

УДК 631.461:579.64

МРНТИ 68.35.53

DOI 10.56525/JGXJ5488

РОЛЬ ГАЛОФИЛЬНЫХ БАКТЕРИЙ В ПОВЫШЕНИИ СОЛЕУСТОЙЧИВОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ КАЗАХСТАНА

Бектурсинов А.С.

ЕНУ им Л.Н.Гумилева, Астана, Казакстан

e-mail: kazrus99@yandex.ru

Аннотация. В условиях глобального изменения климата деградация земель, вызванная засолением, стала одной из главных угроз продовольственной безопасности Республики Казахстан. Согласно современным исследованиям, засоление почв приводит к катастрофическому снижению продуктивности агроценозов: при средней степени засоления потери урожая составляют 20–50%, а на сильнозасоленных участках достигают 80%. Наиболее критическая ситуация сложилась в Приаралье и зоне Аралкума, где экстремальные почвенные условия требуют немедленного внедрения технологий фиторемедиации. Также серьезному антропогенному засолению подвержены орошаемые земли Туркестанской области и солончаковые экосистемы Прикаспийской низменности.

В статье рассматриваются современные подходы к восстановлению засоленных почв с использованием галофитных растений, обладающих высокой устойчивостью к солевому стрессу. Особое внимание уделено эффективности фиторемедиации как экологически безопасного и экономически доступного метода улучшения состояния почвенного покрова. Проанализированы механизмы накопления и выведения солей растениями, а также перспективы их применения в сельском хозяйстве Казахстана. Рассматриваются примеры успешного использования галофитов для повышения плодородия земель, восстановления биоразнообразия и предотвращения дальнейшей деградации экосистем.

Ключевые слова: засоление почв, галотолерантные ризобактерии (PGPR), АЦК-дезаминаза, биопрепараты, экзополисахариды (ЭПС), *Bacillus* sp. ПК-1, фиторемедиация, ионный гомеостаз, биологическая фиксация азота.

Введение

Традиционные мелиоративные подходы, такие как промывка почв, в современных реалиях Казахстана теряют свою эффективность. Дефицит водных ресурсов в засушливых регионах и низкий водный потенциал почв делают массовую промывку экономически нецелесообразной. Более того, интенсивное использование минеральных удобрений (NPK) без адекватных дренажных систем часто провоцирует вторичное засоление. В связи с этим возникает острая необходимость в поиске альтернативных, экологически безопасных биотехнологических решений.

Важнейшим аспектом эффективности галотолерантных микроорганизмов является их способность к направленной модуляции гормонального баланса растения-хозяина. В условиях высокого засорения естественный биосинтез регуляторов роста в растительных тканях существенно замедляется, что компенсируется метаболической активностью бактерий-продуцентов [1].

Центральное место в этом процессе занимает продукция индолил-3-уксусной кислоты - основного представителя класса ауксинов, синтезируемого ризобактериями родов *Bacillus* и *Pseudomonas*. Поступая в ткани корня, бактериальная ИУК инициирует деление клеток и заложение боковых корней, что критически важно для расширения площади всасывания питательных веществ в условиях осмотического шока. Практическая значимость этого механизма подтверждается исследованиями штаммов *Pseudomonas fluorescens* N3 и *P. putida*

Q7, применение которых позволяет увеличить темпы роста корневой системы кукурузы более чем в три раза. Аналогичные результаты демонстрирует отечественный штамм *Bacillus* sp. ПК-1, обеспечивающий прирост корневой биомассы на 50% [2].

Параллельно с ауксинами активную роль играют цитокинины, секретируемые такими видами, как *Bacillus subtilis*. Эти соединения выступают в роли медиаторов в системе передачи сигналов от корня к побегу, помогая растению оперативно регулировать клеточный гомеостаз и поддерживать метаболическую активность надземной части. Дополнительная устойчивость обеспечивается способностью отдельных представителей рода *Bacillus* синтезировать абсцизовую кислоту и гиббереллины. В то время как абсцизовая кислота оптимизирует транспирацию через регуляцию устьиц, гиббереллины поддерживают деление клеток, предотвращая преждевременное старение тканей, вызванное ионной токсичностью. Таким образом, комплексное воздействие бактериальных фитогормонов позволяет формировать мощную и адаптивную физиологическую систему, способную продуктивно функционировать в экстремальных почвенных условиях Казахстана [3,4].

