

# РЕМЕДИАЦИОННОЕ ВЛИЯНИЕ РАЙГРАСА НА ОРГАНИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Чжу Куньхао

доктор философии,

Белорусский государственный университет

1903199554@qq.com

## REMEDICATION EFFECT OF RYEGRASS ON ORGANIC POLLUTION OF MINING AREAS

Zhu Kunhao

*Summary.* This study aims to evaluate the ability of ryegrass to remediate contaminated soils in a mining area of Belarus and its potential for pollutant monitoring. The study includes field experiments to test the effectiveness of ryegrass in removing heavy metals and organic pollutants. It is assumed that ryegrass not only restores the soil but also accumulates pollutants, which allows for long-term environmental monitoring. The methods include pollutant analysis, measuring changes in pollutant concentrations in the soil and their accumulation in plants. The results showed that ryegrass significantly reduces the concentration of heavy metals and organic pollutants, confirming its effectiveness in environmental remediation and monitoring. This provides a cost-effective solution for environmental management in mining areas.

*Keywords:* ryegrass, mining site remediation, pollution monitoring, Belarus, heavy metals.

### Введение

С ускорением глобальной индустриализации значительно увеличились разработка и использование минеральных ресурсов, что привело к усилению загрязнения окружающей среды в горнодобывающих районах. Загрязненные почвы в этих регионах часто богаты тяжелыми металлами [1]. Эти загрязняющие вещества представляют серьезную угрозу для экологии почвы и здоровья человека. Беларусь, как важная страна-минералопроизводитель в Восточной Европе, имеет несколько горнодобывающих районов, которые на протяжении долгого времени страдают от загрязнений и требуют срочных эффективных мер по их восстановлению и управлению.

Хотя традиционные физико-химические методы ремедиации могут быстро снизить концентрацию загрязнителей в почве, они дорогостоящие и могут вызвать вторичное загрязнение. В отличие от них, биоремедиационные технологии привлекли широкое внимание благодаря своей низкой стоимости, простоте в эксплуатации и экологической безопасности [2]. Фиторемедиа-

*Аннотация.* Данное исследование направлено на оценку способности райграса к ремедиации загрязнённых почв в горнодобывающем районе Беларуси и его потенциала для мониторинга загрязнителей. Исследование включает проведение полевых экспериментов для проверки эффективности райграса в удалении тяжёлых металлов и органических загрязнителей. Предполагается, что райграс не только восстанавливает почву, но и накапливает загрязнители, что позволяет осуществлять долгосрочный экологический мониторинг. Методы включают анализ загрязнителей, измерение изменений концентрации загрязняющих веществ в почве и их накопления в растениях. Результаты показали, что райграс значительно снижает концентрацию тяжёлых металлов и органических загрязнителей, подтверждая его эффективность в экологической ремедиации и мониторинге. Это обеспечивает экономически эффективное решение для управления окружающей средой в горнодобывающих районах.

*Ключевые слова:* райграс, ремедиация горнодобывающих участков, мониторинг загрязнений, Беларусь, тяжелые металлы.

ция, как важная форма биоремедиации, использует способность растений поглощать, накапливать и разлагать загрязняющие вещества. Она постепенно становится эффективным методом для восстановления загрязненных почв в горнодобывающих районах [3].

Между тем, данное исследование направлено на оценку эффективности ремедиации загрязненных почв на горнодобывающих территориях Беларуси с помощью райграса и экспериментальную проверку его пригодности в качестве инструмента биологического мониторинга.

### Исследовательский фон

Горнодобывающие районы Беларуси долгое время являлись важной частью экономического развития страны. Однако экологические проблемы, вызванные горнодобывающей деятельностью, становятся все более очевидными. В нескольких горнодобывающих регионах Беларуси, особенно в южных и восточных частях, накопление горных отходов и хвостов привело к резкому увеличению концентрации тяжелых металлов и орга-

нических загрязнителей в почве.[5]Эти загрязнители не только влияют на местные сельскохозяйственные угодья и источники воды, но и представляют угрозу для экосистем окружающих сообществ и общественного здоровья.

