



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-129>

УДК 502.3.7




### Оценка эффективности и экологичности сорбент-ориентированного метода восстановления загрязненных тяжелыми металлами и металлоидами почв

В. В. Юрак<sup>1,2</sup>   , Р. А. Апакашев<sup>1</sup>  , М. С. Лебзин<sup>1</sup>  , А. Н. Малышев<sup>1</sup>  

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

 [vera\\_yurak@mail.ru](mailto:vera_yurak@mail.ru)

#### Аннотация

Загрязнение природных экосистем тяжелыми металлами и металлоидами (НММ) – это главным образом результат антропогенной деятельности. Именно поэтому в настоящее время разрабатываются технологии, направленные на ограничение подвижности НММ и уменьшение сроков протекания химических реакций по переводу поллютантов из подвижной в неподвижную форму. Решение проблемы рекультивации всегда предполагает выбор наиболее перспективного и эффективного вида рекультивационных работ, а также обоснование приоритизации земель, подлежащих рекультивации. В части эффективности и перспективности популярность приобретает сорбент-ориентированный метод, основанный на принципе «зеленой» утилизации техногенных отходов в качестве сырья для создания композитных сорбентов нового типа в целях рекультивации нарушенных земель. Зарубежная практика в качестве обоснования необходимости и приоритизации рекультивационных работ использует различные методики оценки экологических рисков. **Цель** текущего исследования – апробировать имеющиеся распространенные методики оценки рисков причинения экологического ущерба и оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

**Задачи:** 1) рассмотреть теоретические аспекты НММ: сформулировать определение, рассмотреть генезис НММ, исследовать вопрос токсичности НММ и выявить наиболее распространенные методики оценки экологических рисков НММ; 2) апробировать имеющиеся методики оценки экологических рисков НММ; 3) оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

**Объект исследования:** горный отвод Левихинского рудника (зона экологического бедствия) как экосистема нарушенных земель, в составе которой присутствуют промышленные отвалы, содержащие НММ.

**Гипотеза исследования:** доказать возможность «зеленой утилизации» техногенных отходов в качестве сырья для композитных сорбентов, используемых для рекультивации нарушенных земель, без увеличения рисков причинения экологического ущерба природной среде. В результате проведенных экспериментов наибольшую эффективность продемонстрировали сорбенты торф/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 20/80, %), торф/диатомит/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 5/15/80, %), где суммарная эффективность превышала 89 %. У сорбента торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %) наблюдается суммарная эффективность 67,7 %. Оцениваемые риски *ER* и *EH* после применения авторских композитных сорбентов, в состав которых входят осадки водоподготовки, снижались в среднем на 89,5 и 88 % соответственно.

#### Ключевые слова

сорбенты, рекультивация, нарушенные земли, экологические риски, методики, оценка, «зеленая» утилизация, тяжелые металлы и металлоиды, биота, токсичность, экологический ущерб

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-20102, при финансовой поддержке Правительства Свердловской области.

#### Для цитирования


Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshev A.N. Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation method for heavy metal and metalloid contaminated soils. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):327–340. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-129>



## SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

## Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation method for heavy metal and metalloid contaminated soils

V. V. Yurak<sup>1,2</sup>   , R. A. Apakashev<sup>1</sup>  , M. S. Lebzin<sup>1</sup>  , A. N. Malyshev<sup>1</sup>  <sup>1</sup>Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation<sup>2</sup>Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation vera\_yurak@mail.ru

### Abstract

The contamination of natural ecosystems with heavy metals and metalloids (HMMs) primarily results from anthropogenic activities. Consequently, ongoing efforts are dedicated to the development of technologies aimed at restraining the mobility of HMMs and expediting chemical reactions that convert pollutants from mobile to immobile states. Addressing the reclamation issue always necessitates the selection of the most promising and effective type of reclamation work, as well as justification of land prioritization for reclamation purposes. In terms of performance and future potential, the sorbent-oriented approach, grounded in the concept of “green” utilization of man-made waste as a raw material for creating novel composite sorbents, is gaining traction for land reclamation in disturbed areas. In international practice, diverse environmental risk assessment methods are employed to substantiate the necessity for and prioritize reclamation efforts.

**The aim** of the present study is to evaluate established conventional methods for assessing the risks associated with environmental harm. Additionally, this research aims to assess the efficacy and ecological compatibility of the composite sorbents developed by the author. This evaluation will be conducted by assessing and comparing the levels of potential environmental risks or risks of environmental damage subsequent to the application of these sorbents.

**The objectives of this study are as follows:** 1) to explore the theoretical aspects of HMMs: including the formulation of a definition, investigation onto the origins of HMMs, examination of HMMs’ toxicity, and identification of prevalent methods for evaluating the environmental risks associated with HMMs; 2) to evaluate the effectiveness of established methods for assessing the environmental risks posed by HMMs; 3) to assess the efficacy and environmental sustainability of the composite sorbents developed by the author. This evaluation will involve an examination and comparison of the levels of potential environmental risks and the risks of environmental damage subsequent to the application of these sorbents.

**The research subject:** the mining allotment within the Levikhinskoye mine (classified as an environmental disaster site) is investigated as a disturbed land ecosystem, encompassing industrial waste dumps containing HMMs.

**The research hypothesis** aims to establish the viability of “green” waste utilization from industrial sources as a raw material for composite sorbents used in land reclamation, without escalating the environmental damage. The conducted experiments revealed that sorbents composed of peat/water treatment sludge (at a ratio of 20/80 wt. % with natural moisture content) and peat/diatomite/water treatment sludge (at a ratio of 5/15/80 wt. % with natural moisture content) exhibited the highest level of performance, surpassing an overall efficiency of 89%. A sorbent composed of peat/diatomite (at a ratio of 25/75 wt. % with natural moisture content) demonstrated an overall efficiency of 67.7%. The estimated environmental risks (*ER* and *ED*) after the application of the proprietary composite sorbents, which include water treatment sludge, exhibited an average reduction of 89.5% and 88%, respectively.

### Keywords

sorbents, reclamation, disturbed lands, environmental risks, methods, assessment, “green” disposal, heavy metals and metalloids, biota, toxicity, environmental damage

### Acknowledgments

The study was carried out at the expense of grant of the Russian Science Foundation No. 22-24-20102 with the financial support of the Government of the Sverdlovsk Region.

