

Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С., Собенин А.В., Малева М.Г.

## ВЛИЯНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО БИОУДОБРЕНИЯ НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРЧИЦЫ В УСЛОВИЯХ СОЛЕВОГО СТРЕССА

G.G. Borisova, A.V. Avramenko, A.S. Tugbaeva, A.V. Sobenin, M.G. Maleva

### INFLUENCE OF BACTERIAL BIOFERTILIZER ON MORPHOPHYSIOLOGICAL INDICATORS OF MUSTARD UNDER SALT STRESS

**Аннотация.** Использование бактериальных удобрений является одной из эффективных технологий выращивания культурных растений в условиях засоления. Выполнена оценка влияния биоудобрения (ББУ) на основе биочара и галотолерантного штамма ростстимулирующих ризобактерий *Pseudomonas* sp. STF14 на рост и некоторые физиолого-биохимические характеристики горчицы сарептской салатной (*Brassica juncea* (L.) Czern, сорт «Частушка») в условиях солевого стресса, вызванного действием хлорида натрия. Растения горчицы выращивали в горшечных культурах в течение 21 суток при естественных условиях. Эксперимент включал 4 варианта: контрольный торфогрунт (ТГ); ТГ + ББУ (2,5%, по объему); ТГ + NaCl (80 mM); ТГ + ББУ (2,5%, по объему) + NaCl (80 mM). Растения поливали раствором соли дважды в неделю, начиная с 7-дня после посева. Добавление ББУ увеличивало длину и сырую биомассу побегов горчицы по сравнению с контролем (в среднем на 23%), тогда как обработка NaCl ингибировала их рост. Кроме того, ББУ (как отдельно, так и совместно с NaCl) положительно влияло на содержание фотосинтетических пигментов. При раздельном применении ББУ и NaCl содержание малонового диальдегида в листьях горчицы увеличивалось в сравнении с контролем в 1,4 и 1,9 раз, соответственно. Однако при их совместном использовании оно снижалось в 1,6 раза. Полив растений горчицы раствором соли почти в 5 раз увеличивал содержание свободного пролина и почти в 7 раз – Na<sup>+</sup>, тогда как ББУ + NaCl существенно снижали их количество. Таким образом, применение ББУ в условиях солевого стресса способствовало улучшению роста горчицы и повышению её устойчивости к хлориду натрия.

**Ключевые слова:** *Brassica juncea*; *Pseudomonas* sp.; галотолерантные ризобактерии; биочар; хлорид

**Abstract.** Bacterial fertilizers are an effective technology for growing crops under saline conditions. The effect of biofertilizer (BF) based on biochar and halotolerant strain of growth-promoting rhizobacteria *Pseudomonas* sp. STF14 on the growth and some physiological and biochemical characteristics of salad mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern, variety “Chastushka”) under salt stress caused by sodium chloride was assessed. Mustard plants were grown in pot-scale experiment for 21 days under natural conditions. The experiment included 4 treatments: control peat soil (PS); PS + BF (2.5%, v/v); PS + NaCl (80 mM); PS + BF (2.5%, v/v) + NaCl (80 mM). From the 7th day after planting the plants were watered with a salt solution twice a week. Adding BF increased the length and fresh biomass of mustard shoots compared to the control (by 23% on average), while NaCl treatment inhibited their growth. BF added separately or together with salt increased photosynthetic pigments. Separate application of BF and NaCl led to the malondialdehyde in mustard leaves increasing by 1.4 and 1.9 times, respectively compared to the control. However, when combined, malondialdehyde decreased by 1.6 times. Watering mustard plants with a saline solution increased the content of free proline by almost 5 times and Na<sup>+</sup> by almost 7 times, while BF + NaCl significantly reduced their amount. Thus, the use of BF under salt stress conditions contributed to the improvement of mustard growth and increased its resistance to sodium chloride.

**Keywords:** *Brassica juncea*; *Pseudomonas* sp.; halotolerant rhizobacteria; biochar; sodium chloride; growth parameters; photosynthetic pigments; lipid peroxidation; proline.

натрия; параметры роста; фотосинтетические пигменты; перекисное окисление липидов; пролин.

**Сведения об авторах:** Борисова Галина Григорьевна, ORCID: 0000-0001-6663-9948, д-р географ. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, G.G.Borisova@urfu.ru; Авраменко Анастасия Владимировна, ORCID: 0009-0000-3042-3643, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, avramenkonastya963@mail.ru; Тугбаева Анастасия Сергеевна, ORCID: 0000-0001-9231-3650, канд. биолог. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, anastasia.tugbaeva@gmail.com; Собенин Артем Вячеславович, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия, arsob@yandex.ru; Малева Мария Георгиевна, ORCID: 0000-0003-1686-6071, канд. биолог. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, maria.maleva@mail.ru.

