ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2551
https://elibrary.ru/XJGCXX

Оригинальная статья
https://fptt.ru

# Изучение способности аккумулирования тяжелых металлов растениями в процессе рекультивации отвала угольного разреза

**М. А. Осинцева[1,*], Е. А. Дюкова[1], Е. Г. Ульянова[2], А. М. Осинцев[1]**

[1] *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

[2] *Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Краснообск, Россия*

*Поступила в редакцию: 08.07.2024*
*Принята после рецензирования: 07.08.2024*
*Принята к публикации: 03.09.2024*

**М. А. Осинцева: k1marial@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-4045-8054*
*Е. А. Дюкова: https://orcid.org/0009-0001-1372-2091*
*Е. Г. Ульянова: https://orcid.org/0000-0002-9154-5238*
*А. М. Осинцев: https://orcid.org/0000-0002-3298-276*

*© М. А. Осинцева, Е. А. Дюкова, Е. Г. Ульянова, А. М. Осинцев, 2024*

**Аннотация.**
Основным способом решения экологических проблем, возникающих в результате консервации угольных разрезов после их выработки, является рекультивация технологически измененных земель. Одна из проблем восстановления экосистемы таких земель – загрязнение почвообразующего покрова тяжелыми металлами. Возможным решением этой проблемы может стать использование фиторемедиационного потенциала растений на этапе биологической рекультивации. Цель данного исследования заключалась в изучении аккумуляционной способности высаженных на отвалах угольного разреза травянистых растений (бобовых и злаковых) по отношению к тяжелым металлам.
Объектами исследований являлись образцы грунта и высаженные на нем растения. Исследования проводились на этапе биологической рекультивации экспериментальных участков научно-технического полигона на отвале угольного разреза, расположенного в Прокопьевском районе Кемеровской области – Кузбасса. При создании полигона в 2023 г. была произведена закладка участков с различными вариантами формирования корнеобитаемого слоя. Физико-химические свойства проб грунта и растительного сырья определялись стандартными методами в аккредитованных лабораториях.
На всех участках были высажены травянистые, кустарниковые и древесные растения. В ходе исследования касаются изучена аккумуляционная способность бобовых и злаковых культур. Содержание тяжелых металлов в растительном сырье в большинстве случаев не превышало максимально допустимых уровней в растительных кормах. Например, содержание свинца в абсолютно сухом веществе растительной массы колебалось в пределах 0,35–2,64 мг/кг для злаковых и 1,54–5,25 мг/кг для бобовых культур. Содержание кадмия для различных образцов составило 0,13–0,25 мг/кг для злаковых и 0,19–0,32 мг/кг для бобовых культур. Некоторые образцы демонстрировали заметное превышение максимально допустимого уровня содержания железа в сухом веществе (примерно 400 мг/кг).
В целом результаты исследования продемонстрировали способность травянистых растений накапливать потенциально опасные вещества и уменьшать их концентрацию в почве.

**Ключевые слова.** Биологическая рекультивация, фиторемедиация, фитоэкстракция, тяжелые металлы, злаковые культуры, бобовые культуры

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р, комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» («Чистый уголь – зеленый Кузбасс»), мероприятие 3.1 «Экополигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации». При финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1200 от 28.09.2022 г.).

**Для цитирования:** Изучение способности аккумулирования тяжелых металлов растениями в процессе рекультивации отвала угольного разреза / М. А. Осинцева [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 897–908. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2551

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2551
https://elibrary.ru/XJGCXX

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

# Heavy Metals Accumulation in Plants During Coal Mine Reclamation

**Maria A. Osintseva[1,*], Evgenia A. Dyukova[1], Ekaterina G. Ulyanova[2], Alexey M. Osintsev[1]**

[1] *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

[2] *Siberian Federal Research Center for Agro-BioTechnologies, Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia*

*Received: 08.07.2024*
*Revised: 07.08.2024*
*Accepted: 03.09.2024*

**Maria A. Osintseva: k1marial@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-4045-8054*
*Evgenia A. Dyukova: https://orcid.org/0009-0001-1372-2091*
*Ekaterina G. Ulyanova: https://orcid.org/0000-0002-9154-5238*
*Alexey M. Osintsev: https://orcid.org/0000-0002-3298-2761*

*© M.A. Osintseva, E.A. Dyukova, E.G. Ulyanova, A.M. Osintsev, 2024*

**Abstract.**
Reclamation solves environmental problems caused by opencast coal mining. Soil contamination with heavy metals is a major problem in restoring the ecosystem of disturbed lands. Plants with good phytoremediation potential may be an optimal solution at the stage of biological reclamation. The research featured the heavy metals accumulation potential in legumes and cereals planted on coal mine dumps.
The research objects included soil and plant samples from a coal mine dump near the town of Prokopyevsk, Kemerovo Region. The testing ground (2023) consisted of sections with different options for root formation. The physicochemical properties of soil samples and plant materials were determined by standard methods in accredited laboratories.
The sections were planted with herbs, shrubs, and trees; the research reported in this article focused on legumes and cereals. The content of heavy metals in the plant samples stayed below the maximum permissible levels for animal feed. The lead content in plant mass solids fluctuated within 0.35–2.64 mg/kg for cereals and 1.54–5.25 mg/kg for legumes. The cadmium content was 0.13–0.25 mg/kg for cereals and 0.19–0.32 mg/kg for legumes. However, the content of iron in some samples was far above the permissible level and reached 400 mg/kg.
In this study, legumes and cereals were able to accumulate potentially hazardous substances, thus reducing their concentration in post-mining soil.

**Keywords.** Biological reclamation, phytoremediation, phytoextraction, heavy metal content, legumes, cereals

**Funding.** The research was part of a comprehensive scientific innovative program initiated by Russian Federation Government Decree No. 1144-r, May 11, 2022: Developing and implementing new technologies in the E&P of solid minerals, industrial safety, bioremediation, and product development of deep coal processing: a consistent reduction of environmental impact and hazards (Clean Coal – Green Kuzbass), Stage 3.1: An ecological test-site of world-class reclamation and remediation technologies (Agreement No. 075-15-2022-1200, September 28, 2022).

**For citation:** Osintseva MA, Dyukova EA, Ulyanova EG, Osintsev AM. Heavy Metals Accumulation in Plants During Coal Mine Reclamation. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):897–908. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2551

## Введение

После завершения разработки угольных разрезов на их месте остается огромная площадь с технологически измененным рельефом, практически лишенная растительности и, как правило, загрязненная токсичными веществами. Процесс биологической рекультивации техногенно нарушенных земель угледобывающих предприятий требует решения сложной многофакторной задачи. Рекультивация земель после открытой добычи угля включает в себя целый комплекс работ. В идеальном случае для оценки и социально-экономических результатов рекультивации должен быть обеспечен обширный набор геологических, физико-химических и экологических измерений. Только такой целостный обзор основных параметров рекультивации способен обеспечить ее положительный результат [1].