### For citation

Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshev A.N. Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation method for heavy metal and metalloid contaminated soils. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):327–340. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-129>



## Введение

Любая деятельность человека связана с воздействием на природную среду, которая проявляется в виде изъятия природных ресурсов, загрязнения окружающей среды и нарушения поверхности и недр Земли. С каждым годом техногенный пресс на природу возрастает: ежегодно в атмосферный воздух поступает более 30 млн т загрязняющих веществ, 19 % сточных вод сбрасывается в водные объекты без очистки. Практически во всех регионах наблюдается ухудшение состояния почв в силу водной и ветровой эрозии, переувлажнение, подтопление земель и заболачивание. Опустынивание затронуло более 100 млн га, еще 18 млн га представляют собой экологические зоны с загрязнением почв, располагающиеся вокруг промышленных комплексов. Ежегодно образуется около 4 млрд т отходов производства и потребления, при этом санкционированными объектами размещения отходов занято примерно 4 млн га земельных площадей. Накоплено более 30 млн т отходов производства и потребления, из которых к числу высокотоксичных относится более 400 тыс. т, растет число отходов, которые не вовлекаются во вторичный хозяйственный оборот. По экспертным оценкам, ежегодные потери ВВП России, обусловленные ухудшением качества окружающей среды (без учета ущерба здоровью людей), составляют от 4 до 6 %<sup>1</sup>. Немаловажную роль в ухудшении состояния экологической безопасности играет горнопромышленный комплекс России, который не относится к числу отраслей с наибольшей ущербностью промышленного производства, но оказывает воздействие на все элементы биосферы и является источником выемки и перемещения огромных масс литосферного массива. Согласно источнику [1] на единицу извлекаемого из недр твердого полезного ископаемого приходится от 1,1 до 6,7 ед. пустой породы, которая размещается на поверхности. В результате растут площади нарушенных земель, в структуре которых основной удельный вес на большинстве предприятий занимают отвалы и хвостохранилища (от 62 до 75 % земельного отвода при разработке железорудных месторождений и еще больше – на меднорудных предприятиях) [1].

По данным Федеральной службы государственной статистики к числу регионов с высоким уровнем деградации земель относятся: Уральский, Сибирский и Дальневосточный, которые формируют минерально-сырьевые центры РФ. Соответственно, в общем объеме нарушенных земель здесь преобладают нарушения, связанные с разработкой месторождений полезных ископаемых, – около 80 % [2]. Наибольшая доля нарушенных земель приходится на открытый способ разработки месторождений при том, что в России данное техническое направление остается основным. Нарушение охватывает и литосферный массив, когда происходит формирование техногенных пустот с вы-

ходом и без выхода на поверхность. В первом случае это карьерные выемки действующих и отработанных карьеров и зоны обрушения действующих и закрытых шахт, во втором – подземные техногенные пустоты. В силу того что скорость изменения окружающей среды под влиянием антропогенных воздействий гораздо выше, чем восстановление экологического равновесия, своевременно требуется ликвидация последствий освоения ресурсов недр, в т.ч. восстановление нарушенных земель и литосферного массива, что привело к появлению рекультивационных работ.

Решение проблемы рекультивации всегда предполагает выбор наиболее перспективного и эффективного вида рекультивационных работ, а также обоснование приоритизации земель, подлежащих рекультивации.

В отношении выбора перспективного и эффективного вида рекультивационных работ следует отметить, что, опираясь на данные исследований [3–5] по восстановлению нарушенных земель, выделяют два подхода к рекультивации нарушенных земель: 1) традиционный, который объединяет сложный комплекс последовательно выполняемых реконструктивно-восстановительных мероприятий (горнотехнических, мелиоративных, биологических), начиная от очистки и выравнивания рекультивируемой территории, ее землевания путем нанесения плодородного слоя почв необходимой мощности и заканчивая внесением удобрений и мелиорантов, посевом или посадкой растений; 2) инновационный, который ориентирован на приемы и способы стимулирования естественных процессов ренатурализации нарушенной природной среды, главным образом процесса почвообразования, путем физико-химического и биологического воздействия на техногенный субстрат. Согласно авторской классификации данный подход подразделяется на четыре базовых метода: водорослевой, промывки, биоремедиации и сорбент-ориентированный [6]. При этом наибольший интерес в рамках инновационного подхода вызывают биоремедиационные и сорбент-ориентированные технологии, направленные на стимулирование почвенной микрофлоры. Сравнение по критерию экономической целесообразности показало, что сорбент-ориентированный метод в сравнении с биоремедиационным – наиболее перспективен [7, 8]. Более подробное исследование сорбент-ориентированного метода показало, что на повестку дня в настоящий момент выходят композитные органоминеральные сорбенты природного происхождения в связи с их низкой стоимостью, эффективностью и наличием больших запасов, а также функциональной способностью выступать не только сорбентами, но и мелиорантами [9–11]. При этом современный научный тренд представлен «зеленой» утилизацией отходов деревообработки, сельского хозяйства, ЖКХ и других отраслей экономики в качестве составляющих новаторских композитных сорбентов-мелиорантов [12–15].

Относительно приоритизации, например, по состоянию на 2020 г. согласно заявлению заместителя главного прокурора: «Более 350 объектов накоплен-

<sup>1</sup> Проект «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года», 2017 г.; Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утв. Указом Президента РФ на 19.04.2017 № 176.



ного экологического вреда на Урале требуют рекультивации»<sup>2</sup>. Как в таком случае определить, какие объекты рекультивировать в первую очередь, а какие во вторую, и т.д. (табл. 1). В таких условиях в зарубежной практике на законодательном уровне принято использовать методики оценки рисков причинения экологического ущерба биоте [16–19].

Именно поэтому **цель** текущего исследования – апробировать имеющиеся распространенные методики оценки рисков причинения экологического ущерба и оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

Задачи: 1) рассмотреть теоретические аспекты НММ: сформулировать определение, рассмотреть генезис НММ, исследовать вопрос токсичности НММ и выявить наиболее распространенные методики оценки экологических рисков НММ; 2) апробировать имеющиеся методики оценки экологических рисков НММ; 3) оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

Объект исследования: горный отвод Левихинского рудника (зона экологического бедствия) как экосистема нарушенных земель, в составе которой присутствуют промышленные отвалы, содержащие НММ.

Гипотеза исследования: доказать возможность «зеленой утилизации» техногенных отходов в качестве сырья для композитных сорбентов, используемых для рекультивации нарушенных земель, без увеличения рисков причинения экологического ущерба природной среде.

