

УДК 579.64

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОБНЫХ БИОПРЕПАРАТОВ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННЫХ
МИКРООРГАНИЗМОВ И УСКОРЕНИЯ ПРОЦЕССОВ
РЕМЕДИАЦИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Алдибай С. Н., магистрант

*Научный руководитель – канд. хим. наук., доцент Мухтаров А. К.
Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева
Астана, Казахстан*

Аннотация. Данное обзорное исследование анализирует современные научные работы, посвященные использованию микробных биопрепаратов для повышения активности почвенных микроорганизмов и ускорения процессов ремедиации. Литературные данные интерпретированы методом литературной герменевтики, сопоставлены результаты различных авторов в направлениях биодеградации, биосорбции, биоаугментации и фито-биоремедиации. Анализ показывает высокую эффективность консорциумов, состоящих из автохтонных штаммов, иммобилизованных микроорганизмов и биопрепаратов, дополненных биосурфактантами. Работа выявляет возможности и ограничения применения биопрепаратов и предоставляет научное обоснование для выбора эффективных технологий биоремедиации.

Ключевые слова: почвенные микроорганизмы; биоремедиация; микробные биопрепараты; биодеструкция; биоаугментация; нефтяные углеводороды.

Введение.

Рост техногенной нагрузки на окружающую среду в настоящее время является одной из основных причин глобальных экологических проблем. Попадание в почву и длительное сохранение нефтепродуктов, пестицидов, тяжелых металлов и других стойких органических загрязнителей нарушает природное равновесие экосистем, оказывает негативное воздействие на биологическое разнообразие, плодородие почвы и биогеохимические циклы. Природные механизмы самоочищения, происходящие в почвенной экосистеме, не способны справиться с поступлением больших количеств сложных ксенобиотиков, поэтому

поиск эффективных и экологически безопасных технологий восстановления загрязненных территорий стал важнейшей задачей науки.

За последние десятилетия биоремедиация – то есть биологическое разложение загрязняющих веществ микроорганизмами, растениями или их симбиозом – признана одним из наиболее перспективных направлений восстановления почв. Особенно высокий научный и практический интерес вызывают технологии биоремедиации, основанные на использовании микроорганизмов. Это объясняется тем, что микроорганизмы способны эффективно трансформировать или минерализовать углеводороды, пестициды, тяжелые металлы, хлорорганические соединения и другие экотоксиканты с помощью своих ферментативных систем. Высокая адаптивность, метаболическая гибкость и устойчивость к различным стрессовым факторам делают их основной движущей силой процессов природной биодegradации.

Разработка микробных биопрепаратов является современным технологическим шагом, направленным на целенаправленное усиление этого биологического потенциала. Такие биопрепараты могут состоять из штаммов природного или селекционного происхождения, многокомпонентных консорциумов, иммобилизованных клеток или композиций, дополненных биосурфактантами. Они широко применяются при восстановлении загрязненных территорий различного масштаба. Однако эффективность биопрепаратов в конкретных экологических условиях может существенно варьировать, поскольку физико-химические параметры почвы, климат, концентрация загрязнителя, жизнеспособность микроорганизмов и экосистемные взаимодействия напрямую влияют на результат.

В современной научной литературе накоплен обширный объем данных о структуре микробных биопрепаратов, их функциональных свойствах, деструктивном потенциале используемых штаммов, механизмах биосорбции и биодegradации. Кроме того, активно обсуждаются ограничения биоремедиации, вопросы долгосрочной экологической безопасности, влияние биопрепаратов на микробиом почвы, а также перспективы сочетания их с фито-биоремедиацией или физико-химическими методами. Такая многоплановая база данных указывает на сложность исследований в данном направлении и необходимость комплексного анализа.

В настоящем обзорном статье системно анализируются научные работы различных авторов, посвященные микробным биопрепаратам,

предложенным для повышения активности почвенных микроорганизмов и ускорения процессов ремедиации. Сравнительно рассматриваются эффективность разных штаммов и консорциумов, их экологическая адаптивность, особенности технологий применения, а также преимущества и ограничения при удалении различных загрязнителей. Цель данной работы – обобщить современные научные достижения в области биоремедиации, выявить основные научные тенденции и определить перспективы практического применения микробных биопрепаратов.

Методы исследования.