Частичное восстановление нарушенного рельефа осуществляется на технологическом этапе рекультивации. Проводятся мелиоративные работы, и формируются условия для биологического этапа, связанного с созданием растительного покрова рекультивируемой территории. Финальный этап биологической рекультивации обеспечивает восстановление техногенно нарушенной экосистемы, возобновление процесса почвообразования и формирование способности почвы к самоочищению [2–7].

Загрязнение окружающей среды опасными веществами в результате промышленной деятельности человека, в частности добычи полезных ископаемых, становится серьезной проблемой во всем мире. Для очистки почвы доступно несколько физических, химических и биологических методов рекультивации. Фиторемедиация рассматривается в качестве одного из экономически эффективных подходов к экологической реабилитации техногенно нарушенных земель. Этот способ биологической очистки почвы использует способность растений концентрировать элементы и соединения в процессе своего роста и детоксифицировать различные соединения, не вызывая дополнительного загрязнения. Концентрирующий эффект является результатом способности определенных растений биоаккумулировать химические вещества. Основное преимущество фиторемедиации перед другими методами состоит в том, что загрязнения удаляются из почвы, не разрушая ее структуры, и без снижения почвенного плодородия.

Фиторемедиация использует различные механизмы для разложения, удаления или иммобилизации загрязняющих веществ [8], включая ризодеградацию, фитодеградацию, фитоэкстракцию, ризофильтрацию, фитоволетализацию (или фитоиспарение) и иммобилизацию (фитостабилизацию). Фитодеградация – это метаболизм, приводящий к разложению опасных загрязнений, например нефтепродуктов, внутри побегов растений за счет производимых растениями ферментов. Ризодеградация отличается от фитодеградации тем, что процессы разложения загрязнений происходят в прикорневой системе растений – в ризосфере. Фитоэкстракция приводит к накоплению вредных примесей, например тяжелых металлов, внутри растений, тем самым очищая почву. Ризофильтрация – это процесс фитофиксации, приводящий к очистке прикорневой воды. Фитостабилизация способствует удержанию загрязнений в растительной биомассе.

Н. В. Фотина и др. предложили перечень рекомендованных растений для биологического этапа рекультивации, в том числе культур растений, обладающих высокой поглотительной способностью в отношении поллютантов. Приведены примеры микроорганизмов и их комплексов, применяемых для целей биоремедиации [9]. M. Azizi с соавторами выявили, что накопление потенциально токсичных и редкоземельных элементов в растениях и их транслокация из корня в побег различаются в зависимости от вида растений и образцов почв [10]. Исследования T. Shakeel и др. направлены на оценку способности различных видов растений накапливать, концентрировать и переносить тяжелые металлы на территории загрязненного участка угольной добычи [11]. Примерный перечень растений для использования в фиторемедиационных целях в городской среде описан в работе Е. Ю. Зайковой и С. С. Феофановой [12].

Целый ряд полевых испытаний подтвердил возможность использования растений для очистки окружающей среды. Например, O. Akhtar с соавторами выявили возможность использования грибов арбускулярной микоризы для очистки сельскохозяйственных земель от избытка хрома [13]. L. Marchiol и др. оценивали фиторемедиационный потенциал однолетних культур *Sorghum bicolor* и *Helianthus annuus* с высоким урожаем биомассы, выращенных на полиметаллической почве [14]. Результаты эксперимента признаны вполне успешными. В обзорной статье V. Shah и A. Daverey обсуждаются ограничения и будущие направления в области устойчивой фиторемедиации. Отмечено, что фиторемедиация на данный момент менее эффективна, чем физические методы, она находится на стадии активной разработки и, судя по всему, может стать вполне конкурентоспособной, учитывая ее экологические и коммерческие перспективы [15].

Добыча угля, как правило, приводит к распространению тяжелых металлов в окружающей среде. Наиболее опасные для окружающей среды тяжелые металлы и металлоиды включают хром, никель, медь, цинк, кадмий, свинец, ртуть и мышьяк. Использование принципов фиторемедиации требует выявления растений, устойчивых к таким металлам и способных накапливать их в значительном количестве. В работе N. L. Sanami и др. оценивался фиторемедиационный потенциал растений в заброшенных угольных отходах на севере Ирана. Исследования показали умеренное загрязнение Cu, Ni, V, Zn, Pb, Cr и As в угольных отходах. Была продемонстрирована роль местных растений, включая многолетние и однолетние растения с различными жизненными формами, в извлечении и стабилизации металлов для устойчивого управления угольными отходами [16].

Тяжелые металлы являются хорошо известными загрязнителями окружающей среды из-за их токсичности, стойкости в окружающей среде и биоаккумулятивной природы. Их антропогенными источниками являются добыча полезных ископаемых, а также различные промышленные и сельскохозяйственные виды деятельности. Трофический перенос этих элементов в водных и наземных пищевых цепях / сетях имеет важные последствия для дикой природы и здоровья человека [17]. Всестороннее исследование химии окружающей среды и экотоксикологии опасных тяжелых металлов и металлоидов показывает, что необходимо предпринять шаги для минимизации

воздействия этих элементов на здоровье человека и окружающую среду [18, 19].

Целью данной работы являлось исследование фиторемедиационного потенциала многолетних и однолетних бобовых и злаковых растений, высаженных на экспериментальных участках научно-технического полигона, расположенного на одном из отвалов угольного разреза Кемеровской области – Кузбасса.

**Объекты и методы исследования**

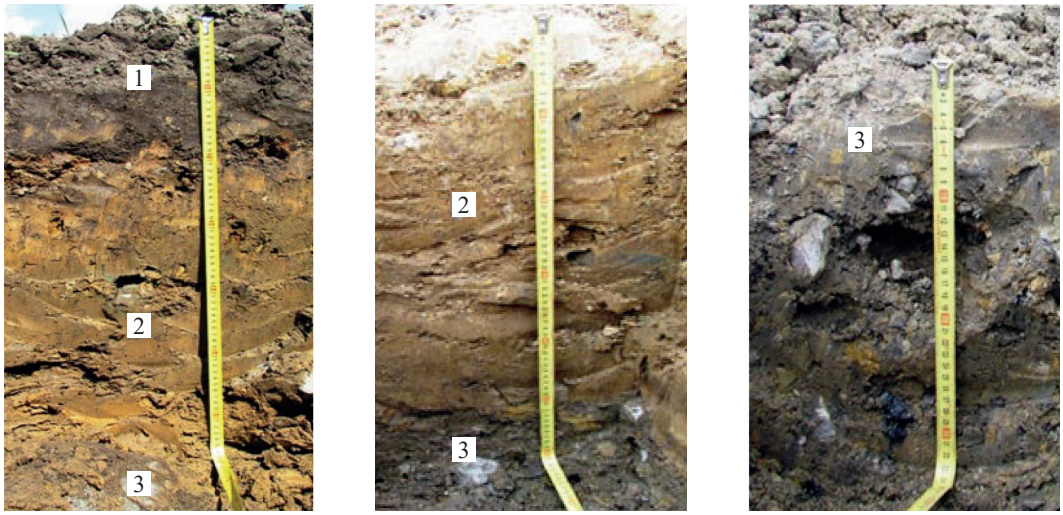
Исследования фиторемедиационного потенциала проводили поэтапно. Первый этап заключался в исследовании почвенно-климатических условий участков. Устанавливали тип почвы, ее структурные и агрохимические показатели.