**About the authors:** Galina G. Borisova, ORCID: 0000-0001-6663-9948, Doctor of Geographical Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, G.G.Borisova@urfu.ru; Anastasia V. Avramenko, ORCID: 0009-0000-3042-3643, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, avramenkonastya963@mail.ru; Anastasia S. Tugbaeva, ORCID: 0000-0001-9231-3650, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, anastasia.tugbaeva@gmail.com; Artem V. Sobenin, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, arsob@yandex.ru; Maria G. Maleva, ORCID: 0000-0003-1686-6071, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, maria.maleva@mail.ru.

Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С., Собенин А.В., Малева М.Г. Влияние бактериального биоудобрения на морфобиологические показатели горчицы в условиях солевого стресса // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 4-14. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/01>

Borisova, G.G., Avramenko, A.V., Tugbaeva, A.S., Sobenin, A.V., & Maleva, M.G. (2025). Influence of Bacterial Biofertilizer on Morphophysiological Indicators of Mustard Under Salt Stress. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 4-14. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/01>

## Введение

Засоление почв является одной из наиболее серьёзных экологических проблем, с которыми сталкивается сельское хозяйство во всем мире. Засоление может быть результатом естественных процессов, однако на сегодняшний день большая часть территорий с повышенным содержанием солей приурочена к урбанизированным районам [4; 7]. Чаще всего это связано с чрезмерным использованием химических удобрений и пестицидов, неправильным орошением и, в целом, с высокой нагрузкой на пахотный слой, что приводит к деградации почв и сокращению пахотных территорий [2; 7; 9].

Повышенное содержание солей в почве подкисляет её, ускоряет процессы минерализации, угнетает жизнедеятельность ассоциативных микроорганизмов, связывает почвенную влагу, приводит к нарушению не только физиологических процессов в растениях, но и биогеохимических циклов элементов в целом [2; 5]. Понимание этих процессов важно для разработки эффективных технологий выращивания культурных

растений на засоленных почвах, а также восстановления деградированных территорий [2; 8].

Перспективной стратегией решения данной проблемы является использование экологически безопасных биопрепаратов, повышающих устойчивость сельскохозяйственных культур к солевому стрессу, а также предотвращающих дальнейшее засоление почв. Одним из таких мелиорантов является биочар, получаемый из органических материалов путем пиролиза [8; 15]. Многими авторами отмечено, что добавление биочара в засоленную почву увеличивает содержание органических и минеральных веществ, улучшает аэрацию и влагоудерживающую способность почвы, а также нормализует pH почв. Благодаря абсорбционной способности, биочар может связывать различные токсичные вещества – например, ионы натрия, – уменьшая их доступность для растений [10; 12]. Кроме того, биочар может выступать в качестве носителя для различных микроорганизмов [3; 9; 16]. Поэтому его часто используют в сочетании с ризосферными бактериями, стимулирующими рост растений (от англ. “Plant Growth-Promoting Rhizobacteria”, PGPR), которые даже в условиях стресса улучшают усвоение питательных веществ и способствуют развитию корневой системы и росту растений [11; 13]. Такое комбинированное использование биочара и PGPR может создать синергетический эффект, способствующий снижению солевого стресса у растений, восстановлению засоленных почв, а также повышению их продуктивности [1; 9; 13; 14].

Цель исследования – оценить влияние биоудобрения на основе биочара и галотолерантного штамма PGPR *Pseudomonas* sp. STF14 на рост и некоторые физиолого-биохимические характеристики горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern) в условиях солевого стресса, вызванного действием хлорида натрия.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран салатный сорт горчицы сарептской «Частушка», как раннеспелый и высокоурожайный; кроме того, эта важная сельскохозяйственная культура широко используется в аграрном секторе и в пищевой промышленности. Известно, что горчица сарептская способна к быстрому росту, обладает высокой устойчивостью к неблагоприятным условиям среды и может расти на бедных и засоленных почвах, улучшая их структуру и повышая плодородие [19].

