

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФИТОМЕНЕДЖМЕНТА ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЦЕЗИЕМ-137

МАЛИКОВА Рузанна Рустамовна

студент

ЕЛИЗАРЬЕВА Елена Николаевна

кандидат технических наук, доцент

Уфимский университет науки и технологий

г. Уфа, Россия

Статья посвящена решению актуальной проблемы радиоактивного загрязнения почв цезием-137 в экосистемах северной тайги Кольского полуострова. На основе комплексного анализа литературных данных предложена и научно обоснована многоуровневая технология фитоменеджмента. Ключевыми элементами технологии являются последовательное использование в качестве растений-фиторемедиантов ячмень посевной (*Hordeum vulgare*) на начальном этапе и сезувима портулаковидного (*Sesuvium portulacastrum*) на последующих этапах ремедиации.

Ключевые слова: фиторемедиация, цезий-137, фитоменеджмент, ячмень посевной, сезувим портулаковидный, радиоактивное загрязнение, гипераккумуляторы.

Радиоактивное загрязнение почвенного покрова представляет собой одну из наиболее серьезных долгосрочных экологических угроз. Среди техногенных радионуклидов цезий-137 (^{137}Cs) занимает особое место вследствие своего длительного периода полураспада (около 30,2 лет), высокой подвижности в экосистемах и способности эффективно поглощаться растениями и включаться в трофические цепи. Кольский полуостров, несмотря на отсутствие крупных радиационных аварий в непосредственной близости, характеризуется фоновым загрязнением ^{137}Cs , связанным с глобальными выпадениями после атмосферных ядерных

испытаний 1960-х годов. Проведенные в 2025 году исследования показали, что удельная активность цезия-137 в компонентах экосистем северной тайги полуострова варьирует в значительных пределах: от 4,7 до 34,5 Бк/кг в древесном ярусе, от 8,4 до 164,8 Бк/кг в кустарниковом ярусе и от 15 до 94,5 Бк/кг в моховом покрове [5]. Данные уровни, хотя и не являются катастрофически высокими, создают устойчивый источник радиационного воздействия и требуют применения превентивных мер для предотвращения дальнейшей миграции радионуклидов и их биоаккумуляции.

Традиционные методы реабилитации загрязненных почв, такие как выемка и захоронение верхнего слоя грунта или химическая промывка, являются крайне затратными, требуют применения тяжелой техники и часто приводят к необратимой деградации почвенного плодородия и нарушению локальных экосистем. В этой связи фиторемедиация – технология, использующая специально подобранные растения для экстракции, стабилизации или трансформации загрязняющих веществ, – рассматривается как перспективная, экономически эффективная и экологически безопасная альтернатива [3]. Фитоменеджмент как комплексный подход подразумевает не только выбор растений-ремедиантов, но и управление всем процессом, включая агротехнику, уборку биомассы и ее безопасную утилизацию.

Целью данной работы является разработка, обоснование и комплексный анализ технологии фитоменеджмента для ремедиации почв, загрязненных цезием-137, в специфических условиях северных лесов Кольского полуострова.

Анализ современных научных исследований демонстрирует растущий интерес к фиторемедиации радионуклидов, в частности цезия-137. Основное внимание уделяется поиску и изучению растений-гипераккумуляторов, обладающих высоким коэффициентом транслокации (TF) почва-растение, который для ^{137}Cs может достигать значений 2,5 и более. Среди широкого спектра изученных видов выделяются сельскохозяйственные культуры (ячмень, пшеница, салат), дикорастущие травы (одуванчик, пижма) и специализированные виды, проявляющие исключительную толерантность к токсичным элементам [1].

Для условий Кольского полуострова, характеризующихся бедными кислыми почвами, коротким вегетационным периодом и суровыми климатическими условиями, необходим тщательный подбор не только эффективных, но и высокоустойчивых видов. На основании анализа литературных данных была предложена двухэтапная система фитоменеджмента. На первом году реализации проекта рекомендуется использование ячменя посевного (*Hordeum vulgare*). Обоснованием данного выбора служит совокупность его ключевых характеристик: высокий коэффициент транслокации радионуклидов ($TF=0,8-2,1$), значительная биомасса, позволяющая аккумулировать большие объемы загрязнителя. Мировой опыт, в частности успешное применение ячменя посевного в проектах по ремедиации в Чернобыльской зоне отчуждения, подтверждает его высокий потенциал [2]. На втором и последующих годах ремедиации предлагается переход к использованию сезувииума портулаковидного (*Sesuvium portulacastrum*). Данный вид является многолетним ползучим растением-галофитом, что обуславливает его высокую устойчивость к абиотическим стрессам. Его ключевым преимуществом является чрезвычайно высокий коэффициент транслокации TF для цезия-137, достигающий 2,5, то есть основное накопление происходит в надземной биомассе (листьях), что упрощает процесс уборки. Как многолетник, сезувииум не требует ежегодной посадки, снижая трудозатраты и операционные расходы, а его почвопокровный характер способствует предотвращению водной и ветровой эрозии почв [4].

