

Научная статья
УДК 504.054

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОРЕМЕДИТАЦИИ ЛЕСОВ С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ РАДИАЦИИ

Георгий Алексеевич Семеновых¹, Анна Геннадьевна Семеновых²

^{1, 2} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

² Специализированный учебно-научный центр УрФУ, Екатеринбург, Россия

¹ snakyjor@gmail.com

² semenovyhag@m.usfeu.ru

Аннотация. Рассмотрены принципы использования микроорганизмов для очистки радиоактивных лесных участков, приведена оценка экономической эффективности различных методов, а также существующие трудности и перспективы развития этой инновационной технологии.

Ключевые слова: радиационное загрязнение, биоремедиация, микроорганизмы, радиоактивные изотопы

Для цитирования: Семеновых Г. А., Семеновых А. Г. Оценка экономической эффективности биоремедитации лесов с повышенным уровнем радиации // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России = Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia : материалы XXI Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2025. С. 1072–1077.

Original article

ASSESSMENT OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF BIOREMEDITATION OF FORESTS WITH HIGH RADIATION LEVEL

Georgii A. Semenovikh¹, Anna G. Semenovikh²

¹ Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

² Specialized Educational and Scientific Center of UrFU, Ekaterinburg, Russia

¹ snakyjor@gmail.com

² semenovyhag@m.usfeu.ru

Abstract. The article examines the principles of using microorganisms to clean up radioactive forest areas, provides an assessment of the economic efficiency of various methods, as well as existing difficulties and prospects for the development of this innovative technology.

Keywords: radiation pollution, bioremediation, microorganisms, radioactive isotopes

For citation: Semenovikh G. A., Semenovikh A. G. (2025) Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti bioremeditatsii lesov s povishennim urovnem radiatsii [Assessment of the economic efficiency of bioremediation of forests with high radiation level]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii [Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia] : proceedings of the XXI All-Russian (national) Scientific and Technical Conference of undergraduate and postgraduate students. Ekaterinburg : USFEU, 2025. Pp. 1072–1077. (In Russ).

Исторически Урал является зоной повышенного радиационного риска из-за размещения здесь объектов атомной промышленности. На радиационный фон в регионе влияют хранилища ядерных отходов и различные испытания, проводившиеся в советский период. Большинство объектов повышенной радиационной опасности расположено за чертой крупных населенных пунктов, в зоне лесопосадок. Именно лес является природным барьером для радиационного загрязнения. Вопрос утилизации леса, загрязненного радиацией, очевидно актуален на сегодняшний день.

В последние годы все большее внимание привлекают биологические методы деконтаминации, в частности использование микроорганизмов для снижения радиационного фона. Микроорганизмы (бактерии и грибы) способны адаптироваться к экстремальным условиям и обладают уникальными биохимическими механизмами, позволяющими им связывать, обезвреживать или перерабатывать радиоактивные вещества.

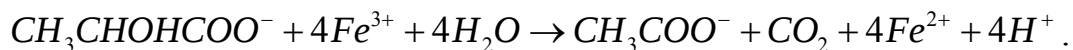
Рассмотрим некоторые микроорганизмы, которые можно использовать для биоремедиации лесных участков с повышенным радиационным фоном.

1. *Bacillus subtilis* (сенная палочка) широко распространена в почве, а также встречается в воде и на поверхности растений. Может выживать в неблагоприятных условиях благодаря образованию устойчивых спор. *Bacillus subtilis* имеет клеточные стенки, богатые пептидогликаном и другими полисахаридами, которые обладают высокой способностью связывать и удерживать ионы металлов, в том числе радионуклидов, таких как уран и плутоний. Микробы используют органические вещества (например, лактат) в качестве источника электронов. При этом органические вещества окисляются, а, к примеру, плутоний восстанавливается:

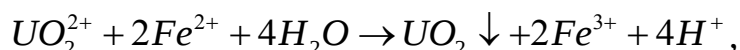


Микробы переносят электроны на плутоний через свои метаболические цепочки, превращая растворимые формы Pu(VI/V) в нерастворимый Pu(IV). Это пример прямого восстановления.