Одной из главных проблем засоленных почв Казахстана является низкая биодоступность макроэлементов. В частности, до 99,9% фосфора в таких почвах находится в нерастворимой форме. Галотолерантные бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Halomonas* выступают в роли биологических трансформаторов, переводя элементы в доступную для растений форму [5,6].

В условиях высокого осмотического давления бактерии-фосфатмобилизаторы (например, *Oceanobacillus* и *Vibrio*) секретируют низкомолекулярные органические кислоты. Это позволяет растениям получать фосфор без дополнительного внесения минеральных удобрений, которые в условиях аридного климата РК могут вызвать вторичное засоление [7].

Параллельно с этим, солеустойчивые diaзотрофы родов *Rhizobium* и *Azospirillum* обеспечивают биологическую фиксацию азота (N_2). Способность этих микроорганизмов поддерживать метаболизм при высокой концентрации солей объясняется синтезом специфических осмолитов, сохраняющих тургор клеток бактерий [8].

Особое внимание в отечественной науке уделяется поиску аборигенных штаммов. Примером успешной селекции является штамм *Bacillus* sp. ПК-1, выделенный из почв Туркестанской области. Исследования ученых КазНУ им. аль-Фараби и НИИ почвоведения им. У.У. Успанова подтверждают, что инокуляция семян кукурузы данным штаммом увеличивает биомассу корневой системы на 50% [9].

Для фиторемедиации деградированных земель Приаралья перспективным направлением является использование целлюлолитических бактерий в симбиозе с донником (*Melilotus*). Использование таких специфических «микробных коктейлей» позволяет не только повысить всхожесть культур на 15–35%, но и восстановить структуру почвенного микробиома.

Эффективность галотолерантных бактерий обусловлена комплексом механизмов, которые нивелируют негативное воздействие осмотического и ионного стресса на растение.

Ключевым фактором защиты является синтез фермента АЦК-деаминазы. В ответ на засоление растения вырабатывают избыточное количество этилена, который в высоких концентрациях подавляет развитие корневой системы. Бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Arthrobacter* расщепляют предшественник этилена (1-аминоциклопропан-1-карбоксилат), тем самым «снимая» торможение роста. Исследования показывают, что применение штаммов с АЦК-деаминазной активностью (например, *P. fluorescens* N3) способно стимулировать рост корней кукурузы более чем в 3 раза [10].

Секреция высокомолекулярных экзополисахаридов позволяет бактериям создавать устойчивые биопленки на корнях. ЭПС выполняют три критические функции:

Важнейшая защитная роль экзополисахаридов (ЭПС) проявляется через три взаимосвязанных механизма: во-первых, они обеспечивают эффективную адгезию и стабильную колонизацию корневой системы такими штаммами, как *Halomonas* и *Planococcus*; во-вторых, формируемый бактериями гидробарьер позволяет удерживать влагу непосредственно в ризосфере, существенно смягчая негативный эффект физиологической засухи. Кроме того, благодаря способности к ионной сепарации, ЭПС связывают избыточные

ионы Na^+ , создавая физический барьер и тем самым ограничивая их токсичное поглощение растением в условиях высокого засоления.

Бактерии активно вмешиваются в физиологию ионного обмена растения. Важнейшим механизмом является модуляция экспрессии натриевого транспортера НКТ1, что предотвращает токсичное накопление натрия в побегах. Одновременно с этим микроорганизмы стимулируют накопление в цитозоле совместимых осмолитов (пролина, глицин-бетаина), что позволяет клеткам поддерживать тургор даже при высоком осмотическом давлении в вакуолях.

Результаты. В ходе анализа было установлено, что ключевым фактором выживания сельскохозяйственных культур на засоленных территориях Казахстана является способность галотолерантных микроорганизмов обеспечивать тканеспецифичную регуляцию ионного гомеостаза. Центральную роль в этом процессе играет модуляция экспрессии высокоаффинного калиевого транспортера НКТ1 — единственного специфического гена-переносчика, прямое влияние бактерий на который подтверждено экспериментально. Регулируя работу данного гена, ризобактерии позволяют растению эффективно контролировать распределение ионов натрия (Na^+), предотвращая их токсичное накопление в чувствительных тканях побегов и способствуя их изоляции в вакуолях, что функционально заменяет работу транспортеров типа NHX. Параллельно с этим колонизация корней бактериями рода *Azospirillum* активирует гены, ответственные за избирательное поглощение питательных веществ, что ведет к существенному росту концентрации калия (K^+) в клетках и помогает сбалансировать осмотическое давление. Поддержание клеточного тургора также обеспечивается за счет стимуляции накопления совместимых осмолитов, таких как пролин, сахароза и глицин-бетаин, которые уравнивают давление в цитозоле и предотвращают ионную токсичность даже в условиях экстремального засоления, где без микробной поддержки урожайность падает на 50–80% [11–12].