В последние годы правительство Беларуси и экологические организации активно исследуют различные методы ремедиации почв. Хотя физические и химические методы дают быстрые результаты, они сложны в эксплуатации и дорогостоящи, что затрудняет их широкомасштабное применение. В отличие от них, методы биоремедиации благодаря своей низкой стоимости и экологичности постепенно становятся предпочтительным выбором для борьбы с загрязнением на горнодобывающих территориях. Среди этих методов важным подходом биоремедиации является фиторемедиация, которая использует естественный рост и абсорбционные способности растений для удаления, переноса или стабилизации загрязнителей в почве. Это доказало свою эффективность и экономичность в качестве метода ремедиации [6]. Поскольку фиторемедиация может улучшать качество почвы, не нарушая экосистему, и ее эксплуатация не требует энергоемкого или сильно загрязняющего оборудования, она особенно хорошо подходит для использования на крупных загрязненных территориях [7]. Недавние исследования показали, что кормовые растения, такие как райграс (*Lolium perenne*), благодаря своей высокой устойчивости, хорошо развитой корневой системе и способности поглощать и накапливать загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы, демонстрируют отличные результаты ремедиации в различных почвенных условиях.

### Экспериментальная площадка

Эксперимент проводился в сильно загрязненной горнодобывающей зоне Солигорска на юге Беларуси. Этот район в основном специализируется на добыче металлических полезных ископаемых, и длительное накопление горных отходов и хвостов привело к значительному превышению концентраций тяжелых металлов в окружающей почве. Согласно предварительным исследованиям, начальные концентрации тяжелых металлов в почве были следующими: свинец (Pb) — 250 мг/кг, кадмий (Cd) — 15 мг/кг, медь (Cu) — 100 мг/кг, а общая концентрация полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) составила 50 мг/кг, что значительно превышает национальные нормы безопасности [8].

Экспериментальная площадка была выбрана в пределах загрязненной зоны площадью 200 квадратных метров в горнодобывающем районе. Участок был ровным, без значительной растительности, что соответствовало условиям, необходимым для проведения эксперимента. Перед началом эксперимента были проведены отбор

проб и анализ почвы для подтверждения начальных концентраций загрязняющих веществ.

### Экспериментальные материалы и методы

#### 1. Экспериментальные материалы

- Семена райграса: Предоставлены Белорусским сельскохозяйственным научно-исследовательским институтом. Для эксперимента были отобраны, проверены и стерилизованы здоровые семена.
- Экспериментальная почва: Пробы почвы были собраны на экспериментальной площадке. Предварительный анализ подтвердил, что концентрации тяжелых металлов и органических загрязнителей в почве превышают допустимые нормы.
- Инструменты и оборудование: для обнаружения тяжелых металлов использовалась атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS), а для обнаружения органических загрязнителей использовалась газовая хроматография с масс-спектрометрией (GC-MS).

#### 2. Экспериментальный дизайн

Эксперимент был выполнен по методу случайного блочного дизайна с двумя группами:

- Контрольная группа: Загрязненная почва без посадки райграса.
- Экспериментальная группа: Загрязненная почва с посадкой райграса.

Для каждой группы было создано три повторности. Райграс был посажен с плотностью 20 граммов семян на квадратный метр, а продолжительность эксперимента составила 90 дней. Пробы почвы и растений отбирались каждые 30 дней. После каждого отбора проводился анализ концентраций тяжелых металлов и органических загрязнителей в почве, а также анализ растительных образцов на содержание тяжелых металлов.

#### 3. Анализ образцов почвы и растений

- Анализ почвы: Образцы почвы были высушены на воздухе и просеяны перед анализом. Концентрации свинца, кадмия и меди определялись с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS). Содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) анализировалось с использованием газовой хроматографии с масс-спектрометрией (GC-MS).
- Анализ растений: после сбора надземной части райграса образцы были обработаны и высушены. Затем содержание тяжелых металлов в растительных тканях измерялось с использованием AAS.