На научно-техническом полигоне [5] в результате горнотехнического этапа рекультивации были организованы три участка с различными способами формирования корнеобитаемого слоя, на которых впоследствии был создан различный растительный покров (табл. 1).

На участке № 1 осуществлено послойное нанесение потенциально-плодородных пород мощностью 40–60 см и плодородного слоя почвы мощностью не менее 20–40 см (тип почвы – технозем гумусогенный дифференцированный). Участок № 2 был отсыпан слоем потенциально-плодородных пород (глинозем) мощностью 40–60 см (тип почвы – технозем литогенный недифференцированный). Участок № 3 был сформирован непосредственно на поверхности спланированного отвала, почвообразующий субстрат которого представлен смесью вскрышных и вмещающих пород, слагающих тело отвала (тип почвы – эмбриозем инициальный).

Профили почвогрунтов спланированных участков с послойной отсыпкой представлены на рисунке 1, где достаточно хорошо различимы все три описанных выше слоя грунта.

Комплексный анализ образцов почвы, отобранных со всех экспериментальных участков, был проведен после завершения горнотехнических работ в начале лета 2023 г. и повторно – до начала периода вегета-




a b c

Рисунок 1. Отсыпка участков № 1 (a), № 2 (b) и № 3 (c): 1 – плодородный слой на потенциально-плодородном слое глинозема; 2 – потенциально-плодородный слой глинозема на вскрышной породе; 3 – вскрышные породы

Figure 1. Backfills, areas № 1 (a), № 2 (b), and № 3 (c): 1 – fertile topsoil on potentially fertile alumina; 2 – potentially fertile alumina on overburden; 3 – overburden

Таблица 1. Характеристика выбранных растений фиторемедиаторов

Table 1. Phytoremediators: profile

| Название | Характеристика | Функции | Тип почв |
|---|---|---|---|
| Смесь злаковых трав | Неприхотливые однолетние и многолетние травянистые растения | Пополняют запасы калия, азота, структурируют, повышают уровень влагопроницаемости, предотвращают от вымывания | Любые |
| Смесь бобовых трав | Травянистые однолетние и многолетние растения с плотным стеблем и хорошо развитой корневой системой | Основное преимущество – наличие хорошо развитой мочковатой корневой системы, которая образует большую площадь поверхности для колонизации почвенными микроорганизмами | Любые |

ции весной 2024 г. в аккредитованной лаборатории Института почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук. Для анализа из выбранного слоя почвы отбирались образцы массой 2,5–5,0 кг.

Определение кислотности солевой и водной вытяжки образцов грунта осуществлялось в соответствии с ГОСТ 26483 и ГОСТ 26423. Анализ органических веществ – по ГОСТ 26213. Исследование подвижного фосфора – по ГОСТ 54650. Определение подвижного калия – по ГОСТ 54650. Уровень нитратного азота – по ГОСТ 26951.

На втором этапе проводили посев выбранных растений на экспериментальных участках и наблюдали за процессом их вегетации [5, 20].

На третьем этапе исследований в конце периода вегетации осенью 2023 и 2024 г. были отобраны пробы растительной массы со всех экспериментальных участков и проанализированы на содержание опасных веществ в аккредитованной лаборатории Центра агрохимической службы «Кемеровский». Для анализа отбирались очищенные от грунта образцы растений массой 0,5–1,0 кг.

Определение биомассы растений осуществлялось в соответствии с ГОСТ Р 56881-2016. Анализ биохимического состава растений проведен в соответствии с ГОСТ 13496.4 (п. 8), ГОСТ 26657( п. 4) и ГОСТ 30504. Исследование массовой доли сухого вещества растений проводили по ГОСТ 31640 п.7.

Выявление содержания тяжелых металлов в образцах почвы и растений осуществлялось в соответствии с методическими указаниями по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства [21]. Содержание мышьяка в почвах определялось фотометрическим методом [22].

**Результаты и их обсуждение**

Гранулометрический состав определяет практически все физические свойства почв, такие как пористость, плотность сложения, водопроницаемость, влагоемкость, воздушный и гидротермический режимы. В связи с использованием для формирования профиля почвогрунтов техногенных элювиев и суглинка с примесью камней в почвенном профиле исследуемых почвогрунтов участков № 2 и № 3 присутствуют крупные каменистые отдельности. В поверхностном слое участка № 1 твердых частиц размером более 3 мм не наблюдается (табл. 2)

На участке № 1 (с послойным нанесением плодородного слоя и потенциально-плодородных пород) содержание каменистых отдельностей незначительное. В плодородном слое крупные камни отсутствуют, небольшое их количество отмечается в потенциально-плодородных породах. Максимальное их содержание зафиксировано в техногенном элювии подстилающих пород. По гранулометрическому составу почвогрунты характеризуются как среднесуглинистые.

На участке № 2 (с отсыпкой потенциально-плодородными породами) каменистый материал встречается по всему профилю, а наибольшее его количество – в техногенном элювии подстилающих пород. Отсыпанный слой почвогрунта характеризуется как тяжелосуглинистый.

На участке № 3, где почва представлена техногенным элювием, отмечается наибольшее количество каменистых отдельностей в корнеобитаемом слое. Как видно из таблицы 2, происходит их увеличение вниз по профилю, при этом наблюдается снижение содержания мелких частиц (менее 1 мм), и соответственно снижается содержание физической глины в почве. Почвогрунт по гранулометрическому составу характеризуется как супесь.

Проведенные исследования показали, что на участке № 1 происходит постепенное увеличение плотности сложения вниз по профилю. Верхний, корнеобитаемый слой почвогрунта характеризуется как среднеплотный (плотность – 1,28–1,32 г/см$^3$), а его пористость оценивается как удовлетворительная. Суглинистый горизонт на участке характеризуется как плотный (плотность – 1,34–1,46 г/см$^3$), а пористость – низкая. Подстилающие породы, представленные смесью вскрышных и вмещающих пород, по плотности сложения характеризуются как очень плотные (плотность – 1,75–1,94 г/см$^3$), пористость данных горизонтов оценивается как чрезмерно низкая.