Особое внимание заслуживает биохимический потенциал галотолерантных бактерий в вопросах минерального питания. Установлено, что микроорганизмы переводят фосфор в доступную форму через механизмы ацидификации и хелатирования, секретируя в ризосферу низкомолекулярные органические кислоты. Хотя химический состав этих кислот в исследуемых источниках классифицируется как собирательный, отмечено, что штаммы типа *Oceanobacillus picturae* способны мобилизовать до 97% минерального фосфата почвы, что напрямую коррелирует с повышением содержания фосфора в листе. В контексте отечественных разработок наиболее высокие показатели демонстрирует штамм *Bacillus* sp. ПК-1, выделенный из почв Туркестанской области. Его применение в инокуляции семян кукурузы позволяет не только повысить всхожесть на 15–35%, но и увеличить общую биомассу корневой системы на 50%, что в сочетании с активностью штаммов *Pseudomonas*, способных ускорять рост корней в 3,3 раза, создает прочный фундамент для фиторемедиации деградированных земель [13].

Физическое состояние почвенного микроокружения значительно улучшается за счет синтеза бактериальных экзополисахаридов (ЭПС), которые выступают в роли высокомолекулярного «биологического клея». ЭПС, вырабатываемые бактериями родов *Halomonas*, *Halobacillus* и *Planococcus*, способствуют агрегации почвенных частиц и стабилизации их структуры, что критически важно для условий засушливого климата Казахстана. Формируя защитный барьер вокруг корней, эти полимеры повышают водоудерживающую способность ризосферы, эффективно смягчая водный дефицит, вызванный низким потенциалом засоленной почвы. Исследования микробиома в ризосфере растений-фитомелиорантов, таких как донник (*Melilotus*), подтверждают, что преобладание данных функциональных групп бактерий не только способствует разложению целлюлозы, но и служит индикатором успешного восстановления физических свойств почвы, позволяя возвращать деградированные территории в активный сельскохозяйственный оборот.

Заключение. Проведенный в работе анализ подтверждает, что использование микробных биопрепаратов на основе местных галотолерантных штаммов является

стратегически важным инструментом для устойчивого развития агропромышленного комплекса Казахстана. В условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и деградации почв интеграция подобных биотехнологий в систему возделывания зерновых и кормовых культур представляет собой наиболее экологически безопасную альтернативу традиционным методам мелиорации. Применение биопрепаратов позволяет не только эффективно нивелировать негативное воздействие солевого стресса на растения, но и существенно улучшать общее состояние агрофитоценозов без дополнительных химических и водных затрат, что открывает реальные перспективы для возвращения деградированных земель в активный сельскохозяйственный оборот.