<sup>2</sup> Более 350 объектов накопленного экологического вреда на Урале требуют рекультивации. ИТАР-ТАСС. 28 октября 2020 г. URL: [https://news.rambler.ru/ecology/45113183-bolee-350-obektov-nakoplennogo-ekologicheskogo-vreda-na-urale-trebuyut-rekultivatsii/?utm\\_source=copysaring&utm\\_medium=social](https://news.rambler.ru/ecology/45113183-bolee-350-obektov-nakoplennogo-ekologicheskogo-vreda-na-urale-trebuyut-rekultivatsii/?utm_source=copysaring&utm_medium=social)

### О сущности тяжелых металлов: понятие, генезис, токсичность, оценка экологических рисков

Термин «тяжелые металлы» на данный момент очень сложен и противоречив [21]. Его часто используют для обозначения металлов и металлоидов, являющихся поллютантами биогеоценозов, токсичных для биоты. Этот термин определяют по-разному, но обычно по критерию плотности относительно атомной массы и атомного номера. Такое разнообразие дефиниций вызвало вопросы об итоговом перечне тяжелых металлов и металлоидов, т.е. какие элементы попадают в этот список, а какие нет. Например, до сих пор ученые спорят: включать металлоид As и по сути неметалл Se в перечень тяжёлых металлов и металлоидов или нет. Присутствует даже мнение, что этот термин бессмысленный и от него необходимо отказаться [21]. Тем не менее в рамках текущего исследования предлагается использовать широкое понимание данного термина, подтвержденное многими научными работами как отечественных [22–24], так и зарубежных исследователей [25–26], где тяжелые металлы и металлоиды (НММ) выступают загрязнителями, устойчивыми к биологической и химической деградации, способными накапливаться в течение длительного времени в природной среде и проявлять свои токсичные свойства в отношении биотического разнообразия экосистем. Согласно исследованию [27, 28] наиболее распространенными НММ в природной среде принято считать медь, цинк, хром, никель, свинец, марганец, кадмий и мышьяк. Поступление НММ в окружающую среду в большей степени происходит в результате выветривания горных пород и антропогенной деятельности, при этом с последней связывают обострение экологической проблематики. Согласно вышеизложенному ключевой характеристикой НММ является их токсичность. НММ даже при относительно небольшой концентрации наносят вред почве, растениям, живым организмам и, как следствие, здоровью человека. Наиболее токсичные НММ – это хром, кадмий, свинец, цинк, медь, ртуть и мышьяк [29, 30] (табл. 2). В табл. 2 отражен общий уровень ПДК, включающий в себя как подвижные водорастворимые формы, так и неподвижные.

Таблица 1

Характеристика горных отвалов месторождений Свердловской области [20]

№	Объект	Площадь населенного пункта, км <sup>2</sup>	Площадь горного отвода, км <sup>2</sup>	Степень нарушенности	Характеристика
1	Левихинское месторождение	10,2	21	Высокая степень нарушенности	Зона экологического бедствия
2	Дегтярское месторождение	19	2,2	Высокая степень нарушенности	Зона экологического бедствия
3	Березовское месторождение	33	15,1	Средняя степень нарушенности	Территория плотной застройки
4	Буланашское месторождение	16,8	3,3	Высокая степень нарушенности	Зона опасного обрушения и подтопления территории
5	Пышминско-Ключевское месторождение	20	Нет данных	Средняя степень нарушенности	Территория плотной застройки

Табл. 2 демонстрирует, что предельно допустимые значения по НММ изменяются в разных границах, более того, не в каждой стране или объединении стран предельно допустимые концентрации приняты на законодательном уровне, это касается, например, в целом Евросоюза [28]. Тем не менее повышенные концентрации несут за собой экологические риски для здоровья человека и его качества жизни (рис. 1). В отношении последних в исследовательской практике существуют методики оценки экологических рисков от уровня загрязнения почв и грунтов НММ [16–19]. Среди самых известных выделяют две методики:

1. Методика оценки потенциального экологического риска от НММ ( $ER$ ):

$$ER = I_t \times Z = I_t \times \frac{Z_m}{Z_a}, \quad (1)$$

где  $I_t$  – уровень токсичности НММ и чувствительности к нему биоты. Данный показатель определен эмпирически и принимается в качестве константы для Cr, Ni, Cu, As, Cd, Pb, Zn и S, равен соответственно 2, 6, 5, 10, 30, 5, 5, 15;  $Z$  – коэффициент загрязнения микро-

элементом; определяется отношением измеренной концентрации элемента на исследуемом объекте ( $Z_m$ ) к фоновой ( $Z_a$ ).

Результаты расчета  $ER$  характеризуют исследуемую почву/грунт следующим образом: если  $ER < 150$ , то экологический риск от НММ признается низким; если  $150 \leq ER < 300$ , то экологический риск от НММ – средний; если  $300 \leq ER < 600$ , то экологический риск от НММ – высокий; если  $ER \geq 600$ , то экологический риск от НММ – очень высокий.

Недостатком данной методики можно считать ограничения по перечню элементов НММ в части наличия данных по показателю  $I_t$ .

2. Вторая методика направлена на определение рисков возникновения экологического ущерба ( $EH$ ):

$$EH = \frac{Z_m}{Z_l}, \quad (2)$$

где  $Z_m$  – как и в первой формуле, это измеренная концентрация элемента на исследуемом объекте;  $Z_l$  – в отличие от  $Z_a$ , это предельно допустимая концентрация элемента, установленная действующим законодательством.

Таблица 2

**Токсичность НММ: общий уровень ПДК, включающий в себя подвижные водорастворимые и неподвижные формы**

Страна/организация	Категория земель/тип почв, ед. изм.	Cr (VI)	Cd	Pb	Zn	Cu	Hg	As	S
ООН [31]	Земли сельхозназначения, ppm	0,1	0,003	0,1	н/д	н/д	0,08	н/д	н/д
Китай [31]	Земли сельхозназначения, ppm	150–300	0,3–0,6	80	н/д	н/д	0,3–1,0	н/д	н/д
США <sup>1</sup>	Земли сельхозназначения, ppm	11	0,43	200	н/д	н/д	1,0	н/д	н/д
Италия <sup>2</sup>	Земли населенных пунктов, мг/кг	2	2	100	150	120	1	20	н/д
	Земли промышленности, мг/кг	15	15	1000	1500	600	5	50	н/д
Финляндия <sup>3</sup> [32]	Пороговое значение, мг/кг	100	1	60	60	100	0,5	5	н/д
	Минимальное значение, мг/кг	200	10	200	200	150	2	50	н/д
	Максимальное значение, мг/кг	300	20	750	400	250	5	100	н/д
Канада <sup>4</sup>	Земли сельхозназначения, мг/кг	250	3	200	н/д	н/д	0,8	н/д	н/д
Германия [33, 34]	Земли сельхозназначения, мг/кг	500	5	1000	10–300	2–100	5	1–50	н/д
Испания <sup>5</sup>	Кислые почвы, мг/кг	100	1	50	150	1.000	1	5	н/д
	Щелочные почвы, мг/кг	150	3	300	450	1700	1,5	55	н/д
Российская Федерация <sup>6</sup>	Песчаные и супесчаные, мг/кг	0,05	0,5	32,0	55,0	33,0	2,1	2,0	н/д
	Кислые (суглинистые и глинистые), рН <sub>KCl</sub> < 5,5, мг/кг	0,05	1,0	65,0	110,0	66,0	2,1	5,0	н/д
	Близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые) рН <sub>KCl</sub> > 5,5, мг/кг	0,05	2,0	130,0	220,0	132,0	2,1	10,0	160

Примечание: «н/д» – нет данных.