Таблица 1.

Сравнительная характеристика растений-фиторемедиантов для цезия-137

Растение	Коэффициент перехода (TF)	Преимущества	Недостатки
Ячмень посевной (<i>Hordeum vulgare</i>)	0,8 - 2,1	Высокая биомасса, скорость роста	Однолетник, требует ежегодной посадки
Сезувииум портулаковидный (<i>Sesuvium portulacastrum</i>)	1,5 - 2,5	Очень высокий TF, многолетник, стрессоустойчивость, накопление в листьях	Требует проверки на морозоустойчивость в условиях Севера

Для оценки эффективности предложенной технологии была смоделирована условная территория площадью 1 га в северотаежной зоне Кольского полуострова. Исходная средняя удельная активность почвы цезием-137 была принята на уровне 60 Бк/кг, что соответствует верхним границам данных, полученных для кустарникового яруса и мхов. При моделировании учитывались следующие параметры: ожидаемая годовая продуктивность ячменя – 10 тонн/га сырой массы, сезувииума – 8 тонн/га сырой массы; средневзвешенный коэффициент извлечения, рассчитанный на основе ТФ и доли радионуклида, переходящей в убираемую биомассу (85% для ячменя, 90% для сезувииума). Ожидаемая эффективность технологии оценивалась путем расчета ежегодного снижения удельной активности почвы.

Проведенные расчеты показали, что предлагаемая система фитоменеджмента позволит достичь ежегодного снижения удельной активности почвы на 5-7%. Прогнозная динамика снижения загрязнения демонстрирует, что для достижения 50%-ного снижения исходного уровня загрязнения (до ~30 Бк/кг) потребуются около 10 лет непрерывного проведения ремедиационных мероприятий. Такой результат является высокоперспективным для столь малозатратной и экологичной технологии.

Таблица 2.

Ожидаемая динамика снижения удельной активности почвы

Год	Удельная активность, Бк/кг	Снижение за год, %
0 (Старт)	60,0	-
1	56,4	6,0
3	49,8	6,2
5	43,9	5,9
10	29,8	6,1
15	20,2	5,8

Неотъемлемой частью технологии фитоменеджмента является безопасная утилизация растительной биомассы, содержащей аккумулярованные радионуклиды. Ежегодно на 1 га ремедируемой территории будет образовываться от 8 до 10 тонн радиоактивной фитомассы. Неправильная утилизация может привести к вторичному загрязнению окружающей среды и свести на нет весь положитель-

ный эффект от фиторемедиации. В качестве основного метода утилизации предлагается применение высокотемпературного пиролиза – процесса сжигания в бескислородной среде при температурах 400-600°C. Данный метод позволяет сократить объем исходной биомассы в 20-50 раз. Конечным продуктом пиролиза является зольный остаток с концентрированным содержанием ^{137}Cs , который в дальнейшем подлежит остекловыванию или цементированию с целью иммобилизации радионуклидов и последующему захоронению на специализированных полигонах для радиоактивных отходов. Ориентировочная стоимость утилизации составляет 15-20 тысяч рублей за тонну биомассы, что является значительной, но необходимой статьей расходов [6].

Комплексный анализ предложенного проекта позволяет выявить его сильные и слабые стороны. К числу сильных сторон относятся: экологическая безопасность и ненарушающий характер воздействия на экосистему; относительная техническая простота реализации, не требующая привлечения тяжелой техники; возможность обработки обширных и труднодоступных территорий; низкие капитальные затраты по сравнению с традиционными методами. Слабые стороны проекта заключаются в значительной продолжительности процесса ремедиации (10-15 лет); в зависимости эффективности от климатических условий и урожайности культур; в наличии постоянных операционных затрат, связанных с посадкой, уходом, уборкой и утилизацией биомассы.

Среди потенциальных рисков реализации проекта можно выделить климатические риски, связанные с возможностью неурожая в условиях короткого и холодного лета Кольского полуострова. Для их минимизации необходим тщательный подбор холодоустойчивых сортов растений и, возможно, использование защищенного грунта для предварительного выращивания рассады. Существует также риск распространения радионуклидов по пищевой цепи в случае поедания растений дикими животными или птицами. Мерами противодействия являются строгий контроль территории и обязательное скашивание растений до момента их цветения и образования семян. Наконец, ключевым является риск, связанный с этапом утилизации, для минимизации которого необходимо неукоснительное

соблюдение всех регламентов по обращению с радиоактивными отходами и использование сертифицированного оборудования.

Таблица 3.