В ходе эксперимента изучали эффекты бактериального биоудобрения (ББУ) на основе биочара и селективного штамма PGPR (*Pseudomonas* sp. STF14). Для его создания был использован коммерческий биочар (ООО «ДианАгро», Новосибирск, Россия), изготовленный из берёзовой древесины путем пиролиза. Для создания ББУ был также выбран штамм PGPR, выделенный в 2023 г. из ризосферы *Tussilago farfara* L., произрастающей вблизи рудника «Сафьяновская медь» (Реж, Свердловская область). Принадлежность этого штамма к роду *Pseudomonas* была подтверждена с помощью секвенирования генома 16S рРНК [21]. Предварительное тестирование штамма на PGP-способности и устойчивость к засолению показало, что он способен к солибилизации

фосфатов (до 34,8 мг  $\text{PO}_4^{3-}/\text{л}$ ), продукции индолил-3-уксусной кислоты (ИУК, до 31,8 мг/л), выработке сидерофоров и аммиака [21]; кроме того, он оказался устойчив к высоким концентрациям  $\text{NaCl}$  – выдерживал до 800 мМ без угнетения роста культуры.

Для создания ББУ биочар измельчали, а затем смешивали в пропорции 5:1 (по объему) с жидкой культурой *Pseudomonas* sp. STF14 ( $10^8$  КОЕ/мл), предварительно выращенной на среде Луриа–Бертани. Готовое биоудобрение добавляли к торфогрунту (низинный нейтрализованный торф, ГК «Селигер-Агро», Тверь, Россия) в концентрации 2,5% (по объему) и использовали для заполнения пластиковых контейнеров объемом 3 л. Эксперимент включал 4 варианта: 1) контрольный торфогрунт (ТГ); 2) ТГ + 2,5% ББУ; 3) ТГ + 80 мМ  $\text{NaCl}$ ; 4) ТГ + 2,5% ББУ + 80 мМ  $\text{NaCl}$ . Повторность составляла 3 контейнера по ~150 растений. Для формирования солевого стресса растения в 3-м и 4-м вариантах поливали дважды в неделю 80 мМ раствором  $\text{NaCl}$  (0,5 л на контейнер), начиная с 7-го дня вегетации после появления всех всходов. Выбор данной концентрации соли был обусловлен результатами рекогносцировочного эксперимента, в ходе которого семена горчицы предварительно проращивали 5 суток на чашках Петри в градиенте концентраций  $\text{NaCl}$  (0–150 мМ). Всхожесть семян горчицы в среднем составляла около 50%. Растения выращивали при естественном освещении и комнатной температуре; общее время вегетации – 21 день.

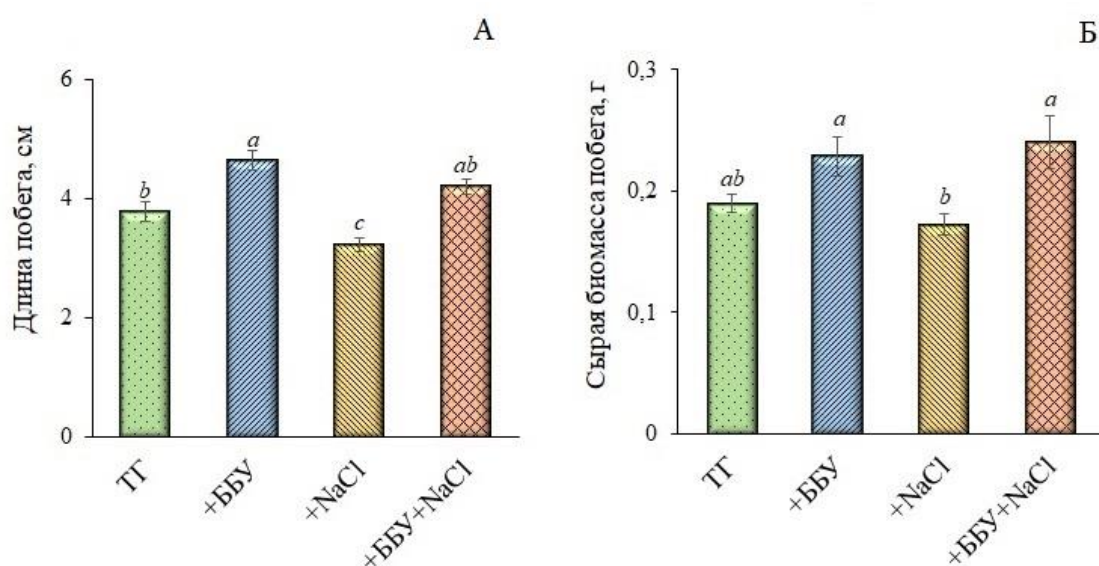
По окончании эксперимента на свежем растительном материале были измерены длина и сырая биомасса сеянцев, а также определены некоторые физиолого-биохимические характеристики растений, содержание натрия в побегах и физико-химические параметры почв. Для анализа содержания фотосинтетических пигментов их экстрагировали из свежих листьев (50 мг) в 80% растворе охлажденного ацетона. Содержание хлорофиллов (Хл *a*, Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически («APEL» PD-303UV) при 470, 647 и 663 нм и рассчитывали согласно Lichtenthaler [20]. Содержание малонового диальдегида (МДА) определяли после гомогенизации навески свежих листьев в растворе 0,25% тиобарбитуровой кислоты в 10% трихлоруксусной кислоте [17]. Содержание свободного пролина определяли по модифицированной методике с использованием кислого нингидринового реактива [6]. Величину pH, удельную электропроводность (ЕС) и содержание  $\text{NaCl}$  определяли в почвенно-водной суспензии в соотношении 1:5 (почва: дистиллированная вода) с помощью портативного pH-метра/кондуктометра (Hanna Instruments GmbH, Graz, Австрия). Определение содержания доступного натрия в почве и общего натрия в побегах проводили при помощи атомно-абсорбционного спектрометра AA240FS (Varian Australia Pty Ltd., Австралия). Доступный натрий определяли после экстракции 2,5 г почвы в 50 мл 5%  $\text{HNO}_3$  (осч.), а общий натрий в растительном материале – после его озоления 70%-ной азотной кислотой.