Верхний 10-сантиметровый слой участка № 2 по плотности сложения характеризуется как плотный и составляет 1,32–1,42 г/см$^3$. Ниже по профилю отмечается увеличение плотности до 1,55–1,83 г/см$^3$, слой характеризуется как очень плотный. Пористость всего почвенного профиля характеризуется как чрезмерно низкая.

Таблица 2. Гранулометрический состав участков рекультивации

Table 2. Reclamation sites: granulometry

| № участка | Глубина, см | Доля фракций диаметром (мм), % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | >10 | 10–5 | 5–3 | 3–1 | < 1 |
| 1 | 0–5 | 0 | 0 | 0 | 16 | 84 |
| | 5–10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 91 |
| | 10–40 | 0 | 0 | 0 | 10 | 90 |
| | 40–80 | 1 | 1 | 2 | 28 | 68 |
| | 80–100 | 5 | 1 | 1 | 23 | 70 |
| 2 | 0–5 | 2 | 3 | 6 | 23 | 66 |
| | 5–10 | 3 | 2 | 6 | 31 | 58 |
| | 10–20 | 2 | 8 | 16 | 21 | 63 |
| | 20–40 | 3 | 1 | 2 | 30 | 64 |
| | 40–80 | 75 | 4 | 5 | 7 | 9 |
| 3 | 0–5 | 12 | 9 | 20 | 20 | 39 |
| | 5–10 | 16 | 27 | 19 | 19 | 19 |
| | 10–20 | 48 | 10 | 14 | 12 | 16 |
| | 20–30 | 32 | 11 | 14 | 10 | 33 |

Плотность сложения на участке № 3 верхнего 5-сантиметрового слоя характеризуется как плотная (1,38–1,40 г/см$^3$), ниже по профилю отмечается ее увеличение (1,76–1,91 г/см$^3$), и она характеризуется как очень плотная. Пористость всего профиля почвогрунта характеризуется как чрезмерно низкая.

Содержание органического вещества в верхнем горизонте почвенного покрова на участке № 1, представленного плодородным слоем, составляет от 3,5 до 5,5 %, данный тип почвы характеризуется как среднегумусовый. Ниже по профилю в горизонте, субстрат которого представлен потенциально-плодородными породами, а также смесью вскрышных и вмещающих пород, наблюдается резкое снижение содержания гумуса, и данный горизонт характеризуется как безгумусовый.

Почвогрунты участка № 2 с отсыпкой потенциально-плодородными породами по содержанию органического вещества, которое составляет менее 1 %, характеризуются как безгумусовые.

Содержание органического вещества на участке № 3 в верхнем 10-сантиметровом слое достигает 6,1 %, почва характеризуется как среднегумусовая. Ниже по профилю отмечается снижение содержания органического вещества до 2,4 %, слой характеризуется как низкогумусовый. Эти определения являются условными, т. к. анализ содержания органических веществ производился по углероду. Высокое содержание органического вещества на данном участке свидетельствует о наличии угольных частиц в профиле почвы.

Еще одним важным критерием, характеризующим почвенно-экологическое состояние исследуемых участков рекультивации, является обеспеченность почв биофильными элементами (азотом, фосфором и калием).

Проведенные исследования показали, что в верхнем гумусовом 20-сантиметровом слое на участке № 1 содержание нитратного азота составляет 109 мг/кг в верхней части профиля и 55 мг/кг – в нижней. Обеспеченность данного участка высокая, и потребность в азотном удобрении отсутствует.

На участках с отсыпкой суглинком отмечается низкое содержание нитратного азота (5,5–6,5 мг/кг), а с глубиной его содержание снижается до очень низкого. Потребность данных участков в азотных удобрениях велика.

Содержание нитратного азота в верхнем слое на участке № 3 имеет достаточно высокие значения (15,5–17,4 мг/кг), следовательно потребность в азотных удобрениях отсутствует. Ниже по профилю содержание азота в почвогрунте снижается и характеризуется как среднее. Возможно, наличие соединений азота в слое, образованном вскрышными породами, связано с проведением взрывных работ.

Верхний гумусовый горизонт участка № 1 характеризуется средним содержанием подвижного фосфора и составляет от 59 до 88 мг/кг, вниз по профилю отмечается его снижение до низкой обеспеченности.

Участок № 2 характеризуется низким содержанием подвижного фосфора по всему профилю. Его содержание не превышает 46,3 мг/кг.

Участок № 3 характеризуется средним содержанием подвижного фосфора по всему профилю.

В верхнем гумусовом горизонте участка № 1 содержится от 162 до 92 мг/кг обменного калия. Вниз по профилю наблюдается его снижение до 37–50 мг/кг. Таким образом, верхний гумусовый горизонт участка № 1 характеризуется средним содержанием обменного калия, а нижележащие горизонты – низким.

Содержание калия на участке № 2 изменяется от очень низкого, менее 50 мг/кг, до низкого 65 мг/кг.

Участок № 3, сформированный техногенным элювием, характеризуется низким содержанием подвижного калия.

Кислотность почвы влияет на жизнедеятельность микроорганизмов, активизируя одни группы и подавляя другие. От концентрации ионов водорода зависит уровень ферментативной активности почвы, связанной с микробиологическими процессами. Результатом этих процессов является изменение соотношения скоростей минерализации и гумификации растительного материала и, как следствие, темпов гумусонакопления.

Проведенные исследования показали, что верхний гумусовый горизонт участка № 1 характеризуется нейтральной реакцией почвенного раствора и его pH составляет 6,7–6,8. Нижележащие горизонты суглинка и техногенного элювия характеризуются щелочной реакцией почвенного раствора, их pH принимает значения в диапазоне 7,4–8,2.

Пробы почвы на участке с отсыпкой потенциально-плодородными породами характеризуются значениями pH почвенного раствора от слабощелочных (7,4–7,5) до щелочных (7,8–8,1).

Исследования почвенного покрова участка № 3, сложенного техногенным элювием, показали щелочную реакцию проб почву со значениями pH 7,6–8,3.

Емкость катионного обмена – один из важнейших показателей почвенного поглощающего комплекса, который характеризует катионообменную способность почв, т. е. количество катионов почвы, способных к обмену на катионы нейтральной соли. Емкость катионного обмена зависит от типа почвы, минералогического, гранулометрического состава, количества гумуса и реакции среды. Чем больше в почве глинистых минералов и гумуса, чем ближе к нейтральной реакция почвы, тем выше емкость катионного обмена.

Емкость катионного обмена на участке № 1 в верхнем 10-сантиметровом слое характеризуется как высокая и составляет от 20 до 27 мг-экв./100 г. Нижележащие горизонты, сложенные субстратом потенциально-плодородных пород и техногенным элювием, имеют более низкие значения емкости катионного обмена (11–16 мг-экв./100 г), которые характеризуются как средние.