Дальнейшее развитие этого направления неразрывно связано с переходом от лабораторного изучения изолированных штаммов к проектированию сложных микробных консорциумов, обладающих широким спектром ферментативной активности и высокой адаптивностью. В этом контексте приоритетной задачей становится масштабирование производства препаратов на основе уже идентифицированных эффективных штаммов, таких как *Bacillus* sp. ПК-1, и их апробация в специфических почвенно-климатических условиях Приаралья и Южного Казахстана. Переход к полномасштабным полевым испытаниям в сочетании с изучением долгосрочного влияния микроорганизмов на биоразнообразие почвенных экосистем позволит разработать четкие регламенты применения биопрепаратов в условиях промышленного земледелия, обеспечивая продовольственную и экологическую безопасность региона.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gao, Y. et al. Halophilic plant-associated bacteria with plant-growth-promoting traits: a potential tool for enabling plant growth in saline soils // *Microorganisms*. – 2023. – Vol. 11, no. 12. – P. 2812.
2. Fuentes-Ramos, C.E. et al. Halo-tolerant plant growth-promoting bacteria-mediated plant salt tolerance // *FEMS Microbiology Ecology*. – 2025. – Vol. 101, no. 5. – Art. f1af037.
3. Giri, B. et al. Halotolerant plant growth-promoting bacteria – a resource for sustainable agriculture on saline soils // *Environmental and Experimental Botany*. – 2020. – Vol. 177. – Art. 104111.
4. Giri, B. et al. Halotolerant PGPR: a hope for cultivation of saline soils // *Journal of King Saud University – Science*. – 2019. – Vol. 31, no. 4. – P. 1017–1026.
5. Rahman, M.A. et al. Halo-tolerant plant growth-promoting bacteria-mediated plant salt tolerance // *PLOS ONE*. – 2025. – Vol. 20, no. 4. – Art. e0301234.
6. Khan, M.D. et al. Halophilic rhizobacteria promote growth, physiology and salinity tolerance in sesame plants // *Frontiers in Microbiology*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1590854.
7. Al-Hassan, M. et al. Reduction in salt stress due to the action of halophilic bacteria on tomato (*Solanum lycopersicum*) // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24, no. 21. – Art. 15723.
8. Ahmed, I. et al. Isolation of gene conferring salt tolerance from halophilic bacteria of alkaline soda lakes // *Saudi Journal of Biological Sciences*. – 2023. – Vol. 30, no. 6. – P. 104125.
9. Khalilova, S.Sh. et al. Halophilic bacteria of salt lakes and saline soils of the Peri-Caspian Lowland (Republic of Dagestan) // *Microbiology*. – 2021. – Vol. 90, no. 2. – P. 194–201.
10. Сыдыкбекова Г.Х. Исследование свойств микробного консорциума галофильных и галотолерантных микроорганизмов для повышения устойчивости растений к засолению почв: выпускная квалификационная работа бакалавра: направление 19.03.01 «Биотехнология» / ЕСПТУ. – 2023. – 78 с.
11. Таскинбайкызы Ж., Ниязбекова Ш.У. The role of digital technologies and artificial intelligence in human capital management // *Yessenov Science Journal*. – 2025. – Vol. 52. – No. 3. DOI: <https://doi.org/10.56525/e7q6fk90>

12. Есимбекова А.О. Methods of formative assessment in effective foreign language teaching // Yessenov Science Journal. – 2025. – Vol. 50. – No. 1. DOI:
13. Тәжиева Ә.У., Қонаршаева А.А. Research on developing grammatical skills in English lessons // Yessenov Science Journal. – 2025. – Vol. 50. – No. 1. DOI: <https://doi.org/10.56525/MXGG3173>

REFERENCES

1. Gao, Y., Zhang, H., Li, Q., et al. (2023). Halophilic plant-associated bacteria with plant-growth-promoting traits: A potential tool for enabling plant growth in saline soils. *Microorganisms*, 11(12), 2812.
2. Fuentes-Ramos, C. E., Silva-Rojas, H. V., & Becerril-Ramírez, M. A. (2025). Halo-tolerant plant growth-promoting bacteria-mediated plant salt tolerance. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(5), fiaf037.
3. Giri, B., Kapoor, R., & Mukerji, K. G. (2020). Halotolerant plant growth-promoting bacteria – A resource for sustainable agriculture on saline soils. *Environmental and Experimental Botany*, 177, 104111.
4. Giri, B., Mukerji, K. G., & Kapoor, R. (2019). Halotolerant PGPR: A hope for cultivation of saline soils. *Journal of King Saud University – Science*, 31(4), 1017–1026.
5. Rahman, M. A., Hoque, A. T., & Hasanuzzaman, M. (2025). Halo-tolerant plant growth-promoting bacteria-mediated plant salt tolerance. *PLOS ONE*, 20(4), e0301234.
6. Khan, M. D., Ansari, M. J., & Al-Ghamdi, A. (2025). Halophilic rhizobacteria promote growth, physiology and salinity tolerance in sesame plants. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1590854.
7. Al-Hassan, M., Al-Karaki, G., & Festin, M. (2023). Reduction in salt stress due to the action of halophilic bacteria on tomato (*Solanum lycopersicum*). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 15723.
8. Ahmed, I., Al-Dhabi, N. A., & Alam, M. (2023). Isolation of gene conferring salt tolerance from halophilic bacteria of alkaline soda lakes. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(6), 104125.
9. Khalilova, S. Sh., Al-Mahmoud, K., & Al-Mazroai, A. (2021). Halophilic bacteria of salt lakes and saline soils of the Peri-Caspian Lowland (Republic of Daghestan). *Microbiology*, 90(2), 194–201.
10. Sydykbekova, G. Kh. (2023). Investigation of the properties of a microbial consortium of halophilic and halotolerant microorganisms to enhance plant resistance to soil salinization (Bachelor's thesis, Saint Petersburg Polytechnic University)
11. Taskinbaikyzy Zh., Niyazbekova Sh.U. The Role of Digital Technologies and Artificial Intelligence in Human Capital Management // Yessenov Science Journal. – 2025. – Vol. 52. – No. 3. DOI: <https://doi.org/10.56525/e7q6fk90>
12. Yesimbekova A.O. Methods of Formative Assessment in Effective Foreign Language Teaching // Yessenov Science Journal. – 2025. – Vol. 50. – No. 1.
13. Tazhiyeva A.U., Konarshayeva A.A. Research on Developing Grammatical Skills in English Lessons // Yessenov Science Journal. – 2025. – Vol. 50. – No. 1. DOI: <https://doi.org/10.56525/MXGG3173>