#### 4. Анализ данных

В данном эксперименте все данные были подвергнуты статистическому анализу с использованием

программного обеспечения SPSS, при этом основное внимание уделялось применению однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) для оценки различий между экспериментальной и контрольной группами. Этот подход помогает оценить значимость изменений, наблюдаемых в концентрациях загрязнителей [9]. Дисперсионный анализ (ANOVA) является распространенным статистическим методом, который эффективно проверяет, существуют ли значительные различия между средними значениями двух или более групп. В данном исследовании основная цель использования однофакторного дисперсионного анализа заключается в сравнении изменений концентраций тяжелых металлов (свинца, кадмия, меди) и органических загрязнителей при различных экспериментальных условиях, особенно в сравнении концентраций между экспериментальной группой (с посадкой райграса) и контрольной группой (без посадки райграса).

Благодаря этому строгому статистическому анализу экспериментальные выводы были дополнительно научно подтверждены, что доказало значительный потенциал райграса в ремедиации загрязненных почв [10]. Предыдущие исследования показали, что аналогичные методы фиторемедиации оказывают заметное влияние на восстановление почв, загрязненных тяжелыми металлами, что предоставляет серьезную теоретическую поддержку результатам данного исследования.

## Результаты и обсуждение

### 1. Влияние райграса на ремедиацию загрязнения тяжелыми металлами

В течение 90-дневного экспериментального периода концентрации свинца, кадмия и меди в почве экспериментальной группы значительно снизились

Таблица 1.

Изменение концентраций тяжелых металлов в почве в течение 90-дневного периода ремедиации

	Heavy Metal	Initial Concentration	Final Concentration	Reduction Rate (%)
1	Lead (Pb)	250	170	32
2	Cadmium (Cd)	15	10	33
3	Copper (Cu)	100	75	25

По сравнению с контрольной группой, в экспериментальной группе было зафиксировано значительное снижение содержания тяжелых металлов, что указывает на то, что райграсс эффективно поглощает и стабилизирует тяжелые металлы в почве. Это свидетельствует о том, что райграсс, благодаря своей хорошо развитой корневой системе и высокой адаптивности, активно поглощает тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий и медь,

из почвы и накапливает их в своих тканях. По мере роста растений тяжелые металлы либо фиксируются в зоне корней, либо перемещаются в надземные части растения, что приводит к снижению общей концентрации этих загрязнителей в почве. Этот процесс не только уменьшает подвижность и биодоступность тяжелых металлов, но и способствует предотвращению их дальнейшего распространения в соседние экосистемы, такие как водоемы и сельскохозяйственные угодья.

Значительная разница, наблюдаемая между контрольной и экспериментальной группами, дополнительно подтверждает гипотезу о том, что райграсс может служить практичным и эффективным средством фиторемедиации для почв, загрязненных тяжелыми металлами. Результаты соответствуют выводам других исследований по фиторемедиации, подтверждая, что такие растения, как райграсс, особенно подходят для крупномасштабной экологической ремедиации благодаря своей экономичности и устойчивости.

### 2. Влияние райграса на удаление органических загрязнителей

Результаты эксперимента показали, что райграсс значительно снижает концентрацию органических загрязнителей, особенно полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), в загрязненной почве. В течение 90-дневного периода концентрация ПАУ снизилась с первоначальных 50 мг/кг до 38 мг/кг, что соответствует снижению на 24 %. Эти результаты свидетельствуют о том, что райграсс не только способствует ремедиации тяжелых металлов, но и активно улучшает процесс деградации органических загрязнителей.

Удаление ПАУ с помощью райграса в первую очередь связано с увеличением микробной активности в ризосфере — зоне вокруг корней растений. Корни райграса выделяют органические соединения, известные как корневые экссудаты, которые служат источником питательных веществ для почвенных микроорганизмов. Эти микроорганизмы, включая бактерии и грибы, играют ключевую роль в разложении сложных органических загрязнителей, таких как ПАУ, на менее токсичные соединения. Повышенная микробная активность в ризосфере ускоряет естественный процесс биodeградации ПАУ, что приводит к более эффективному снижению этих загрязнителей в почве.