На участке № 2 (с отсыпкой потенциально-плодородными породами) емкость катионного обмена верхнего 10-сантиметрового слоя характеризуется как высокая и составляет 24–31 мг-экв./100 г. В нижележащих слоях емкость катионного обмена изменяется от 11 до 31 мг-экв./100 г, т. е. от средней до высокой.

На участке № 3 (субстрат представлен техногенным элювием) емкость катионного обмена верхнего 10-сантиметрового слоя составляет 5–15 мг-экв./100 г, т. е. изменяется от низкой до средней. В нижележащих слоях емкость катионного обмена изменяется от 11 до 34 мг-экв./100 г, т. е. от средней до высокой.

Как уже отмечалось выше, после завершения разработки угольных разрезов на их месте остается огромная площадь с технологически измененным рельефом, практически лишенная растительности и, как правило, загрязненная токсичными веществами, в том числе тяжелыми металлами.

Проведенные исследования подвижных форм никеля, цинка, свинца, меди, хрома и кадмия (табл. 3) показали, что содержание этих элементов в исследуемых почвах не превышает предельно допустимых концентраций (ПДК) [23]. Единственным исключением является содержание никеля на участке № 3, почвенный покров которого сформирован смесью вскрышных и вмещающих пород.

В плодородном слое на участке № 1 отмечается незначительное увеличение количества кадмия по профилю в нижележащих горизонтах, представленных потенциально-плодородными породами и техногенным элювием. На участках № 2 и 3 концентрация кадмия не превышает 0,002 мг/кг. Содержание меди также низкое, и лишь в верхнем слое техногенного элювия достигает примерно трети ПДК.

Содержание свинца в почвах, представленных техногенным элювием, составляет от 2,5 до 3,5 мг/кг, а на участках с отсыпкой суглинком – 1,4–1,7 мг/кг, что не превышает значений ПДК. На участке № 1 его содержание не достигает 1 мг/кг.

Содержание цинка в исследуемых почвогрунтах, как видно из таблицы 3, тоже не превышает значений ПДК. Незначительным оказалось содержание ртути и мышьяка в образцах почвы.

Количество никеля в верхнем 5-сантиметровом слое участка № 3 составляет 7,4 мг/кг, что практически вдвое превышает значения ПДК, с глубиной отмечается снижение концентрации данного элемента до уровня, незначительно превышающего ПДК.

Для оценки изменения микроэлементного состава почвогрунта, произошедшего после завершения периода вегетации 2023 г., весной 2024 г., до начала нового периода вегетации, был проведен повторный анализ поверхностных корнеобитаемых слоев на всех экспериментальных участках.

Проведенные исследования содержания органического вещества в корнеобитаемых слоях почвенного покрова на экспериментальных участках показали, что на участке № 1 его среднее значение практически не изменилось и составило 5,1 %.

В почвогрунте участка № 2 (с отсыпкой потенциально плодородными породами) заметно увеличилось содержание органического вещества, значение которого достигло 1,7 %, что, очевидно, связано с попаданием в него органических веществ растений предыдущего периода вегетации.

Содержание органического вещества в верхнем слое участка № 3 уменьшилось до 1,5 %. Возможно, как отмечалось выше, высокое содержание органического

Таблица 3. Содержание подвижных форм микроэлементов в почвогрунтах в начале лета 2023 г.

Table 3. Mobile microelements in soil samples, early summer 2023

| № участка | Глубина, см | Концентрация микроэлемента, мг/кг | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ni | Zn | Pb | Cu | Cr | Cd | Co | Hg | As |
| 1 | 0–5 | 0,316 | 1,638 | 0,01 | 0,157 | < 0,1 | 0,025 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 5–10 | 0,462 | 1,923 | 0,01 | 0,094 | < 0,1 | 0,027 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 10–40 | 0,652 | 1,994 | 0,661 | 0,088 | < 0,1 | 0,058 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 40–80 | 0,831 | 0,518 | 0,951 | 0,102 | < 0,1 | 0,031 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 80–100 | 1,446 | 1,628 | 1,166 | 0,390 | < 0,1 | 0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| 2 | 0–5 | 1,661 | 0,216 | 1,63 | <0,001 | < 0,1 | <0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 5–10 | 1,775 | 0,406 | 1,574 | <0,001 | < 0,1 | <0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 10–20 | 1,724 | 0,19 | 1,468 | <0,001 | < 0,1 | <0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 20–40 | 1,724 | 0,221 | 1,417 | <0,001 | < 0,1 | <0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 40–80 | 1,817 | 1,173 | 1,709 | 0,063 | < 0,1 | <0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| 3 | 0–5 | 7,362 | 3,875 | 3,504 | 1,054 | < 0,1 | < 0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 5–10 | 5,201 | 2,030 | 2,769 | 0,357 | < 0,1 | < 0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 10–20 | 3,929 | 1,912 | 2,486 | 0,364 | < 0,1 | < 0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| | 20–30 | 4,201 | 1,729 | 2,677 | 0,391 | < 0,1 | < 0,002 | < 0,002 | < 0,1 | < 0,1 |
| Предельно допустимая концентрация | | 4,0 | 23,0 | 6,0 | 3,0 | 6,0 | 1,0 | 5,0 | 2,1 | 2,0 |

вещества, обнаруженное в предыдущем исследовании, было связано с угольной пылью, присутствовавшей в почве, сформированной вскрышными породами. Эрозионные процессы могли привести к вымыванию угольных частиц. Эти выводы являются условными, т. к. анализ содержания органических веществ производился по углероду.

Проведенные исследования показали, что в верхнем слое на участке № 1 содержание общего азота составляет 70 мг/кг. Содержание общего азота в верхних слоях почвы участков № 2 и № 3 заметно увеличилось и достигло 50 мг/кг.

Верхний гумусовый горизонт участка № 1 характеризуется средним содержанием подвижного фосфора и составляет в среднем 70 мг/кг. Участок № 2 характеризуется низким содержанием подвижного фосфора – в среднем 35 мг/кг. Участок № 3 характеризуется самым высоким содержанием подвижного фосфора – в среднем 120 мг/кг.

В верхнем гумусовом горизонте участка № 1 содержится 142 мг/кг обменного калия. Содержание калия на участках № 2 и № 3 составляет 139 и 139 мг/кг соответственно, что заметно превышает предыдущие значения.

Исследования показали, что верхние слои почвогрунта на всех участках характеризуются щелочной реакцией почвенного раствора и их pH принимает значения в диапазоне 7,9–8,4.

Емкость катионного обмена на участке № 1 в верхнем слое характеризуется как высокая и составляет 35,7 мг-экв./100 г. Еще более высокое значение емкости катионного обмена получено для образцов верхнего слоя почвогрунта на участке № 2 – 39,7 мг-экв./100 г. На участке № 3 емкость катионного обмена верхнего слоя составляет 27,8 мг-экв./100 г.