Статистическая обработка проводилась с использованием MS Excel 16.0 и STATISTICA 13.0 (StatSoft Inc., США) и включала в себя расчёт средних арифметических значений каждого параметра и их стандартных ошибок, которые отражены в таблице и на рисунках. При сравнении данных использовали двухфакторный дисперсионный анализ

(two-way ANOVA). В случае значимого влияния рассматриваемого фактора проводили попарное сравнение между его категориями с использованием апостериорного критерия Тьюки (Tukey's test). В таблице и на рисунках разными буквами латинского алфавита обозначены достоверные различия между вариантами при  $p < 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

Оценка влияния ББУ и засоления на ростовые показатели горчицы показала, что наиболее значимым фактором оказалось добавление ББУ: длина и сырая биомасса побега увеличивались в среднем на 22% по сравнению с контролем (рис. 1). Это было подтверждено результатами двухфакторного дисперсионного анализа ( $F = 29,44$ ;  $p < 0,001$ ).



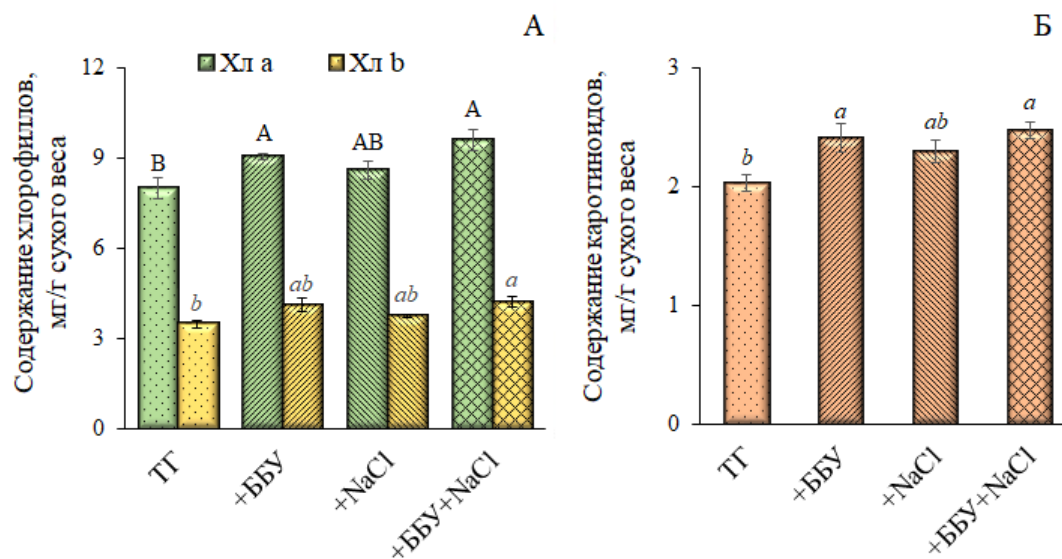
**Рис. 1.** Длина (А) и сырая биомасса (Б) трехнедельного побега горчицы сарептской. ТГ – контрольный торфогрунт. ББУ – бактериальное биоудобрение. Представлены средние арифметические значения  $\pm$  SE ( $n = 4$ ). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между вариантами при  $p < 0,05$

Обработка солевым раствором ингибировала длину и биомассу побега в среднем на 15% от контроля (рис. 1). Совместное влияние ББУ и NaCl не было значимым ( $F = 0,75$ ;  $p = 0,48$ ), однако длина и биомасса побега увеличивались на 11 и 23%, соответственно, следовательно, внесение ББУ в некоторой степени нивелировало солевой стресс и способствовало росту горчицы.