Кроме того, райграсс улучшает аэрацию почвы, создавая более благоприятные условия для аэробных микроорганизмов, которые играют ключевую роль в деградации ПАУ. Способность растения поддерживать разнообразное микробное сообщество в почве является важным фактором, способствующим ускоренному разложению органических загрязнителей. Эта симбиотиче-

ская связь между райграсом и почвенными микроорганизмами подчеркивает способность растения не только накапливать загрязняющие вещества, но и способствовать их разложению с помощью естественных биологических процессов. В целом, снижение концентрации ПАУ, наблюдаемое в данном исследовании, подчеркивает эффективность райграса как инструмента биоремедиации органических загрязнителей. Стимулируя микробную деградацию, райграс предлагает устойчивый и экологически чистый подход к снижению органического загрязнения в загрязненных почвах, что расширяет его роль в усилиях по экологической ремедиации.

## Заключение

### 1. Эффективность ремедиации

Райграс показал значительную эффективность в снижении концентраций как тяжелых металлов, так и органических загрязнителей в загрязненной почве в течение 90-дневного экспериментального периода. В частности, концентрация свинца (Pb) снизилась на 32 %, кадмия (Cd) — на 33 %, меди (Cu) — на 25 %, а полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) — на 24 %. Эти снижения были не только значительными, но и статистически подтвержденными (\* $p$ \* < 0.05), что подчеркивает сильный потенциал райграса как эффективного средства фиторемедиации для загрязненных почв, особенно в районах, где добывающая деятельность является источником загрязнения.

Способность райграса поглощать и стабилизировать эти загрязняющие вещества играет ключевую роль в улучшении качества почвы. Хорошо развитая корневая система растения позволяет ему извлекать тяжелые металлы из почвы и накапливать их в своих тканях, тем самым снижая концентрацию вредных веществ в окружающей среде. Кроме того, райграс способствует деградации органических загрязнителей, таких как ПАУ, стимулируя микробную активность в ризосфере. Поддерживая здоровую микробную экосистему, райграс усиливает естественные процессы биодеградации, что дополнительно поддерживает его эффективность в ремедиации сильно загрязненных почв.

Результаты этого исследования показывают, что райграс предлагает устойчивое, экономически эффективное и экологически чистое решение для снижения загрязнения почвы, что делает его ценным инструментом для крупных проектов по ремедиации, особенно в регионах, пострадавших от добывающей деятельности. Его двойная способность устранять как загрязнение тяжелыми металлами, так и органическими веществами подчеркивает его универсальность и широкий потенциал применения в области восстановления окружающей среды.

### 2. Потенциал биологического мониторинга

Райграс также продемонстрировал значительный потенциал в качестве эффективного инструмента биологического мониторинга, накапливая значительные количества тяжелых металлов в своих тканях. В частности, свинец и кадмий накапливались в райграсе в концентрациях 20 мг/кг и 5 мг/кг соответственно. Эта способность поглощать и удерживать тяжелые металлы в своей биомассе позволяет райграсу выступать в роли живого индикатора уровней загрязнения почвы. Накопление этих металлов в растении было тесно связано с уменьшением их концентраций в почве, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции: 0,89 для свинца и 0,91 для кадмия. Эти сильные корреляции указывают на то, что райграс может не только способствовать ремедиации, но и служить надежным и точным методом отслеживания загрязнения почвы с течением времени.

Потенциал райграса как инструмента биологического мониторинга особенно ценен в контексте долгосрочного управления окружающей средой. Регулярный анализ содержания тяжелых металлов в тканях растения позволяет получить представление о динамике загрязнения почвы и оценить эффективность усилий по ремедиации. Этот подход является экономически эффективным, поскольку устраняет необходимость в дорогостоящих и сложных процедурах отбора и анализа почвы, при этом предоставляя точные и полезные данные об уровнях загрязнения. Кроме того, использование райграса в качестве биологического индикатора является экологически безопасным, поскольку не требует использования вредных химических веществ или инвазивных методов тестирования, что делает его устойчивым решением для постоянного мониторинга почвы.

