudomonas* sp. STF13) on the growth and physiological and biochemical parameters of sunflower (*Helianthus annuus* L.) of the Yenisei cultivar was studied in normal conditions and under sodium chloride salination. The vegetation experiment included 4 options: control substrate (CS); CS with the addition of CBF (2.5 % by volume); CS with watering of 80 mM NaCl; CS with the combined use of CBF + NaCl. The plants were grown for 5 weeks in natural light and at room temperature. It was found that CBF significantly improved the morphometric parameters of plants, increasing the raw biomass of roots and leaves by 11 and 33 %, respectively, compared with CS. The addition of NaCl suppressed root development, reducing their weight by 2 times. However, the use of CBF + NaCl almost completely eliminated this negative effect, stimulating the growth of root biomass to the control level. At the biochemical level, CBF also demonstrated a protective effect: under salt stress, the intensity of lipid peroxidation decreased (the content of malonic dialdehyde was 1.3 times lower than under the action of salt), and the release of electrolytes from tissues decreased by 1.4 times,

which indicates a decrease in oxidative stress. The introduction of CBF also had a positive effect on ionic homeostasis, increasing the K^+/Na^+ ratio in plant organs under salinization conditions by 1.7 times on average and preventing Na+ translocation into leaves. Salinization caused a 14-fold increase in the specific electrical conductivity of soils in comparison with CS, however, CBF offset this effect, reducing its value by 27 %. The results obtained indicate the prospects of using composite biofertilizers based on biochar and PGPR to increase the salt resistance of crops and restore the fertility of saline soils.

Key words: *Helianthus annuus* L., sodium chloride salinity, plant growth promoting activity, morphophysiological parameters, plant salt resistance.