В данном обзорном исследовании комплексно проанализированы современные научные данные, связанные с применением микробных биопрепаратов для повышения активности почвенных микроорганизмов и ускорения процессов ремедиации. Сбор информации осуществлялся через международные и региональные базы данных, такие как Google Scholar, Scopus, Web of Science, SpringerLink и eLIBRARY. В процессе поиска использовались ключевые слова: «bioremediation», «soil microorganisms», «hydrocarbon-degrading bacteria», «pesticide destructors», «microbial biopreparations», «bioaugmentation», «immobilized microorganisms».

Сбор и анализ информации выполнялись методом литературной герменевтики, который предполагает интерпретацию научных текстов через призму контекста их возникновения, направленности цели и смысловых связей. Такой подход позволяет глубоко понять ключевые понятия и концепции исследований, примененные методы, а также выявить сходства и различия между авторскими позициями.

Отобранные материалы были систематизированы с использованием методов контент-анализа и сравнительного анализа. Были определены взаимосвязи между деструктивной активностью штаммов микроорганизмов, составом биопрепаратов, экспериментальными условиями, изученными типами загрязнителей и полученными результатами. Эффективные показатели и ограничения различных исследований были сопоставлены, и выделены общие тенденции, характерные для современных научных направлений в области биоремедиации.

Комплекс указанных методологических подходов обеспечил научно обоснованную и системную оценку теоретических оснований и практических результатов применения микробных биопрепаратов.

Результаты исследования.

Способность почвенных экосистем реагировать на загрязнители во многом зависит от метаболической активности сообществ микроорганизмов, присутствующих в них. Многочисленные исследования последних лет показывают, что применение микробных биопрепаратов для ускорения процессов биоремедиации дает высокую эффективность, однако эта эффективность зависит от взаимодействия различных факторов. При этом устойчивость применяемых методов и их экологическая безопасность также имеют важное значение.

В целом большинство исследователей подчеркивают высокий потенциал природных или селекционированных микроорганизмов в разложении углеводов, пестицидов и тяжелых металлов в почве. Например, как отмечает Казиев А. А., микроорганизмы родов *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus* активно разлагают широкий спектр углеводов, включая ароматические соединения. Скорость роста и устойчивость этих штаммов являются основанием для их применения в составе биопрепаратов. Кроме того, автор показывает эволюцию технологического развития биопрепаратов – от простых монокультур до многокомпонентных консорциумов, иммобилизованных на сорбентах и дополненных биосурфактантами [1].

Ряд исследований (Funtikova T. V., Wojtowicz K., Karpenko O. и др.) доказывает высокую эффективность консорциумов на основе автохтонных микроорганизмов. В частности, работа Funtikova T. V., выполненная в аридных условиях Казахстана, показала, что биопрепарат, созданный на основе местных штаммов *Rhodococcus* и *Pseudomonas*, способен минерализовать до 70 % нефти в течение 6 месяцев. Такие результаты подтверждают, что экологическая пластичность и устойчивость автохтонных штаммов к стрессовым факторам обеспечивают высокую эффективность [2].

Тем не менее, как демонстрируют длительные полевые исследования Vakina L.G., применение биопрепаратов не всегда приводит к одинаковым результатам. По данным исследований, некоторые биопрепараты повышают биологическую активность почвы, тогда как другие, напротив, нарушают экосистемное равновесие и замедляют разложение нефти. Это подчеркивает необходимость комплексной оценки долгосрочного воздействия биопрепаратов на экосистему до их применения [3].

Часть работ рассматривает дополнительные пути повышения эффективности биопрепаратов. Например, в исследовании Kokot P. показано, что сочетание иммобилизации и реакции Фентона существенно улучшает кинетику разложения углеводов [4]. В то время как Karpenko O. и Wojtowicz K. установили, что применение дополнительных биосурфактантов улучшает структуру почвы и повышает устойчивость растений к стрессовым факторам. Такие многокомпонентные подходы наглядно демонстрируют синергетический эффект комбинации биоремедиации и фиторемедиации: растения усиливают микробную активность в ризосфере, а биопрепараты снижают нагрузку на растения [5, 6, 13].

Значительное внимание уделено и восстановлению почв, загрязненных пестицидами. В исследовании Владивцевой И. В. из аборигенной микрофлоры были выделены 9 штаммов, способных разлагать фунгициды. Они продемонстрировали способность разрушать такие сложные химические соединения, как азоксиробин и тебуконазол, в концентрациях, превышающих фоновые значения в 10 раз. Иммобилизация в данном исследовании также рассматривается как фактор, существенно увеличивающий эффективность. Учитывая сложную структуру и устойчивость пестицидов, такие методы приобретают особую значимость [7].