Для анализа образцов почвы на содержание тяжелых металлов были выбраны лишь те элементы, которые по итогам предыдущего анализа микроэлементного состава обнаружены в почве в значимых количествах. Образцы грунта отбирались в нескольких точках каждого участка из слоев глубиной до 50 см на участках № 1 и 2 и глубиной до 20 см на участке № 3. Образцы с каждого участка тщательно перемешивались, после чего отбирались экспериментальные пробы. Результаты анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4. Содержание подвижных форм микроэлементов в почвогрунтах весной 2024 г.

Table 4. Mobile microelements in soil samples, spring 2024

| Концентрация микроэлемента, мг/кг | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ni | Zn | Pb | Cu | Cd |
| Участок № 1 | | | | |
| 1,75 | 1,23 | 2,50 | < 0,1 | < 0,1 |
| Участок № 2 | | | | |
| 2,12 | < 1,0 | 2,54 | < 0,1 | < 0,1 |
| Участок № 3 | | | | |
| 2,64 | < 1,0 | < 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |

Данные таблицы 4 свидетельствуют, что значения концентраций металлов изменились разнонаправленно. Но общая тенденция соответствует выравниванию концентраций. На наш взгляд, этот процесс может быть обусловлен эрозией элементов и их перераспределением водными потоками между различными участками.

Можно отметить заметное повышение концентраций никеля, цинка и свинца в почве участков № 1 и № 2 , а также понижение концентраций этих элементов в прикорневых слоях участка № 3. Для наглядности на рисунке 2 представлены сравнительные гистограммы содержания некоторых тяжелых металлов в почве. Для сравнения результаты анализа проб почвы 2023 г. усреднялись по глубине.

Как видно из рисунка 2, содержание тяжелых металлов в почве участков № 1 и № 2 через год выросло. Этот факт легко объясним. Дело в том, что, как описывалось выше, верхние слои этих участков формировались отсыпкой потенциально-плодородного и плодородного слоев почвы, завезенных из-за пределов отвала. Через год диффузионные и конвекционные процессы за счет грунтовых вод привели к перераспределению подвижных форм металлов. Следует отметить, что содержание тяжелых металлов нигде не превышало ПДК, за исключением содержания никеля на участке № 3 в образцах 2023 г. На участке № 3, образованном вскрышными породами угольного карьера, заметно существенное снижение содержания тяжелых металлов в почве. Этот факт можно по крайней мере частично объяснить процессами фиторемедиации.

Ниже представлены результаты анализа растительной массы, собранной осенью 2023 г. Следует отме-

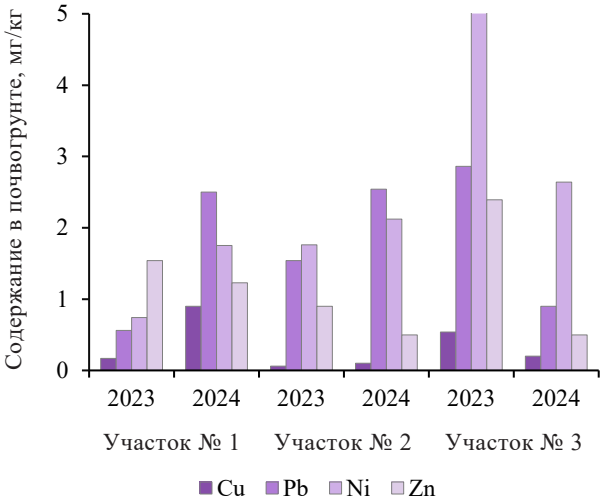



Рисунок 2. Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов по годам в образцах почвогрунта

Figure 2. Comparative chronological analysis of heavy metals in soil samples

тить, что посев трав осуществлялся лишь в июле, после оформления всех документов и получения разрешений для работы на научно-техническом полигоне. Период вегетации продолжался до начала октября.

Для бобовых культур на участке № 1 были получены следующие данные. Содержание (массовая доля) в растительной массе азота (4,07 %), фосфора (0,29 %), калия (5,62 %) не отличается от средних показателей травянистой растительности сенокосов и пастбищ. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 0,51, кадмия – менее 0,1, меди – 6,3, цинка – 13,8, марганца – 85 мг/кг – не превышает максимально допустимый уровень (МДУ) [24] химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 15,6 %. Содержание железа – 350 мг/кг в абсолютно сухом веществе. Содержание железа в пересчете на естественную влажность растительности составило 54,6 мг/кг, что не превышает МДУ (100 мг/кг) по содержанию железа в кормах.

На участке № 2 содержание азота (3,23 %), фосфора (0,28 %), калия (4,47 %) не отличается от средних показателей травянистой бобовой растительности. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 0,74, кадмия – менее 0,1, меди – 5,7, цинка – 11,4, марганца – 65 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 15,77 %. Содержание железа в пересчете на естественную влажность – 43,5 мг/кг.

На участке № 3 содержание азота (3,29 %), фосфора (0,25 %), калия (4,55 %) не отличается от средних показателей. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 0,63, кадмия – менее 0,1, меди – 3,7, цинка – 10,5, марганца – 147 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 17,25 %. Содержание железа в пересчете на естественную влажность растительности составило 51,6 мг/кг.

Для злаковых растений на участке № 1 содержание в растительной массе азота (1,73 %), фосфора (0,26 %), калия (5,53 %) не отличается от средних показателей травянистой растительности сенокосов и пастбищ. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 0,84, кадмия – менее 0,1, меди – 3,3, цинка – 10,2, марганца – 129 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 18,54 %. Содержание железа в пересчете на естественную влажность растительности составило 92,7 мг/кг, что сопоставимо с МДУ (100 мг/кг) по содержанию железа в кормах.

На участке № 2 для злаковых трав содержание азота (1,18 %), фосфора (0,23 %), калия (3,89 %) не отличается от средних показателей травянистой растительности. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 0,65, кадмия – менее 0,1, меди – 4,2, цинка – 9,9 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 24,11 %. Содержание марганца в пересчете на естественную влажность растительности составило более 241 мг/кг, что значительно превышает МДУ (100 мг/кг) по содержанию марганца в кормах. Содержание железа в пересчете на естественную влажность – 111,4 мг/кг, что немного превышает МДУ.

На участке № 3 в растительной массе злаковых трав содержание азота (1,42 %), фосфора (0,19 %), калия (5,02 %) также не отличается от средних показателей травянистой растительности. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 0,64, кадмия – менее 0,1, меди – 4,5, цинка – 16,5 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 24,64 %. Содержание марганца в пересчете на естественную влажность растительности составило 141 мг/кг, что почти в 1,5 раза превышает МДУ по содержанию марганца в кормах. Содержание железа в пересчете на естественную влажность – 85,76 мг/кг, что близко к МДУ для железа.