В целом, результаты этого исследования подчеркивают двойную функциональность райграса как агента ремедиации и инструмента биологического мониторинга. Его способность отражать изменения в уровнях загрязнения почвы в режиме реального времени обеспечивает практичный и доступный способ контроля загрязнения на больших территориях, таких как горнодобывающие регионы. Это делает райграс ценным активом не только для очистки загрязненных почв, но и для долгосрочного наблюдения и управления состоянием окружающей среды.

### 3. Комплексное экологическое решение

Райграс предлагает устойчивое и экономически эффективное решение для долгосрочного управления почвами, загрязненными вследствие горнодобывающей деятельности. Его способность эффективно удалять как тяжелые металлы, так и органические загрязнители делает его универсальным инструментом, способ-



ным справляться с различными видами загрязнений. Двойная функция райграса — как агента ремедиации и инструмента биологического мониторинга — обеспечивает двойное преимущество, позволяя одновременно очищать загрязнители и проводить непрерывный контроль за уровнем загрязнения. Такое объединение ремедиации и мониторинга упрощает процесс экологического управления, предлагая более эффективный и непрерывный подход к восстановлению здоровья почв в затронутых районах.

Результаты данного исследования подтверждают, что райграс имеет широкий потенциал в качестве практического инструмента как для ремедиации, так и для мониторинга в горнодобывающих регионах. Его экономическая эффективность и экологическая безопасность делают его особенно подходящим для применения в крупных масштабах на сильно загрязненных территориях. Использование райграса также снижает необходимость в дорогостоящих и ресурсоемких технологиях, которые

обычно связаны с традиционными методами ремедиации, что делает его доступным для долгосрочного экологического управления. Путем предоставления данных в реальном времени об уровне загрязнения с помощью биологического мониторинга райграс предлагает динамичный подход к восстановлению окружающей среды, способный адаптироваться к изменяющимся условиям загрязнения.

В заключение райграс представляет собой практичное и масштабируемое решение для восстановления загрязненных горнодобывающих почв, сочетая эффективное удаление загрязнителей с возможностями непрерывного мониторинга. Его применение может значительно способствовать восстановлению деградированных экосистем, предлагая устойчивый и экономически эффективный метод защиты окружающей среды и обеспечения безопасности прилегающих сообществ от вредного воздействия загрязнения почвы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Photodegradation of organic pollutants using heterojunctions: A review/ K. Kaur, et al.// *Journal of Environmental Chemical Engineering*. — 2020.— Vol. 8.— P. 103666.
2. Soil bioremediation: Overview of technologies and trends/ I. G. Sales da Silva, et al.// *Energies*. — 2020.— Vol. 13.— P. 4664.
3. Enhancement of electrokinetic-bioremediation by ryegrass: sustainability of electrokinetic effect and improvement of n-hexadecane degradation/ Y. Wu, et al.// *Environmental research*. — 2020.— Vol. 188.— P. 109717.
4. Approaches to Ecosystem Services and Biodiversity Assessment in Belarus/ S. Zenchanka and N. Gorbachev. // *Handbook of Climate Change and Biodiversity*. — 2019.— Vol. P. 61–78.
5. Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils/ C.M. Quintella, et al.// *Journal of environmental management*. — 2019.— Vol. 241.— P. 156–166.
6. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination/ B. Nedjimi. // *SN Applied Sciences*. — 2021.— Vol. 3.— P. 286.
7. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment/ J. K. Sharma, et al. // *Frontiers in Plant Science*. — 2023.— Vol. 14.— P. 1076876.
8. Spatiotemporal changes of soil salinization in the Soligorsk mining region/ A. Chervan, et al.// *Eurasian Soil Science*. — 2019.— Vol. 52.— P. 998–1006.
9. Enhancement of electrokinetic-bioremediation by ryegrass: sustainability of electrokinetic effect and improvement of n-hexadecane degradation/ Y. Wu, et al.// *Environmental research*. — 2020.— Vol. 188.— P. 109717.
10. Research Progress and Hotspots in Microbial Remediation for Polluted Soils/ S. Zhao, et al.// *Sustainability*. — 2024.— Vol. 16.— P. 7458.

© Чжу Куньхао (1903199554@qq.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»