Источник: таблица составлена авторами с использованием [28].

<sup>1</sup> New York state brownfield cleanup program. Development of soil cleanup objectives. Technical support document. Albany, NY, USA: New York State Department of Environmental Conservation and New York State Department of Health; 2006.

<sup>2</sup> Decreto Legislativo n. 152 del 3 aprile 2006 “Norme in materia ambientale”, Supplemento Ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 88 del 14 aprile 2006. URL: <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/06152dl.htm>

<sup>3</sup> Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs 214/2007, 1 March 2007; Ministry of Environment: Helsinki, Finland, 2007 (the legally binding document is in Finnish or Swedish)

<sup>4</sup> Soil, Ground Water and Sediment Standards for Use under Part XV.1 of the Environmental Protection Act. Toronto, ON, Canada: Canadian Ministry of the Environment (CME); 15 April 2011.

<sup>5</sup> Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. URL: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1990-26490>

<sup>6</sup> СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».



Результаты расчета показателя риска возникновения экологического ущерба ( $EH$ ) демонстрируют малую вероятность наступления негативных последствий, если  $EH < 1$ . И, наоборот, если  $EH > 1$ , то вероятность наступления неблагоприятных событий и возникновения экологического ущерба высока, а значит, почва/грунт должны быть восстановлены и рекультивированы.

Таким образом, как при первой методике определения потенциального экологического риска от НММ, так и при второй – определение рисков возникновения экологического ущерба, в случае высоких значений итоговых показателей почва/грунт подлежат восстановительным работам.

### Материалы исследования

В исследовании использовали:

1. Композитный сорбент торф/осадки водоподготовки в соотношении 20/80 по массе естественной влажности. Оптимальный состав был обоснован мно-

жественными экспериментами и построением изотерм адсорбции [35].

2. Композитный сорбент торф/диатомит/осадки водоподготовки. Композитный сорбент торф/диатомит/осадки водоподготовки в соотношении 5/15/80 по массе естественной влажности.

3. Композитный сорбент торф/диатомит. Композитный сорбент торф /диатомит в соотношении 25/75 по массе естественной влажности.

Торф верховой нейтрализованный, фракционированный (фракция 0–10). Влажность торфа от 50 до 60 %, водородный показатель водной вытяжки (рН) в пределах 5,5–6,0, зольность – менее 5 %. Основные неорганические соединения торфа: азот до 1,5 % (масс.), фосфор, калий, кальций (в сумме) до 0,6 %. Содержание гуминовых веществ – 7,4–7,9 %.

Диатомит Камышловского месторождения. Данный материал используется для создания силикатных вяжущих наполнителей, содержащих кремний, активированных сорбентов, строительных и огнеупор-

#### Хром

Устойчивые формы, токсичные для человека: Cr(III) и Cr(VI). Cr(VI) наиболее опасен, так как легче проникает в тело человека при дыхании, приеме внутрь и тактильно – через кожу. Органы человека, которые подвергаются негативному воздействию – это печень, почки, селезенка и костный скелет. Болезни и проявления, которые вызывает данный тяжелый металл: язвы, дерматиты, перфорация носовой перегородки, рак органов дыхания. При попадании в педосферу хром способен изменять структуру микробных сообществ и замедлять их рост.

#### Медь

Медь участвует во многих биологических процессах: окисление, фотосинтез, метаболизм углеводов, белков и клеточных стенок и др. Высокие концентрации меди способствуют повреждению органов человека на клеточном уровне. Болезни и проявления, которые вызывает данный тяжелый металл: тошнота, рвота, боль в животе; при длительном воздействии повреждает печень и почки. Во флоре медь накапливается в корнях, снижая их рост и способность поглощать другие микроэлементы, полезные для развития растений.

#### Цинк

Этот элемент играет важную роль в метаболизме нуклеиновых кислот и белков, в росте, делении и функционировании клеток. Высокая концентрация цинка может вызвать рвоту, мышечные судороги и повреждение почек. У растений высокая – приводит к замедлению роста и развития растения, хлорозу, изменению процессов метаболизма и др.

#### Кадмий

Кадмий препятствует пролиферации клеток, дифференцировке, апоптозу и механизму восстановления ДНК. Болезни и проявления, которые вызывает данный тяжелый металл: деминерализация скелета, проблемы с почками и печенью. Избыточное накопление в растениях может влиять как на фотосинтез, так и на дыхание, транспорт и усвоение элементов минерального питания, влияя на рост и развитие растений.

#### Свинец

Этот микроэлемент быстро всасывается в кровоток, повреждая различные системы, например, нервную и лимфатическую, а также влияет на функции почек и развитие организма.

#### Ртуть

Может откладываться во многих частях человеческого тела, повреждая мозг, щитовидную железу, грудную мышцу, миокард, мышцы, печень, почки, кожу и поджелудочную железу. Наибольшему повреждению подвержена нервная система.

#### Мышьяк

Этот металлоид вызывает кожные поражения; рак легких, мочевого пузыря, печени и почек; ишемическую болезнь сердца, нарушение когнитивных способностей, двигательных функций и гормональной регуляции.

#### Сера

При воздействии серы происходит раздражение слизистой оболочки глаз, слезотечение, затруднение дыхания, тошнота, рвота, головные боли. Повышенная утомляемость, ослабление мышечной силы, снижение памяти. Замедление восприятия, ослабление функциональной способности сердца, изменение бактерицидности кожи.

Рис. 1. Токсичное воздействие НММ на биоту



ных материалов, для модификации агрохимических свойств почв и т.п.