Способность многих штаммов бактерий, ассоциированных с культурными растениями, стимулировать их рост и повышать устойчивость в условиях стресса давно доказана [1; 11; 21]. Положительный эффект ББУ на параметры роста горчицы, очевидно, объясняется увеличением доступности важнейших нутриентов под влиянием ризобактерий, а также проявлением ими других PGP-свойств. Так, ранее было показано, что используемый нами селективный штамм *Pseudomonas* sp. STF14 способен к солибилизации недоступных фосфатов, продукции ИУК, а также выработке сидерофоров и аммиака [21].

Улучшению роста горчицы при добавлении ББУ, возможно, благоприятствовал и биочар, входящий в его состав. Известно, что он обладает способностью улучшать структуру почвы, увеличивать её водоудерживающую способность и содержание питательных веществ [3; 10; 12].

Одним из индикаторов ответной реакции растений на условия произрастания является состояние пигментного комплекса, которое зависит от содержания и соотношения фотосинтетических пигментов [20]. При внесении ББУ (отдельно или совместно с NaCl) содержание хлорофиллов и каротиноидов в среднем увеличивалось на 20% (рис. 2).



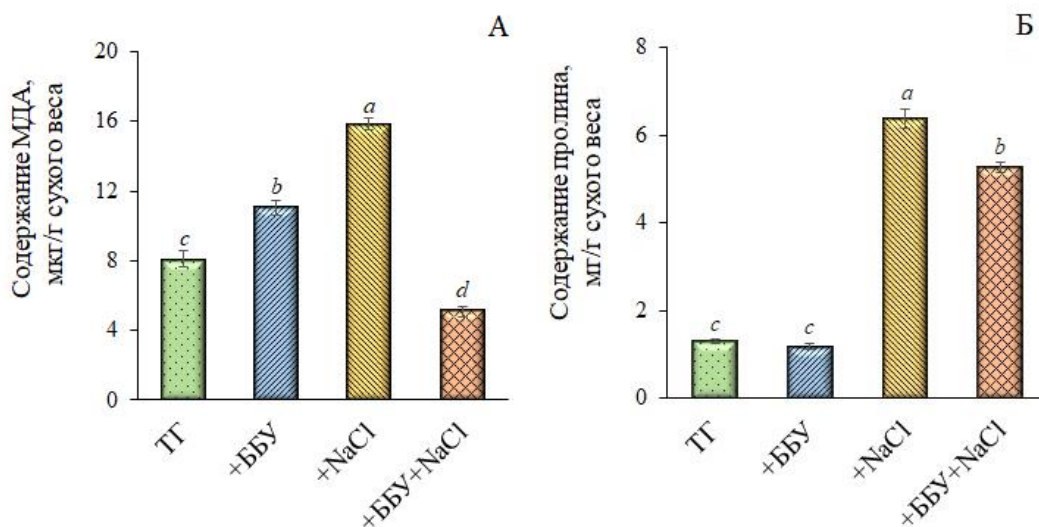
**Рис. 2.** Содержание хлорофиллов (А) и каротиноидов (Б) в листьях трехнедельных сеянцев горчицы сарептской. Хл – хлорофилл. ТГ – контрольный торфогрунт. ББУ – бактериальное биоудобрение. Представлены средние арифметические значения  $\pm$  SE ( $n = 4$ ). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между вариантами при  $p < 0,05$

ANOVA-тест подтвердил значимость влияния данного фактора на фотосинтетические пигменты горчицы ( $F = 11,69$ ;  $p < 0,01$ ). При этом соотношение Хл *a*/Хл *b* и суммы хлорофиллов к каротиноидам в среднем составляло 2,3 и 5,5, соответственно, и достоверно не менялось, что свидетельствует об устойчивости пигментного комплекса изучаемой культуры.

Повышенное содержание продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), таких как МДА – индикатор того, что растения испытывают стресс и их мембраны повреждены [17]. Дисперсионный анализ показал достоверную значимость всех факторов, влияющих на этот параметр ( $F = 146,74$ ;  $p < 0,001$ ).