2. *Shewanella oneidensis* преимущественно встречается в грунтовых водах, особенно в водоемах с низким содержанием кислорода. Выдерживает дозы радиации до 50 Гр. Обладает способностью восстанавливать уран и другие металлы, переводя их из более растворимых и подвижных форм (например, уранил-ионов) в менее растворимые [1]. Восстановление урана U(VI) до U(IV) бактериями *Shewanella oneidensis* происходит через восстановление Fe(III) до Fe(II):



Образовавшийся Fe^{2+} химически взаимодействует с растворимым ураном UO_2^{2+} (U(VI)):

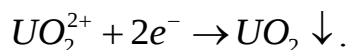


при этом *Shewanella oneidensis* использует радионуклиды в качестве акцепторов электронов в процессе анаэробного дыхания. Восстановленный уран становится осажденным в виде нерастворимого уранинита (UO_2), что уменьшает его подвижность в почве. Это пример косвенного восстановления.

Проведем оценку экономической эффективности использования *Shewanella oneidensis* для биоремедиации радиоактивных отходов. Для этого рассчитаем количество бактерий, необходимых для утилизации определенного количества радиоактивных элементов, и проведем анализ преимуществ и недостатков метода.

Исходные данные и предположения: утилизация 1 грамма урана U(VI) путем его восстановления до U(IV).

Shewanella oneidensis восстанавливают уран через ферментативные процессы. Стехиометрия реакции:



Следовательно, каждая молекула урана требует два электрона для восстановления. Молярная масса урана $M(\text{U}) = 238$ г/моль, в 1 г урана содержится $\vartheta = \frac{m}{M} \approx 4,2$ ммоль, тогда для восстановления урана массой 1 г потребуется 8,4 ммоль электронов.

Легко рассчитать количество электронов для реакции:

$$N = \vartheta \cdot N_A = 0,0084 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \approx 5,06 \cdot 10^{21}.$$

Осталось определить количество бактерий, необходимых для переноса этих электронов, считая, что одна бактерия переносит 10^6 электронов в сутки [1].

$$N_{\text{бактерий}} = \frac{5,06 \cdot 10^{21}}{10^6} = 5,06 \cdot 10^{15}.$$

Очевидными недостатками метода являются:

- высокие затраты на культивацию бактерий: выращивание триллионов бактерий требует большого количества питательных сред;
- медленный процесс: суточное время реакции ограничивает объем перерабатываемого вещества;
- чувствительность бактерий: высокая радиоактивность может подавлять их активность.

К плюсам можно отнести:

- экологичность: образуется нерастворимый урановый осадок, легко поддающийся изоляции;
- селективность: бактерии могут быть адаптированы для работы с конкретными радиоизотопами [1].

3. *Deinococcus radiodurans* обнаруживается в разнообразных условиях, включая почву и атмосферные пылевые частицы. Чрезвычайно устойчива к радиации, способна выдерживать дозы до 5000 Гр и более. Бактерии трудно найти в природе, но легко культивировать в лаборатории. Используется в биоремедиационных проектах на участках с высоким уровнем радиации. Проведем оценку количества бактерий для абсорбции $m = 1$ г урана. Средняя адсорбционная емкость для урана может составлять 150 мг на 1 г биомассы ($C = 150$ мг/г = 0,15). Для стронция значение может быть ниже, около 50 мг на 1 г биомассы. Масса одной клетки *Deinococcus radiodurans* составляет около $m_0 = 1$ пг = 10^{-12} г [2]. Определим количество бактерий *Deinococcus radiodurans* :

$$N = \frac{C \cdot m}{m_0} = \frac{0,15 \cdot 1}{10^{-12}} \approx 6,67 \cdot 10^{12}.$$

Полученный результат на три порядка ниже, чем в случае бактерий *Shewanella oneidensis*, но все равно пока высокие затраты на культивирование бактерий в промышленных масштабах делают этот способ отчистки экономически невыгодным. Хотя, традиционные методы (осаждение, ионный обмен) часто дешевле, но требуют сложной химической обработки и генерируют вторичные отходы.