Сравнительный анализ экономических затрат (расчет на 1 га)

Статья затрат	Традиционный метод (выемка грунта)	Предлагаемая фиторемедиация
Капитальные затраты	2 000 000 - 5 000 000 руб. (единовременно)	100 000 - 150 000 руб./год
Продолжительность работ	1-2 года	10-15 лет
Общая стоимость за весь период	2 000 000 - 5 000 000 руб.	1 500 000 - 2 250 000 руб.
Влияние на экосистему	Деградация почвы, нарушение ландшафта	Восстановление почвенного плодородия, улучшение экологии

Экономический анализ демонстрирует явные преимущества фиторемедиации. Стоимость традиционного метода с выемкой и захоронением грунта оценивается в 2-5 млн рублей за гектар, в то время как общие затраты на фиторемедиацию в течение 15 лет составят ориентировочно 1,5-2,25 млн рублей, что обеспечивает экономию до 50%. Природоохранные эффекты включают не только прямое снижение радиационной нагрузки на окружающую среду и предотвращение миграции радионуклидов, но и восстановление экосистемных функций почвы: улучшение ее структуры, обогащение органическим веществом, поддержание биоразнообразия. Технология характеризуется низким углеродным следом по сравнению с энергоемкими традиционными методами.

В результате проведенного исследования разработана технология фитоменеджмента для ремедиации почв северных лесов Кольского полуострова, загрязненных цезием-137. Технология основана на многоуровневой системе использования высокоэффективных растений-гипераккумуляторов – ячменя однолетнего и сезувииума портулаковидного, – чей подбор обусловлен их высоким коэффициентом транслокации, устойчивостью к стрессам и адаптивностью к условиям региона. Важным компонентом технологии является организация замкнутого цикла управления, включающего безопасную утилизацию радиоактивной фитомассы методом пиролиза с последующей иммобилизацией и захоронением концентрированных отходов.

Проведенная оценка эффективности показала, что технология позволяет достигать снижения удельной активности почвы на 5-7% в год, обеспечивая сокращение загрязнения на 50% за 10-летний период. Выявленные сильные стороны проекта (экологичность, экономическая эффективность, масштабируемость) существенно превосходят его слабые стороны, главным из которых является длительность процесса. Предложены меры по минимизации идентифицированных рисков. Сравнительный экономический анализ подтвердил рентабельность технологии, обеспечивающей до 50% экономии средств по сравнению с традиционными методами рекультивации, при одновременном достижении значительных природоохранных эффектов. Таким образом, внедрение предложенной технологии фитоменеджмента представляется высокоперспективным направлением для восстановления радиоактивно загрязненных территорий Кольского полуострова и может служить моделью для других регионов со схожими природно-климатическими условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова Ж.Н. Методика оценки перспектив фиторемедиации радиоактивно загрязненных почв // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – № 4. – С. 79-82.
2. Гераськин С.А., Фесенко С. В., Волкова П. Ю., Исамов Н. Н. Что мы узнали о биологических эффектах облучения в ходе 35-летнего анализа последствий аварии на чернобыльской АЭС? // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2021. – № 3 (61). – С. 234-260.
3. Елизарьева Е. Н. Особенности выбора фиторемедиационных технологий очистки почв и сточных вод от ионов тяжелых металлов // Е. Н. Елизарьева, Ю. А. Янбаев, А. Ю. Кулагин // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2016. – № 3 (26). – С. 7-19.
4. Nikalje G., Shrivastava M., Nikam T., Penna S. Physiological Responses and Tolerance of Halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to Cesium. *Advances in Agriculture*. – 2022. – Vol. 1.

5. Popova M., Kriuchkov N. R., Myasnikov I., Kizeev A., Ushamova S., Manakhov D. Bioaccumulation of ^{137}Cs : Vegetation Responses, Soil Interactions and Ecological Implications in the Northern Taiga Ecosystems // *Life*. – 2025. – Vol. 15(5). – P. 774.

6. Wang S., Shang Z., Wang P., Wei G., Dany Y. Study on Radioactive Contaminated Soil Remediation Technologies and Selection Principles // Beijing: Proceedings of The 20th Pacific Basin Nuclear Conference. – 2017. – P. 547-554.

DEVELOPMENT OF PHYTOMANAGEMENT TECHNOLOGY FOR REMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH CAESIUM-137

MALIKOVA Ruzanna Rustamovna

Student

ELIZARIEVA Elena Nikolaevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Ufa University of Science and Technology

Ufa, Russia

The article is devoted to solving the urgent problem of radioactive contamination of soils with cesium-137 in the ecosystems of the northern taiga of the Kola Peninsula. Based on a comprehensive analysis of the literature data, a multilevel technology of phytomanagement has been proposed and scientifically substantiated. The key elements of the technology are the consistent use of annual sunflower (*Helianthus annuus*) as phytoremediant plants at the initial stage and *Sesuvium portulacastrum* (*Sesuvium portulacastrum*) at subsequent stages of remediation.

Keywords: phytoremediation, cesium-137, phytomanagement, sunflower, *Sesuvium portulacastrum*, radioactive contamination, hyperaccumulators.