Добавление ББУ приводило к увеличению содержания МДА в листьях горчицы на 38% по сравнению с контролем (рис. 3А). Однако наибольший окислительный стресс был отмечен при поливе 80 мМ раствором NaCl – содержание МДА увеличивалось в 2 раза. Внесение в почву ББУ при солевом воздействии нивелировало негативное влияние NaCl, снижая количество продуктов ПОЛ на 37% по сравнению с контролем (рис. 3А). Полив

растений горчицы раствором NaCl увеличивал содержание свободного пролина почти в 5 раз по сравнению с контролем, тогда как при совместном действии с ББУ его содержание было на 20% ниже (рис. 3Б).



**Рис. 3. Содержание малонового диальдегида, МДА (А) и свободного пролина (Б) в листьях трехнедельных семян горчицы сарептской. ТГ – контрольный торфогрунт. ББУ – бактериальное биоудобрение. Представлены средние арифметические значения  $\pm$  SE (n = 4). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между вариантами при  $p < 0,05$**

Как было отмечено выше [19], *B. juncea* относится к культурам, для которых характерна высокая устойчивость к неблагоприятным факторам среды. Тем не менее, результаты исследования свидетельствуют о том, что используемая нами концентрация NaCl не только ингибировала рост салатной горчицы, но и вызывала окислительный стресс, сопровождающийся значительным увеличением содержания продуктов ПОЛ. Как известно, пролин играет ключевую роль в защите клеток от осмотического стресса. Поэтому NaCl-индуцируемая аккумуляция пролина является закономерной реакцией растения на солевой стресс. Более того, накопление пролина в клетках при стрессе способствует сохранению клеточного гомеостаза [18]. Подтверждением этому является отсутствие достоверных различий между вариантами по степени оводненности листьев горчицы: в среднем она составляла 93%.

Определение физико-химических показателей почвы по завершении эксперимента в сравнении с исходным ТГ показало отсутствие достоверных различий между всеми вариантами по значению рН, а также между субстратом до и после эксперимента – по значению ЕС, содержанию NaCl и ионов Na (табл.).

Таблица

**Физико-химические показатели почвы до и после выращивания горчицы**

Вариант	рН	ЕС, мСм/см	Содержание NaCl, %	Содержание Na, мг/г почвы

Исходный ТГ	5,93 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,623 ± 0,004 <sup>d</sup>	0,025 ± 0,003 <sup>b</sup>	0,212 ± 0,010 <sup>c</sup>
ТГ (контроль)	5,97 ± 0,06 <sup>a</sup>	0,851 ± 0,017 <sup>cd</sup>	0,028 ± 0,005 <sup>b</sup>	0,229 ± 0,010 <sup>c</sup>
+ББУ	6,08 ± 0,06 <sup>a</sup>	0,871 ± 0,025 <sup>c</sup>	0,038 ± 0,003 <sup>b</sup>	0,240 ± 0,011 <sup>c</sup>
+NaCl	5,86 ± 0,05 <sup>a</sup>	7,238 ± 0,107 <sup>b</sup>	0,433 ± 0,024 <sup>a</sup>	15,228 ± 0,515 <sup>b</sup>
+ББУ+NaCl	5,98 ± 0,05 <sup>a</sup>	8,350 ± 0,053 <sup>a</sup>	0,478 ± 0,013 <sup>a</sup>	17,375 ± 0,395 <sup>a</sup>

Добавление ББУ слегка увеличивало общее содержание солей в почве, в том числе NaCl (на 36%). Полив раствором NaCl увеличивал величину ЕС, содержание NaCl и Na по сравнению с контролем в среднем в 8,5, 15,5 и 66,5 раз, соответственно (таблица). При комбинированном действии ББУ и NaCl значения ЕС, содержание NaCl и Na возрастали еще больше, что объясняется таким свойством биочара как повышенная емкость катионного обмена [3; 9; 10]. Содержание ионов натрия в побегах горчицы при поливе солевым раствором увеличивалось в 6,8 раза (до 30,8 ± 0,6 мг/г сухого веса) по сравнению с контрольным ТГ и ББУ (в среднем 4,8 ± 0,1 мг/г сухого веса). Однако при использовании NaCl в комбинации с ББУ оно снижалось на 46% (до 21,1 ± 0,7 мг/г сухого веса). Возможно, это связано с адсорбирующей способностью биочара вследствие его повышенной емкости поглощения катионов [3].

### Заключение

В условиях NaCl-засоления у горчицы салатной сорт Частушка было отмечено почти семикратное увеличение содержания ионов натрия в побегах и ингибирование ростовых процессов, что свидетельствует о недостаточно высокой солеустойчивости данного сорта. Несмотря на это, содержание фотосинтетических пигментов и их соотношение было стабильным. На действие хлорида натрия растения горчицы отвечали пятикратным увеличением содержания свободного пролина, что, вероятно, способствовало снижению окислительного стресса. Биоудобрение на основе берёзового биочара и галотолерантного штамма PGPR *Pseudomonas* sp. STF14 улучшало параметры роста, препятствовало повышенной аккумуляции Na<sup>+</sup> и отчасти смягчало негативные эффекты солевого стресса.