Осадки водоподготовки Западной фильтрационной станции г. Екатеринбурга. По результатам проведенного рентгенофазового анализа основную массу осадка (более 70 %) составляет рентгеноаморфная органика. Химический состав осадка характеризуется наличием кремния, алюминия, железа. Гранулометрический состав осадка полидисперсен. Методом мокрого ситового анализа установлено, что в нем преобладают частицы размером менее 50 мкм (21 %) и частицы, размер которых больше 100 мкм (18 %);

Техногенный грунт отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений (п. Левиха, Свердловской области). Грунт представляет собой рыхлый терригенный материал, сложенный неокатанными зернами в верхней части отвалов преимущественно псаммитовой и псефитовой фракциями (песок и щебень), а в нижней части – псефитовой (глыбы). Количество пелитовой фракции обычно не превышает 5–10 %. Сложены отходы фрагментами и обломками кварц-серицитовыми и кварц-хлоритовыми сланцами, колчеданной руды, лимонитом, халцедоном, кварцем с прожилками и вкрапленниками сульфидов.

### Методы и алгоритм проведения исследования

Пробы, отобранные на отвалах пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений (п. Левиха, Свердловской области), тщательно перемешивались в единой емкости. Перемешанная масса породы не подвергалась измельчению для воспроизводства естественных условий техногенных территорий. Фракционный состав минеральной породы – от 12 см до 1,5 мм.

Масса породы, взятая с помощью напольных весов, засыпанная в каждую емкость, составила – 500 г ( $\pm 5$  г). Высота породы в емкостях составила 2 см. Емкость прямоугольного сечения объемом 880 см<sup>3</sup> для эксперимента была поделена на две части пластмассовой перегородкой. В первую часть емкости сначала размещали породу и сверху засыпали сорбенты (каждый сорбент в разные емкости):

1. Торф/осадки водоподготовки (пропорции по мас. естественной влажности, % – 20/80) – Т/ОВ (20/80);

2. Торф/диатомит/осадки водоподготовки. Композитный сорбент торф/диатомит/осадки водоподготовки в соотношении 5/15/80 в процентах по массе естественной влажности. Масса навески каждого сорбента составила – 50 г ( $\pm 0,5$  г). Высота сорбента варьировалась от 0,4 до 0,6 см в зависимости от вида сорбента и рыхлости минерального грунта – Т/Д/ОВ (5/15/80).

3. Торф/диатомит. Композитный сорбент торф/диатомит в соотношении 25/75 пропорции по мас. естественной влажности – Т/Д (25/75).

Масса навески каждого сорбента составила – 50 г ( $\pm 0,5$  г). Высота сорбента варьировалась от 0,4 до 0,6 см в зависимости от вида сорбента и рыхлости грунта (породы).

В первую часть емкости с засыпанными породой и сорбентами равномерно приливали 500 мл дис-

тиллированной воды в каждую с целью создания обводненных условий в емкости для свободной миграции ионов НММ в растворе «сорбент – порода», который перетекал во вторую часть емкости. Циркуляция раствора «сорбент – порода» между двумя частями в емкости происходила всё время эксперимента, но порода (грунт) и сорбент не попадали во вторую часть.

Емкости закрывали для снижения погрешности, попадания различной пыли и уменьшения испаряемости раствора из емкости.

Исследуемый раствор выдерживался не менее 24 ч при комнатной температуре.

Далее растворы «сорбент – порода» фильтровали через бумажный фильтр средней плотности для исследования количественного и качественного химического состава растворов.

В целях исследования количественного химического состава техногенного грунта и авторских сорбентов, определения степени адсорбции ионов тяжёлых металлов был использован метод атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектрометрии. Соответствующие анализы проводили с помощью атомно-эмиссионного спектрометра параллельного действия с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9820 производства Shimadzu (Япония) и спектрометра атомно-абсорбционного с пламенной атомизацией «Квант-2». Эксперименты проводились согласно ГОСТ ISO 22036–2014 Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектрометрии индуктивно связанной плазмы (ИСП-АЭС) и ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.78-2013 «Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-адсорбционной спектрометрии».

## Результаты

### Оценка ER и EH техногенного грунта

Проведены лабораторные анализы проб с отвалов пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений [36]. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Результаты исследований<sup>3</sup> показали, что максимальные концентрации S, Cu, Zn в пробах относятся к опасной категории загрязнения почв согласно методике, представленной авторами исследования. Главный потенциальный источник загрязнения – сера, в меньшей степени медь и цинк.

Для определения начальной концентрации водорастворимых ионов НММ в техногенном грунте отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений был проведен однотипный эксперимент, но без композитного сорбента. В результате в техногенном грунте (породе) были выявлены ионы НММ, представленные в табл. 4.

<sup>3</sup> СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Оценка рисков по формулам (1) и (2) приведена в табл. 5.

Показатель *ER* по всем трем НММ выше 300, то есть по цинку и сере риск характеризуется как высокий, а по показателю меди – как очень высокий. Противоречиво выглядят результаты по показателю *EH*, где показатель риска возникновения экологического ущерба по всем трем НММ ниже 1, то есть вероятность наступления негативных последствий признается низкой, это объясняется фактом усредненности пробы и длительным воздействием поверхностных осадков на территории экологического бедствия, именно поэтому концентрации в поверхностном слое грунта незначительны в отношении ПДК, но чрезмерны в сравнении с фоновыми значениями. Средняя арифметическая показателей уровня риска также в отношении *ER* демонстрирует высокое значение, в отношении *EH* – низкое.

#### Анализ содержания НММ в техногенном грунте после применения авторских сорбентов

Данные табл. 4 концентрации ионов НММ в пробах техногенного грунта отвалов пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений

(п. Левиха, Свердловской области) визуально отражены на рис. 2.

В результате исследований с использованием авторских сорбентов концентрации НММ в техногенном грунте уменьшились. На рис. 3 представлены результаты исследований степени извлечения водорастворимых ионов Cu (а), Zn (б), S (в) сорбентами.