Особым направлением биоремедиации является применение цианобактериальных ассоциаций, что отдельно подчеркивает Куликов Я. К. Цианобактерии и микромицеты обладают устойчивостью к нефти, тяжелым металлам и другим ксенобиотикам, а также способностью выступать в роли биосорбентов, что делает их одним из наиболее экологически безопасных методов биоремедиации. С помощью слизистых оболочек они создают условия, благоприятные для развития других микроорганизмов, и улучшают оксидативное состояние почвы [8].

С точки зрения плодородия почвы и сельскохозяйственной продуктивности микробные биопрепараты также обладают высоким потенциалом. Исследования Breza-Boguta B. и Toader E. V. показали, что эффективные микроорганизмы (EM) и биопрепараты, дополненные органическими веществами, существенно повышают ферментативную активность почвы, образование гумуса и устойчивость растений

к стрессовым факторам. Это доказывает, что такие биопрепараты служат не только средством устранения загрязнителей, но и инструментом восстановления почвы и стабилизации агроэкосистем [9, 10].

Другие исследователи (Samokhvalova V., Doolotkeldieva T. и др.) демонстрируют возможность восстановления сильно загрязненных почв – вследствие военных действий или чрезмерного применения пестицидов – методами микробиологической ремедиации. В этом направлении особую роль играют актиномицеты, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus polymyxa* и др. [11, 12].

Grigoriadi A. S. и коллеги (2023) исследовали изменения микробного сообщества ризосферы фиторемедиативных растений в нефтезагрязненных почвах. Введение биопрепаратов повысило активность микроорганизмов-деструкторов в ризосфере и показало усиление ремедиации благодаря взаимодействию «растение – микроб» [13].

Yamborko N. доказал эффективность микробного препарата «Biogem» для разложения органохлорного пестицида гексахлорциклогексана (НСН). Препарат значительно снижал концентрацию НСН как в жидкой среде, так и в почве, что подтверждает его пригодность для применения в сильно загрязненных зонах [14].

Rowińska P. и коллеги проанализировали микробные биопрепараты, разлагающие растительные остатки, и отметили их значение для повышения плодородия почвы. Авторы также выявили вопросы, связанные с эффективностью, экологической безопасностью и регулированием при разработке и коммерциализации биопрепаратов [15].

Общий анализ выявил ключевые факторы, определяющие эффективность микробных биопрепаратов:

- экологическая адаптированность штаммов;
- синергия в составе консорциума;
- иммобилизация и применение дополнительных активаторов (биосурфактантов, γ -PGA, органических веществ);
- интеграция с фитосистемами;
- требования долгосрочной экологической безопасности.

При учете этих факторов эффективность биопрепаратов возрастает, расширяя возможности их применения в разнообразных типах почв и экологических условиях.

С учетом климатических особенностей Казахстана, широких нефтегазовых регионов, обилия целинных и деградированных почв,

адаптация биоремедиационных технологий к местным условиям является особенно важной. Результаты исследований показали, что консорциумы автохтонных микроорганизмов хорошо приспособлены к аридным и засушливым экосистемам республики и значительно повышают эффективность биопрепаратов. Поэтому в Казахстане рекомендуется при разработке микробных биопрепаратов в приоритетном порядке использовать местные штаммы, развивать иммобилизованные формы биопрепаратов, а также сочетать их с фиторемедиационными методами. Такой подход позволит ускорить процессы восстановления загрязненных почв в промышленных и сельскохозяйственных районах, улучшить состояние экологически рискованных территорий и сохранить устойчивость природных микробиоценозов.

Заключение.

Проведенный литературный анализ показал, что в условиях антропогенного загрязнения почв применение микробных биопрепаратов обладает высокой научной и практической значимостью. Нефтяные углеводороды, пестициды, тяжелые металлы и другие ксенобиотики наносят существенный вред почвенным экосистемам, а их биологическая детоксикация является единственным экологически чистым способом эффективного усиления природных процессов. Проанализированные работы подтверждают, что консорциумы микроорганизмов, автохтонные штаммы, иммобилизованные микробы и биопрепараты, дополненные биосурфактантами, повышают эффективность биодegradации. Особенно отмечена высокая устойчивость биопрепаратов, созданных на основе местных микроорганизмов, при различных климатических и почвенных условиях.