THE ROLE OF HALOPHILIC BACTERIA IN ENHANCING THE SALT TOLERANCE OF AGRICULTURAL CROPS: CURRENT STATUS AND PERSPECTIVES FOR KAZAKHSTAN

Bektursinov A.

L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
e-mail: kazrus99@yandex.ru

Abstract. Under the conditions of global climate change, land degradation caused by soil salinization has become one of the major threats to the food security of the Republic of Kazakhstan. According to modern studies, soil salinity significantly reduces the productivity of agroecosystems: crop losses range from 20–50% in moderately saline soils and may reach up to 80% in highly saline areas. The most critical situation has developed in the Aral Sea region and the Aralkum zone, where extreme soil conditions require the urgent implementation of phytoremediation technologies. In addition, irrigated lands of the Turkestan region and the salt-affected ecosystems of the Caspian Lowland are seriously exposed to anthropogenic salinization.

This article examines modern approaches to the restoration of saline soils using halophytic plants that demonstrate high resistance to salt stress. Particular attention is paid to the effectiveness of phytoremediation as an environmentally safe and economically efficient method for improving soil conditions. The mechanisms of salt accumulation and removal by plants, as well as the prospects for their application in the agriculture of Kazakhstan, are analyzed. The study also considers successful examples of using halophytes to increase soil fertility, preserve biodiversity, and prevent further degradation of ecosystems.

Key words: soil salinity, halotolerant rhizobacteria (PGPR), ACC-deaminase, biological products, exopolysaccharides (EPS), *Bacillus* sp. PK-1, phytoremediation, ion homeostasis, biological nitrogen fixation.

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ДАҚЫЛДАРЫНЫҢ ТҰЗҒА ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУДАҒЫ ГАЛОФИЛЬДІ БАКТЕРИЯЛАРДЫҢ РӨЛІ: ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАН ҮШІН ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

А.С. Бектурсинов

Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

e-mail: kazrus99@yandex.ru

Аннотация. Жаһандық климаттың өзгеруі жағдайында топырақтың тұздануынан туындайтын жер деградациясы Қазақстан Республикасының азық-түлік қауіпсіздігіне төнген негізгі қауіптердің біріне айналды. Заманауи зерттеулерге сәйкес, топырақтың тұздануы агроценоздардың өнімділігін айтарлықтай төмендетеді: орташа деңгейде тұзданған жерлерде өнім шығыны 20–50% болса, күшті тұзданған аумақтарда 80%-ға дейін жетеді. Ең күрделі жағдай Арал маңы мен Аралқұм аймағында қалыптасқан, мұнда топырақтың экстремалды жағдайлары фиторемедиация технологияларын жедел енгізуді талап етеді. Сонымен қатар Түркістан облысының суармалы жерлері мен Каспий маңы ойпатының сортаң экожүйелері де антропогендік тұздануға қатты ұшыраған.

Мақалада тұзданған топырақтарды қалпына келтірудің заманауи тәсілдері, әсіресе тұзға төзімді галофит өсімдіктерін пайдалану арқылы фиторемедиация жүргізу жолдары қарастырылған. Фиторемедиацияның экологиялық қауіпсіз әрі экономикалық тұрғыдан тиімді әдіс ретіндегі маңызы талданады. Сонымен қатар өсімдіктердің тұздарды жинақтау және топырақтан шығару механизмдері, оларды Қазақстанның ауыл шаруашылығында қолдану перспективалары сипатталған. Галофиттерді пайдалану арқылы жер құнарлылығын арттыру, биоалуантүрлілікті сақтау және экожүйелердің одан әрі деградациясын болдырмау мүмкіндіктері қарастырылады.

Түйін сөздер: топырақтың тұздануы, галотолерантты ризобактериялар (PGPR), АЦК-дезаминаза, биопрепараттар, экзополисахаридтер (ЭПС), *Bacillus* sp. PK-1, фиторемедиация, иондық гомеостаз, биологиялық азот фиксациясы.