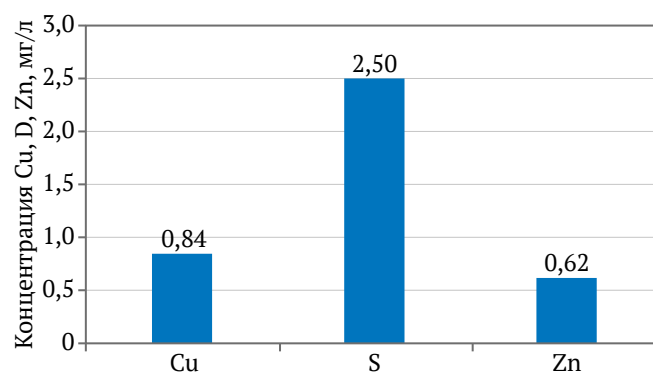


Рис. 2. Концентрация НММ в техногенном грунте отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений

Таблица 3

#### Концентрация (общая) ионов НММ в отвалах пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений

Компонент	Содержание, масс. % min/max	Содержание в сульфидных песках, масс. %	Норма ПДК и ОДК*, масс. %	Коэффициент концентрации min/max	Коэффициент концентрации в сульфидных песках min/max
S	0,026/1,370	32,6	0,016	1,6/85,6	2037,5
Cu	0,005/0,1	0,16	0,0132	0,4/7,6	11,9
Zn	0,0097/0,0353	0,015	0,022	0,4/1,6	0,7

Примечание: \* для группы почв близких к нейтральным и нейтральных (суглинистые и глинистые),  $pH_{KCl} > 5,5$ .

Таблица 4

#### Концентрация водорастворимых ионов НММ (подвижная форма) в техногенном грунте отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений и контрольной пробе

Проба	Cu, мг/л	Zn, мг/л	S, мг/л
Усредненная проба с отвалов (12 точек отбора)	0,84427	0,61632	2,50000
Контрольная проба (фоновое загрязнение)	0,00500	0,00970	0,08900

Таблица 5

#### Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (*ER*) и рисков возникновения экологического ущерба (*EH*) исходя из содержания НММ в техногенном грунте

НММ	Концентрация, мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК <sup>1</sup> (подвижная форма, кислые почвы, по сере – нейтральные), мг/кг	Концентрация, мг/кг	<i>ER</i>	<i>EH</i>
Cu	0,84427	5,00000	0,00500	3,00000	1,68854	844,27000	0,56285
Zn	0,61632	5,00000	0,00970	23,00000	1,23264	317,69072	0,05359
S	2,50000	15,00000	0,08900	160,00000	5,00000	421,34831	0,03125
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						527,76968	0,21590

<sup>1</sup> СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».



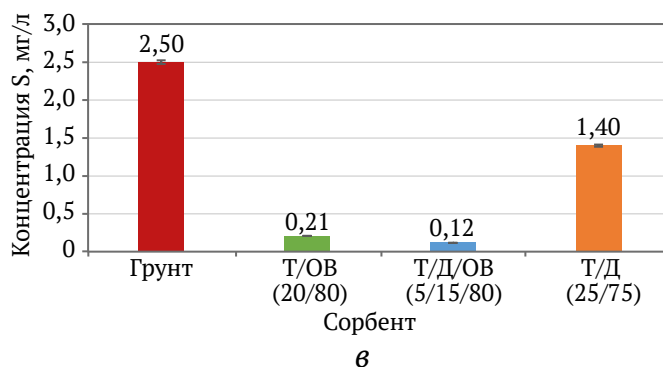
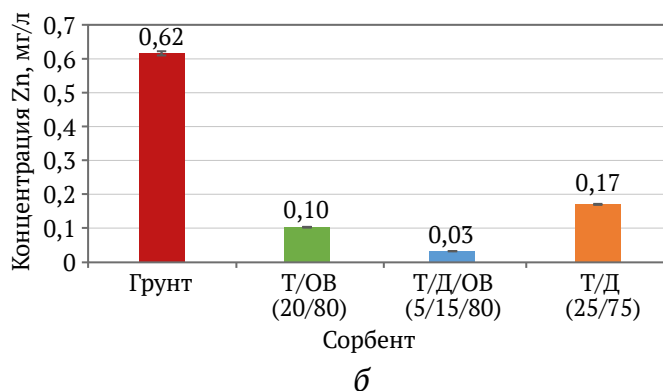
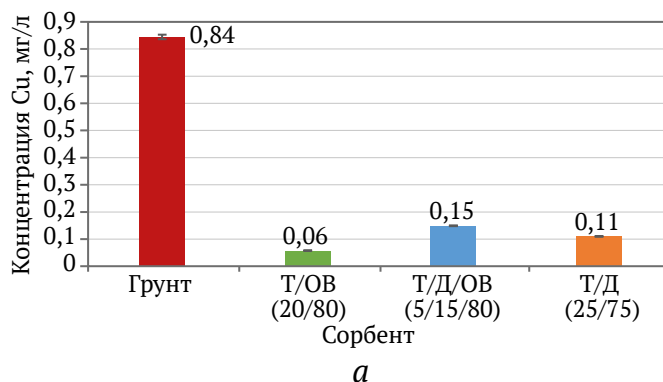
Из рис. 3 следует, что в отношении связывания ионов Cu, Zn, S сорбенты проявляют эффективность, близкую к максимальной, за исключением сорбента торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %) по отношению к ионам S, где проявляется средняя эффективность адсорбции.

Исследования показали, что адсорбция ионов Cu проходит эффективнее, если содержание торфа в сорбенте превышает 20 % (пропорция при естественной влажности). Осадки водоподготовки значительно увеличивают адсорбцию Zn и S. Не удалось оценить влияние количественного содержания на эффективность адсорбции осадков водоподготовки, так как в эксперименте представлено только одно содержание данного техногенного компонента (пропорция при естественной влажности 80 %). Увеличение массы диатомита в составе композиционного сорбента ухудшает адсорбцию Zn и S.

Наибольшую эффективность продемонстрировали сорбенты торф/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 20/80, %), торф/диатомит/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 5/15/80, %), где суммарная эффективность превышала 89 %. Сорбент торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %) продемонстрировал суммарную эффективность на уровне 67,7 %.

Так, после применения авторских сорбентов были получены следующие результаты, табл. 6–8.

После использования авторских сорбентов показатель *ЕН* еще более снизился. Максимальную эффективность по минимизации рисков возникновения экологического ущерба проявил сорбент Т/ОВ (20/80). Аналогично и в отношении среднего значения показателя потенциальных экологических рисков от НММ (*ЕР*), сорбент Т/ОВ был наиболее интересен в применении. Тем не менее по показателю *ЕР* при селективной сорбции в отношении цинка и серы сорбент Т/Д/ОВ (5/15/80) продемонстрировал максимальную эффективность. Сорбент Т/Д (25/75) показал наихудшие результаты. Полученные расчетные данные доказывают гипотезу о возможности и, более того, эффективности «зеленой утилизации» техногенных отходов для целей рекультивации нарушенных земель, так как все сорбенты, в состав которых входили осадки водоподготовки селективно или комплексно, продемонстрировали максимальные показатели сорбции (табл. 9).