4. *Fungi* (например, *Aspergillus niger* и *Penicillium* spp.) – грибы, которые широко распространены в почвах, на растениях, и других органических материалах. Могут выживать в экстремальных условиях, включая зоны с низким питательным уровнем. Обладают умеренной радиоустойчивостью, выдерживая дозы до 50–100 г. Легко выделяются из почвы и широко культивируются в лабораториях, доступны для биоремедиации лесных участков. *Aspergillus niger* обладают способностью поглощать радионуклиды из почвы и аккумулировать их внутри клеток. Клеточные стенки грибов содержат хитин и другие полисахариды, которые активно связывают радионуклиды, такие как уран, цезий и стронций. Грибы также могут преобразовывать радионуклиды в менее подвижные формы.

Проведем оценку экономической эффективности использования грибов для биоремедиации радиоактивных отходов.

Исходные данные и предположения: утилизация 1 г стронция (Sr) путем его абсорбции биомассой *Aspergillus niger*.

Aspergillus niger поглощает стронций за счет связывания ионов Sr^{2+} на поверхности клеточной стенки. Согласно литературным данным [3], один грамм грибной биомассы может абсорбировать до 200 мг стронция. Следовательно, для утилизации 1 г стронция потребуется 5 г сухой биомассы *Aspergillus niger*. Для производства 1 г сухой биомассы гриба требуется около 2 г глюкозы или других питательных веществ. В стоимость культивации входят также расходы на оборудование и энергию. Для химической очистки необходимы осадители или сорбенты, стоимость которых в разы выше стоимости культивации *Aspergillus niger*.

Недостатками метода являются:

- эффективность: абсорбция сильно зависит от условий среды (pH, концентрации ионов, температуры);
- объем отходов: требуется значительное количество грибной биомассы для обработки больших зараженных лесных площадей;
- обработка грибной биомассы: после связывания Sr биомасса становится радиоактивной и требует дальнейшей утилизации.

Проведенный анализ показал:

1. Метод биоремедиации с использованием бактерий может быть экономически целесообразным для мест с низкой концентрацией урана или труднообрабатываемых лесных отходов, где химические методы менее эффективны. Однако для высокоактивных отходов стоимость и время восстановления остаются серьезными ограничениями.

2. Использование *Aspergillus niger* для абсорбции стронция является экономически выгодным в сравнении с химическими методами, особенно при низкой концентрации стронция. Метод экологически безопасен, но его эффективность снижается при высоких концентрациях радиоактивных отходов.

3. Использование микроорганизмов для биоремедиации радиоактивно загрязненных лесных участков открывает перспективный и экологически безопасный подход к решению проблемы радиационного загрязнения. Благодаря уникальным биохимическим способностям, микроорганизмы могут связывать, нейтрализовывать или преобразовывать радиоактивные вещества, снижая уровень радиации в окружающей среде. Такой метод не только минимизирует затраты и риск для человека, но и сохраняет природные экосистемы. Однако для успешного внедрения биоремедиации необходимы дальнейшие исследования, направленные на разработку оптимальных штаммов микроорганизмов, которые будут устойчивы к высоким уровням радиации и эффективно адаптироваться к разным условиям. Прогресс в данной области может не только изменить подход к очистке загрязненных

лесных участков, но и существенно продвинуть науку в понимании механизмов радиостойчивости и биологической ремедиации.

Список источников

1. Бактерии рода *Shewanella* из загрязненных радионуклидами подземных вод/ Т. Л. Бабич, А. В. Сафонов, Д. С. Груздев [и др.] // Микробиология. 2019. Т. 88, № 5. С. 583–595.
2. Application Progress of *Deinococcus radiodurans* in Biological Treatment of Radioactive Uranium-Containing Wastewater/ Shanshan Li, Qiqi Zhu, Jiaqi Luo [etc.] // Indian J Microbiol. 2021. 61 (4). P. 417–426. DOI: 10.1007/s12088-021-00969-9
3. An Abridged Review on Biosorption of Heavy Metals Using *Aspergillus Niger* as Sorbent Material / G. Dolores, M. Macabinquil, L. Paulo [etc.] // GSJ. 2019. V. 7. Is. 1. P. 179–204. ISSN 2320-9186