Для оценки изменения содержания тяжелых металлов в растительной массе бобовых и зерновых травянистых культур, произошедшего в течение периода вегетации 2024 г., осенью 2024 г. был проведен повторный анализ содержания тяжелых металлов в растительной массе на всех экспериментальных участках.

Для бобовых культур на участке № 1 были получены следующие данные. Содержание (массовая доля) в растительной массе азота (2,69 %), фосфора (0,31 %), калия (1,91 %) не отличается от средних показателей травянистой растительности сенокосов и пастбищ. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 1,54, кадмия – менее 0,19, меди – 5,7, цинка – 20,4, марганца – 85 мг/кг – не превышает МДУ [24] химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 25,7 %. Содержание железа – 568 мг/кг в абсолютно сухом веществе, марганца – 32 мг/кг, что не превышает МДУ по содержанию железа и марганца в кормах.

На участке № 2 содержание азота (1,06 %), фосфора (0,18 %), калия (1,46 %) также не отличается от средних показателей травянистой бобовой растительности. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 5,22, кадмия – 0,32, меди – 9,7, цинка – 27,6, марганца – 312 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 27,7 %. Содержание железа в пересчете на естественную влажность растительности (> 250 мг/кг) существенно превышает МДУ (100 мг/кг) по содержанию железа в кормах.

На участке № 3 содержание азота (2,06 %), фосфора (0,23 %), калия (1,5 %) не отличается от средних показателей травянистой растительности сенокосов и пастбищ. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 1,98, кадмия – менее 0,22, меди – 6,5, цинка – 21,8, марганца – 85 мг/кг – не превышает МДУ [24] химических элементов в кормах для животных. Массовая доля сухого вещества – 25,7 %. Содержание железа – более 1000 мг/кг в абсолютно сухом веществе. Содержание железа в пересчете на естественную влажность растительности (> 250 мг/кг) существенно превышает МДУ (100 мг/кг) по содержанию железа в кормах.

Для злаковых растений на участке № 1 содержание в растительной массе азота (2,68 %), фосфора (0,31 %), калия (3,36 %) не отличается от средних показателей травянистой растительности сенокосов и пастбищ. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 0,35, кадмия – 0,15, меди – 2,6, цинка – 16,7, марганца – 101, железа – 293 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 14,3 %.

На участке № 2 для злаковых трав содержание азота (1,12 %), фосфора (0,17 %), калия (2,04 %) не отличается от средних показателей травянистой растительности. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 2,64, кадмия – 0,13, меди – 8,7, цинка – 19,6, марганца – 126 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 22,48 %. Содержание железа в пересчете на естественную влажность – 147 мг/кг, что почти в 1,5 раза превышает МДУ.

На участке № 3 в растительной массе злаковых трав содержание азота (2,09 %), фосфора (0,25 %), калия (2,79 %) также не отличается от средних показателей травянистой растительности. Содержание тяжелых металлов в абсолютно сухом веществе растительной массы: свинца – 2,24, кадмия – 0,25, меди – 7,5, цинка – 21,1, марганца – 27,7 мг/кг – не превышает МДУ химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Массовая доля сухого вещества – 20,12 %. Содержание железа в пересчете на естественную влажность – более 200 мг/кг, что более чем в 2 раза превышает МДУ для железа.

Высокое содержание железа и марганца в некоторых образцах растительной массы, видимо, связано с тем, что в почвообразующих породах в геологическом фундаменте Кузбасса всегда много железа и марганца.

На рисунке 3 представлены сравнительные гистограммы содержания некоторых тяжелых металлов в растительной массе злаковых растений к концу периодов вегетации 2023 и 2024 г. Рисунок 4 иллюстрирует сравнительные гистограммы содержания некоторых тяжелых металлов в растительной массе бобовых растений к концу периодов вегетации 2023 и 2024 г.

На наш взгляд, заметное увеличение содержания металлов в образцах растительной массы 2024 г. связано, прежде всего, с увеличением периода вегетации растений. Хотя нельзя исключать и повышение способности растений к аккумулированию ряда веществ. Можно отметить более высокую способность бобовых растений к аккумулированию цинка. В среднем способности к аккумулированию различных тяжелых металлов для бобовых и злаковых растений вполне сравнимы. Однако следует учитывать, что приведен-

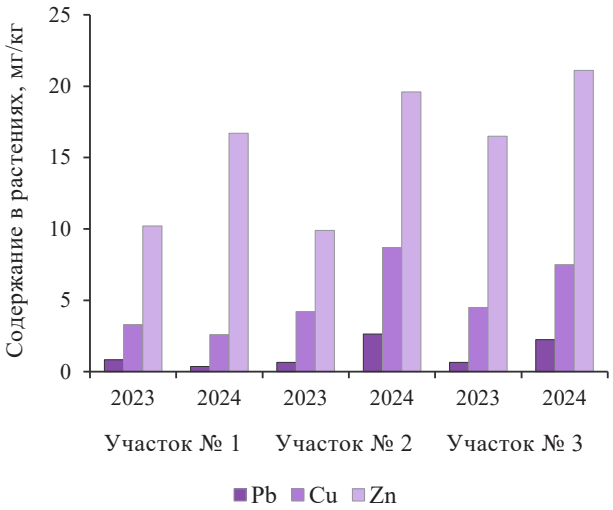



Рисунок 3. Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов по годам в образцах злаковых растений

Figure 3. Comparative chronological analysis of heavy metals in cereals

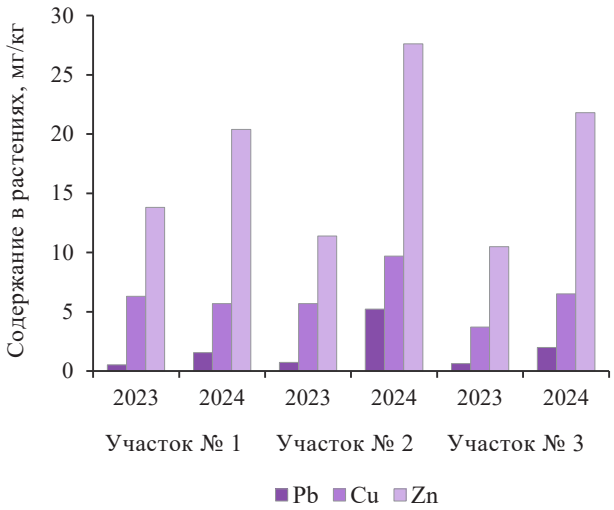



Рисунок 4. Сравнительный анализ содержания тяжелых металлов по годам в образцах бобовых растений

Figure 4. Comparative chronological analysis of heavy metals in legumes

ные данные относятся к содержанию металлов в сухом веществе. Учитывая, что содержание сухих веществ у злаковых растений заметно ниже (15–20 %), чем у бобовых (25–30 %), можно говорить о большей способности к накоплению металлов у злаковых растений в пересчете на единицу биомассы при естественной влажности.