**Рис. 3.** Степень извлечения ионов Cu, Zn, S сорбентами: торф/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 20/80, %), торф/диатомит/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 5/15/80, %) и торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %): а – степень извлечения ионов Cu; б – степень извлечения ионов Zn; в – степень извлечения ионов S

Таблица 6

Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (*ЕР*) и рисков возникновения экологического ущерба (*ЕН*) исходя из содержания НММ в техногенном грунте после использования сорбента Т/ОВ (20/80)

НММ	Концентрация после сорбента Т/ОВ (20/80), мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК (подвижная форма, кислые почвы), мг/кг	Концентрация после сорбента Т/ОВ (20/80), мг/кг	<i>ЕР</i>	<i>ЕН</i>
Cu	0,06000	5,00000	0,00500	3,00000	0,12000	60,00000	0,04000
Zn	0,10000	5,00000	0,00970	23,00000	0,20000	51,54639	0,00870
S	0,21000	15,00000	0,08900	160,00000	0,42000	35,39326	0,00263
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						48,97988	0,01711



Таблица 7

Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (*ER*) и рисков возникновения экологического ущерба (*EH*) исходя из содержания НММ в техногенном грунте после использования сорбента Т/Д/ОВ (5/15/80)

НММ	Концентрация после сорбента Т/Д/ОВ (5/15/80), мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК (подвижная форма, кислые почвы), мг/кг	Концентрация после сорбента Т/Д/ОВ (5/15/80), мг/кг	<i>ER</i>	<i>EH</i>
Cu	0,15000	5,00000	0,00500	3,00000	0,30000	150,00000	0,10000
Zn	0,03000	5,00000	0,00970	23,00000	0,06000	15,46392	0,00261
S	0,12000	15,00000	0,08900	160,00000	0,24000	20,22472	0,00150
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						61,89621	0,03470

Таблица 8

Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (*ER*) и рисков возникновения экологического ущерба (*EH*) исходя из содержания НММ в техногенном грунте после использования сорбента Т/Д (25/75)

НММ	Концентрация после сорбента Т/Д (25/75), мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК (подвижная форма, кислые почвы), мг/кг	Концентрация после сорбента Т/Д (25/75), мг/кг	<i>ER</i>	<i>EH</i>
Cu	0,11000	5,00000	0,00500	3,00000	0,22000	110,00000	0,07333
Zn	0,17000	5,00000	0,00970	23,00000	0,34000	87,62887	0,01478
S	1,40000	15,00000	0,08900	160,00000	2,80000	235,95506	0,01750
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						144,52797	0,03521

Таблица 9

Оценка изменений установленных уровней рисков после использования авторских сорбентов

Риск	Среднее по НММ в техногенном грунте	Среднее по НММ после сорбента Т/ОВ (20/80)		Среднее по НММ после Т/Д/ОВ (5/15/80)		Среднее по НММ после Т/Д (25/75)		Средние по показателям изменений после сорбентов с ОВ, %
		Фактические показатели	Изменения от среднего значения по НММ в техногенном грунте	Фактические показатели	Изменения от среднего значения по НММ в техногенном грунте	Фактические показатели	Изменения от среднего значения по НММ в техногенном грунте	
<i>ER</i>	527,76968	48,97988	90,72	61,89621	88,27	144,52797	72,62	89,50
<i>EH</i>	0,21590	0,01711	92,08	0,03470	83,93	0,03521	83,69	88,00

### Выводы

Таким образом, цель текущего исследования была достигнута, а именно: были апробированы имеющиеся распространенные методики оценки рисков причинения экологического ущерба и была произведена оценка эффективности и «экологичности» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов)

применения. Оцениваемые риски *ER* и *EH* после применения авторских композитных сорбентов, в состав которых входят осадки водоподготовки, снижались в среднем на 89,5 и 88 % соответственно. Так была доказана гипотеза исследования о возможности «зеленой утилизации» техногенных отходов в качестве сырья для композитных сорбентов, используемых для рекультивации нарушенных земель, без увеличения рисков причинения экологического ущерба природной среде.

### Список литературы

1. Чаплыгин Н.Н., Галченко Ю.П., Папичев В.И. и др. *Экологические проблемы геотехнологий: новые идеи, методы и решения*. М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат». 2009. 320 с.
2. Наумов И.В. Исследование пространственных диспропорций в процессах нарушения и рекультивации земельных ресурсов в России. *Известия УГТУ*. 2019;(4):142–151. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-4-143-152>
3. Chiampo F., Zacchini M. Environmental restoration of metal-contaminated soils. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10805. <https://doi.org/10.3390/app112210805>
4. Ворончихина Е.А. *Рекультивация нарушенных ландшафтов: теория, технологии, региональные аспекты*: монография. Пермь; 2010. 165 с.