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

### Литература

1. Аликулов Б.С. Механизмы снижения солевого стресса у растений при помощи солеустойчивых бактерий, выделенных из галофитов // Научное обозрение. Биологические науки. 2023. № 1. С. 98–104. <https://doi.org/10.17513/srbs.1321>.
2. Артамонова В.С., Дитц Л.Ю., Елизарова Т.Н., Лютых И.В. Техногенное засоление почв и их микробиологическая характеристика // Сибирский экологический журнал. 2010. Т. 3. С. 461–470.
3. Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Шимански В., Игаз Д., Хорак Я. Изменение биологических и физических параметров почв разного гранулометрического состава после внесения биоугля // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 471–477. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.471rus>.



4. Гафурова Л.А., Саидова М.Э. Влияние почвенно-экологических факторов на изменение ферментативной активности засоленных почв Южного Приаралья // Научное обозрение. Биологические науки. 2019. № 3. С. 5–10. <https://doi.org/10.17513/srbs.1153>.
5. Иванищев В.В., Евграшкина Т., Бойкова О.И., Жуков Н.Н. Засоление почвы и его влияние на растения // Известия ТулГУ. 2020. № 3. С. 28–42.
6. Калинин Л.Г., Назаренко Л.В., Гордеева Е.Е. Модифицированный метод выделения свободных аминокислот и их определение на аминокислотном анализаторе // Физиология растений. 1990. Т. 37. № 3. С. 617–621.
7. Наместникова О.В., Бузаева М.В. Мониторинг засоления почв в системе обеспечения экологической безопасности крупного города // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (30). С. 44–52.
8. Осипов А.В., Колесниченко Т.В., Димитриенко О.В. Влияние антропогенных изменений на биологическую активность почв // Научный журнал «GLOBUS». 2021. Т. 7 (64). С. 26–28.
9. Шафигуллина Л.Р. Различные аспекты применения биочара // Вестник магистратуры. 2020. №5-5 (104). С. 7–10.
10. Chaganti V.N., Crohn D.M., Šimůnek J. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water // Agricultural Water Management. 2015. Vol. 158. P. 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.016>.
11. Chandran H., Meena M., Swapnil P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture // Sustainability. 2021. Vol. 13(19). P. 1–30. <https://doi.org/10.3390/su131910986>.
12. Drake J.A., Cavagnaro T.R., Cunningham S.C., Jackson W.R., Patti A.F. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? // Land Degradation and Development. 2016. Vol. 27. P. 52–59. <https://doi.org/10.1002/ldr.2374>.
13. Glick B.R. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications // Scientifica. 2012. Vol. 5. P. 1–15. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
14. Gul-Lalay, Ullah S., Shah S., Jamal A. 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. Vol. 43(6). P. 1814–1832. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11219-1>.
15. Gunarathne V., Senadeera A., Gunarathne U., Biswas J.K., Almaroai Y.A., Vithanage M. Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil // Biochar. 2020. Vol. 2 (1). P. 107–120. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00036-4>.
16. Hammer E.C., Balogh-Brunstad Z., Jacobsen I., Olson P.A., Step S.L., Rilling M.C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 77. P. 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.012>.
17. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1968. Vol. 125. P. 189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
18. Kaur G., Asthir B. Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance // Biologia Plantarum. 2015. Vol. 59(4). P. 609–619. <https://doi.org/10.1007/s10535-015-0549-3>.

19. Kumar K.V., Singh N., Behl H.M., Srivastava S. Influence of plant growth promoting bacteria and its mutant on heavy metal toxicity in *Brassica juncea* grown in fly ash amended soil // *Chemosphere*. 2008. Vol. 72(4). P. 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.025>.
20. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes // *Methods in Enzymology*. 1987. Vol. 148. P. 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
21. Maleva M., Borisova G., Tripti, Tugbaeva A., Ahamuefule C., Salata A., Kumar A. Biofortification of pea microgreens through zinc-solubilizing bacteria inoculation with foliar iodine application // *Agriculture and Forest*. 2024. Vol. 70 (2). P. 123–134. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.9>.