Микробные технологии, интегрированные с фиторемедиацией, проявляют синергетический эффект, ускоряя разложение загрязнителей за счет повышения микробной активности в ризосфере. Однако эффективность биопрепаратов зависит от множества факторов: физико-химических свойств почвы, характера и концентрации загрязнителей, микробиологического равновесия экосистемы и применяемых технологических подходов. Как отмечают некоторые авторы, не все биопрепараты обеспечивают положительный результат, что требует оценки их долгосрочной экологической безопасности, адаптации к конкретным условиям и комплексной апробации перед применением.

В целом современные формуляции микробных биопрепаратов ускоряют биологическое восстановление почв и снижают экологические риски. Будущие исследования должны быть направлены на совершенствование состава биопрепаратов, поиск новых штаммов, глубокое изучение функциональных изменений микробиома на основе биосенсорных и омикс-технологий, а также разработку многофакторных технологий, объединяющих различные методы ремедиации. Это будет способствовать повышению устойчивости почвенных экосистем и эффективному восстановлению загрязненных территорий.

Список использованных источников

1. Казиев, А. А. Методы биоремедиации территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами / А. А. Казиев, А. А. Казиева // Научно-практические пути повышения экологической устойчивости и социально-экономического обеспечения сельскохозяйственного производства : материалы конф. – 2017. – С. 470–475.
2. Bioremediation of oil-contaminated soil of the republic of Kazakhstan using a new biopreparation / T. V. Funtikova [et al.] // *Microorganisms*. – 2023. – Vol. 11, № 2. – P. 522.
3. Bioaugmentation: possible scenarios due to application of bacterial preparations for remediation of oil-contaminated soil / L. G. Bakina [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – Vol. 43, № 6. – P. 2347–2356.
4. Kokot, P. Testing of biopreparations for bioremediation of soils contaminated with petroleum substances / P. Kokot, T. Kamizela // *Inżynieria i Ochrona Środowiska*. – 2018. – Т. 21, № 4. – S. 407–418.
5. Influence of Biopreparations on Phytoremediation of Petroleum-Contaminated Soil / O. Karpenko [et al.] // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2015. – Vol. 24, № 5. – P. 2101–2106.
6. Oil-contaminated soil remediation with biodegradation by autochthonous microorganisms and phytoremediation by maize (*Zea mays*) / K. Wojtowicz [et al.] // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28, № 16. – P. 6104.
7. Некоторые аспекты получения и применения бактериальных препаратов для ремедиации почв, загрязненных пестицидами / И. В. Владимцева [и др.] // *Вестник ИрГСХА*. – 2019. – № 90. – С. 34–44.
8. Куликов, Я. К. Экологическая полифункциональность микроорганизмов и растительно-микробных комплексов в процессе

биоремедиации загрязненных почв / Я. К. Куликов. – Мн. : БГУ, 2023. – 215 с.

9. Breza-Boruta, B. Effect of microbial preparation and biomass incorporation on soil biological and chemical properties / B. Breza-Boruta, J. Bauza-Kaszewska // Agriculture. – 2023. – Vol. 13, № 5. – P. 969.

10. Innovative ecological technologies for soil restoration: bacterial biopreparations / E. V. Toader [et al.] // Competitiveness of Agro-Food and Environmental Economy. – 2022. – Vol. 11. – P. 142–151.

11. Samokhvalova, V. Bioremediation of Contaminated Soils Due to the Influence of Military Actions to Minimize and Prevent Negative Changes in the Soils Condition / V. Samokhvalova, O. Naidonova // 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment : materials of conf., Kyiv, 12–15 Nov. 2024. – Kyiv : EAGE, 2025. – P. 1–5.

12. Microbial communities in pesticide-contaminated soils in Kyrgyzstan and bioremediation possibilities / T. Doolotkeldieva [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – Vol. 25, № 32. – P. 31848–31862.

13. Evaluation of the Effectiveness of the Biopreparation in Combination with the Polymer γ -PGA for the Biodegradation of Petroleum Contaminants in Soil / K. Wojtowicz [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 2. – P. 400.

14. Response of the rhizosphere microbial community of phytoremediation plants to oil pollution and the application of biopreparations / A. S. Grigoriadi [et al.] // Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya. – 2023. – Vol. 13, № 4. – P. 523–531.

15. Yamborko, N. Biorem-microbial preparete for degradation organochloric pollutant hexachlorocyclohexane in soil / N. Yamborko // Биологический метод защиты растений: достижения и перспективы : материалы конф. – Краснодар, 2019. – С. 105–108.

16. Biopreparations for the decomposition of crop residues / P. Rowińska [et al.] // Microbial Biotechnology. – 2024. – Vol. 17, № 8. – P. e14534.