**Выводы**

Двухлетний опыт наблюдения за накоплением тяжелых металлов в бобовых и злаковых травянистых растениях подтвердил их способность к фиторемедиации при использовании в качестве материалов для проведения биологической рекультивации техногенно нарушенных территорий. Безусловно, процесс фиторемедиации в значительной степени подвержен влиянию многочисленных факторов, сопутствующих процессу рекультивации, таких как формирование почвообитаемого слоя, гидродинамические особенности территории, эрозионные процессы и др.

Травянистые растения снижают концентрацию тяжелых металлов в почвах, формирующихся из вскрышных пород угольного разреза. Как показали эксперименты, бобовые и злаковые культуры обладают достаточно высоким фиторемедиационным потенциалом по отношению к таким элементам, как свинец, кадмий, цинк, никель, медь, марганец и железо.

Данные, полученные в результате исследования, могут быть полезны для специалистов, занимающихся проблемами рекультивации территорий выработанных угольных разрезов.

**Критерии авторства**

Авторы заявляют о равнозначном вкладе в подготовку и написание статьи.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution**

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

**Conflict of interest**

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

**References/Список литературы**

1. Gavrilov VL, Nemova NA, Reznik AV, Kosarev NS, Kolesnikov AA. On the need for a comprehensive geoecological assessment of lands disturbed by mining. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023;334(10):76–87. (In Russ.). https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4212; https://elibrary.ru/YMLJFC

2. César RG, Belei L, Badari CG, Viani RAG, Gutierrez V, Chazdon RL, *et al.* Forest and Landscape Restoration: A Review Emphasizing Principles, Concepts, and Practices. Land. 2021;10(1):28. https://doi.org/10.3390/land10010028

3. Asyakina LK, Dyshlyuk LS, Prosekov AYu. Reclamation of Post-Technological Landscapes: International Experience. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):805–818. (In Russ.). http://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818; https://elibrary.ru/SANMZI

4. Waitkus AK. Sustainable reclamation practices for a large surface coal mine in shortgrass prairie, semiarid environment (Wyoming, USA): case study. International Journal of Coal Science and Technology. 2022;9:32. https://doi.org/10.1007/s40789-022-00502-3

5. Osintseva MA, Kryuk VA, Dyukova EA, Burova NV. Creation of artificial vegetation cover on technogenically disturbed landscapes. Ugol. 2023;(S12):56–62. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-S12-56-62; https://elibrary.ru/nkxqek

6. Dyukova EA, Ulyanova EG, Osintseva MA, Kryuk VA. Agricultural Technology for Phytophage and Phytopathogen Resistant Planting Material. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(4):807–815. (In Russ.). https:// doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2480

7. Atuchin VV, Asyakina LK, Serazetdinova YR, Frolova AS, Velichkovich NS, Prosekov AY. Microorganisms for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. Microorganisms. 2023;11(4):864. https://doi.org/10.3390/microorganisms11040864

8. Ashraf S, Ali Q, Zahir ZA, Ashraf S, Asghar HN. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019;174:714–727. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068

9. Fotina NV, Emelianenko VP, Vorob'eva EE, Burova NV, Ostapova EV. Contemporary Biological Methods of Mine Reclamation in the Kemerovo Region – Kuzbass. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):869–882. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882; https://elibrary.ru/DPWUJJ

10. Azizi M, Faz A, Zornoza R, Martinez-Martinez S, Acosta JA. Phytoremediation Potential of Native Plant Species in Mine Soils Polluted by Metal(loid)s and Rare Earth Elements. Plants. 2023;12(6):1219. https://doi.org/10.3390/plants12061219

11. Shakeel T, Shah GM, Zeb BS, Gul I, Bibi S, Hussain Z, *et al.* Phytoremediation potential and vegetation assessment of plant species growing on multi-metals contaminated coal mining site. Environmental Research Communications. 2024;6:055006. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad4320

12. Zaykova EYu, Feofanova SS. Phytoremediation potential of green spaces in the city. Vestnik MGSU. 2024;19(5): 685–712. (In Russ.). https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.5.685-712; https://elibrary.ru/CDNGFF

13. Akhtar O, Kehri HK, Zoomi I. Arbuscular mycorrhiza and *Aspergillus terreus* inoculation along with compost amendment enhance the phytoremediation of Cr-rich technosol by *Solanum lycopersicum* under field conditions. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020;201:110869. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110869

14. Marchiol L, Fellet G, Perosa D, Zerbi G. Removal of trace metals by *Sorghum bicolor* and *Helianthus annuus* in a site polluted by industrial wastes: A field experience. Plant Physiology and Biochemistry. 2007:45(5):379–387. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.03.018

15. Shah V, Daverey A. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. Environmental Technology and Innovation. 2020;18:100774. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774

16. Sanami NL, Ghorbani J, Vahabzadeh G, Hodjati S M, Motesharezadeh B. Spontaneous growth of plants enhances phytoextraction on abandoned coal mine wastes in Central Alborz coalfield, Iran. International Journal of Phytoremediation. 2024;26(13):2154–2162. https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2378217

17. Ali H, Khan E, Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. Journal of Chemistry. 2019:6730305. https://doi.org/10.1155/2019/6730305

18. Wang L, Rinklebe J, Tack FMG, Hou D. A review of green remediation strategies for heavy metal contaminated soil. Soil Use Manage. 2021;37(4):936–963. https://doi.org/10.1111/sum.12717

19. Ahmad Z, Khan SM, Page SE, Balzter H, Ullah A, Ali S, *et al.* Environmental sustainability and resilience in a polluted ecosystem via phytoremediation of heavy metals and plant physiological adaptations. Journal of Cleaner Production. 2023;385:135733. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135733

20. Osintseva MA, Dyukova EA, Burova NV, Osintsev AM. Influence of relief features and erosion processes on efficiency of biological reclamation of lands technologically changed by coal mining enterprises. Ugol. 2024(7):100–105. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-7-100-105; https://elibrary.ru/DLRJSC

21. Guidelines for assessing the level of heavy metals contamination in agricultural soils and plant products. (In Russ.). [Internet]. [cited 2024 June 30]. Available from: https://docs.cntd.ru/document/1200078918

22. Guidelines for photometric assessment of arsenic contamination in soil. (In Russ.). [Internet]. [cited 2024 June 30]. Available from: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293771/4293771887.pdf

23. Sanitary rules and regulations. Maximum permissible concentrations of heavy metals and arsenic in food raw materials and foods. (In Russ.). [Internet]. [cited 2024 June 30]. Available from: https://docs.cntd.ru/document/1200114682

24. Sanitary rules and regulations SanPiN 2.1.7.573-96. Temporary maximum permissible level of some chemical elements in feed for farm animals. (In Russ.). [Internet]. [cited 2024 June 30]. Available from: https://base.garant.ru/4174947/dd3165cca2aa805c6f0e2dc02a2ade62