## References

1. Alikulov, B.S. (2023). Mexanizmy` snizheniya solevogo stressa u rastenij pri pomoshhi soleustojchivy`x bakterij, vy`delenny`x iz galofitov. *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 1, 98–104. (in Russ.). <https://doi.org/10.17513/srbs.1321>.
2. Artamonova, V.S., Ditc, L.YU., Elizarova, T.N., & Lyutykh, I.V. (2010) Tekhnogennoe zasolenie pochv i ikh mikrobiologicheskaya kharakteristika. *Sibirskij ehkologicheskij zhurnal*, 3, 461–470. (in Russ.).
3. Buchkina, N.P., Balashov, E.V., Shimanski, V., Igaz, D., & Xorak, Ya. (2017). Izmenenie biologicheskix i fizicheskix parametrov pochv raznogo granulometricheskogo sostava posle vneseniya biouglya. *Sel`skoxozyajstvennaya biologiya*, 52 (3), 471–477. (in Russ.). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.471rus>.
4. Gafurova, L.A., & Saidova, M.E. (2019). Vliyanie pochvenno-e`kologicheskix faktorov na izmenenie fermentativnoj aktivnosti zasolenny`x pochv Yuzhnogo Priaral`ya. *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 3, 5–10. (in Russ.). <https://doi.org/10.17513/srbs.1153>.
5. Ivanishhev, V.V., Evgrashkina, T., Bojkova, O.I., & Zhukov, N.N. (2020). Zasolenie pochvy` i ego vliyanie na rasteniya. *Izvestiya TulGU*, 3, 28–42. (in Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-3-1-28-42>.
6. Kalinkina, L.G., Nazarenko, L.V., & Gordeeva, E.E. (1990). Modificirovanny`j metod vy`deleniya svobodny`x aminokislot i ix opredelenie na aminokislotnom analizatore. *Fiziologiya rastenij*, 37 (3), 617–621. (in Russ.).
7. Namestnikova, O.V., & Buzaeva, M.V. (2019). Monitoring zasoleniya pochv v sisteme obespecheniya e`kologicheskoy bezopasnosti krupnogo goroda. *Sovremenny`e problemy` grazhdanskoj zashhity`*, 1 (30), 44–52. (in Russ.).
8. Osipov, A.V., Kolesnichenko, T.V., & Dimitrienko, O.V. (2021). Vliyanie antropogenny`x izmenenij na biologicheskuyu aktivnost` pochv. *Nauchnyj zhurnal «GLOBUS»*, 7 (64), 26–28. (in Russ.). <https://doi.org/10.52013/2658-5197-64-7-5>.
9. Shafigullina, L.R. (2020). Razlichny`e aspekty` primeneniya biochara. *Vestnik magistratury`*, 5-5 (104), 7–10. (in Russ.).
10. Chaganti, V.N., Crohn, D.M., & Šimůnek, J. (2015). Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline–sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.016>.
11. Chandran, H., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(19), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su131910986>.

12. Drake, J.A., Cavagnaro, T.R., Cunningham, S.C., Jackson, W.R., & Patti, A.F. (2016). Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? *Land Degradation and Development*, 27, 52–59. <https://doi.org/10.1002/ldr.2374>.
13. Glick, B.R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica*, 5, 1–15. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
14. Gul-Lalay, Ullah, S., Shah, S., & Jamal, A. (2024). 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*, 43(6), 1814–1832. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11219-1>.
15. Gunarathne, V., Senadeera, A., Gunarathne, U., Biswas, J.K., Almaroai, Y.A., & Vithanage, M. (2020). Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil. *Biochar*, 2 (1), 107–120. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00036-4>.
16. Hammer, E.C., Balogh-Brunstad, Z., Jacobsen, I., Olson, P.A., Step, S.L., & Rilling, M.C. (2014). A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology and Biochemistry*, 77, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.012>.
17. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125, 189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
18. Kaur, G., & Asthir, B. (2015) Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia Plantarum*, 59(4), 609–619. <https://doi.org/10.1007/s10535-015-0549-3>.
19. Kumar, K.V., Singh, N., Behl, H.M., & Srivastava, S. (2008). Influence of plant growth promoting bacteria and its mutant on heavy metal toxicity in *Brassica juncea* grown in fly ash amended soil. *Chemosphere*, 72(4), 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.025>.
20. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
21. Maleva, M., Borisova, G., Tripti, Tugbaeva, A., Ahamuefule, C., Salata, A., & Kumar, A. (2024). Biofortification of pea microgreens through zinc-solubilizing bacteria inoculation with foliar iodine application. *Agriculture and Forest*, 70 (2), 123–134. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.9>.

дата поступления: 27.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

© Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С., Собенин А.В., Малева М.Г., 2025