5. Zhu J., Wang P., Lei M.-J., Zhang W.-L. Polyhydroxyl-aluminum pillaring improved adsorption capacities of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> onto diatomite. *Journal of Central South University*. 2014;21:2359–2365. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2188-9>
6. Юрак В.В., Усманов А.И. Подходы к восстановлению нарушенных горно-металлургическим комплексом земель. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023. В печати.
7. Mishra M., Mohan D. Bioremediation of contaminated soils: an overview. In: Rakshit A., Abhilash P., Singh H., Ghosh S. (eds) *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer, Singapore; 2017. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_16)
8. Singh A., Prasad S.M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015;12:353–366. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0542-y>
9. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of post-mining disturbed land: review of content and comparative law and feasibility study. *Resources*. 2020;9(6):73. <https://doi.org/10.3390/resources9060073>
10. Ермаков А.С., Ермакова А.Я. Восстановление нарушенного почвенного покрова отрицательно-го воздействия от промышленных предприятий. *Научный вестник МГТУ*. 2014;(1):24–29.
11. Marques J.P., Rodrigues V.G.S., Raimondi I.M., Lima J.Z. Increase in Pb and Cd Adsorption by the application of peat in a tropical soil. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231:136. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04507-z>
12. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Особенности оценки экономической безопасности предприятий торфодобывающей отрасли тверского региона России (обзор отрасли). *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):5–15. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>
13. Игнатъева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике. *Горные науки и технологии*. 2021; 6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>
14. Апакашев Р.А., Малышев А.Н., Лебзин М.С. Исследование физико-химических свойств осадков водоподготовки для «зеленой» почвенной утилизации. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2022;(3):117–124.
15. Букин А.В., Моторин А.С., Игловиков А.В. Создание рекультивационной смеси на основе осадка водоподготовки няганьской грэс и торфа. *Агротехнологическая политика России*. 2016;(12):70–75.
16. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 1980;14(8):975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
17. Baran A., Wiczorek J., Mazurek R. et al. Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40:435–450. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9924-7>
18. Wu Q., Leung J.Y.S., Geng X. et al. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of the Total Environment*. 2015;506–507:217–225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
19. Pan X.-D., Wu P.-G., Jiang X.-G. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China. *Scientific Reports*. 2016;6:20317. <https://doi.org/10.1038/srep20317>
20. Старицына И.А., Беличев А.А. Анализ использования нарушенных земель Свердловской области. *Аграрный вестник Урала*. 2018;4:31–36.
21. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ – Proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2018;100:6–19. <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>
22. Селезнев А.А., Климшин А.В. Тяжелые металлы в грунтах на территории г. Екатеринбурга. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(1):96–104. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-1-96-104>
23. Семенов А.И., Кокшаров А.В., Погодин Ю.И. Содержание тяжелых металлов в почве г. Челябинска. *Медицина труда и экология человека*. 2015;(3):184–191.
24. Писарева А.В., Белопухов С.Л., Савич В.И. и др. Миграция тяжелых металлов от очага загрязнения в зависимости от взаимосвязей в ландшафте. *Вестник технологического университета*. 2017;20(6):160–163.
25. Bou Kheir R., Greve M., Greve M. et al. Comparative GIS tree-pollution analysis between arsenic, chromium, mercury, and uranium contents in soils of urban and industrial regions in Qatar. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019;4:10. <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0099-8>
26. Mikkonen H.G., Dasika G., Drake J.A. et al. Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloid concentration in soil. *Science of the Total Environment*. 2018;624:599–610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.131>
27. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019;2019:6730305 <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>



28. Raffa C.M., Chiampo F., Shanthakumar S. Remediation of metal/metalloid-polluted soils: a short review. *Applied Sciences*. 2021;11:4134. <https://doi.org/10.3390/app11094134>
29. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Network*. 2011;2011:402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
30. Dutta S., Mitra M., Agarwal P. et al. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant Signaling & Behavior*. 2018;13(8):e1460048 <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1460048>
31. Kinuthia G.K., Ngure V., Beti D. et al. Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya: Community health implication. *Scientific Reports*. 2020;10:8434. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65359-5>
32. Carlon C. (Ed.) *Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization*. Ispra: European Commission, Joint Research Centre; 2007. 306 p.
33. He Z., Shentu J., Yang X. et al. Heavy Metal Contamination of Soil: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*. 2015;9:17–18.
34. Касьяненко А.А. *Контроль качества окружающей среды*. М.: Российский университет дружбы народов; 1992. 136 с.
35. Апакашев Р.А., Лебзин М.С., Юрак В.В., Малышев А.Н. Гибридные сорбенты – мелиоранты для рекультивации загрязненных мышьяком почв. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11–1):18–28. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_111\\_0\\_18](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_18)
36. Fedorov S., Zavyalov S., Yurak V. Ore minerals in technogenic wastes of the levikhinsky mine (Middle Urals) In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022*. 2022;988(2):032088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032088>

## References

1. Chaplygin N.N., Galchenko Yu.P., Papichev V.I. et al. *Environmental Problems of Geotechnologies: New concepts, methods and solutions*. Moscow: Nauchtechlitzdat Publishing House LLC; 2009. 320 p. (In Russ.)
2. Naumov I.V. The study of spatial imbalances in the processes of disruption and land reclamation in Russia. *News of the Ural State Mining University*. 2019;(4):142–151. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-4-143-152> (In Russ.)
3. Chiampo F., Zacchini M. Environmental restoration of metal-contaminated soils. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10805. <https://doi.org/10.3390/app112210805>
4. Voronchikhina E.A. *Reclamation of disturbed landscapes: theory, technologies, regional aspects: monograph*. Perm; 2010. 165 p. (In Russ.)
5. Zhu J., Wang P., Lei M.-J., Zhang W.-L. Polyhydroxyl-aluminum pillaring improved adsorption capacities of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> onto diatomite. *Journal of Central South University*. 2014;21:2359–2365. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2188-9>
6. Yurak V.V., Usmanov A.I. Approaches to the restoration of lands disturbed by the mining and metallurgical complex. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. In print.
7. Mishra M., Mohan D. Bioremediation of contaminated soils: an overview. In: Rakshit A., Abhilash P., Singh H., Ghosh S. (eds) *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer, Singapore; 2017. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_16)
8. Singh A., Prasad S.M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015;12:353–366. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0542-y>
9. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of post-mining disturbed land: review of content and comparative law and feasibility study. *Resources*. 2020;9(6):73. <https://doi.org/10.3390/resources9060073>
10. Ermakov A.S., Ermakova A.Ya. Restoration of soil cover disturbed due to adverse impact from industrial enterprises. *Nauchnyy Vestnik MGGU*. 2014;(1):24–29. (In Russ.)
11. Marques J.P., Rodrigues V.G.S., Raimondi I.M., Lima J.Z. Increase in Pb and Cd Adsorption by the application of peat in a tropical soil. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231:136. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04507-z>
12. Yakonovskaya T.B., Zhigul'skaya A.I. Features of evaluating the economic security of peat industry enterprises in the Tver Region of Russia (the industry review). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):5–15. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>
13. Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>



14. Apakashev R.A., Malyshev A.N., Lebzin M.S. Study of the physicochemical properties of water treatment residuals for “green” soil utilization. *News of the Ural State Mining University*. 2022;(3):117–124. (In Russ.)
15. Bukin A.V., Motorin A.S., Iglovikov A.V. Creation of a reclamation mixture based on water treatment sludge (from the Nyagan State District Power Plant) and peat. *Agroproduvol'stvennaya politika Rossii*. 2016;(12):70–75. (In Russ.)
16. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 1980;14(8):975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
17. Baran A., Wiczorek J., Mazurek R. et al. Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40:435–450. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9924-7>
18. Wu Q., Leung J.Y.S., Geng X. et al. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of the Total Environment*. 2015;506–507:217–225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
19. Pan X.-D., Wu P.-G., Jiang X.-G. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China. *Scientific Reports*. 2016;6:20317. <https://doi.org/10.1038/srep20317>
20. Staritsyn I.A., Belichev A.A. Analysis of the Sverdlovsk region' disturbed lands use. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2018;4:31–36. (In Russ.)
21. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ – Proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2018;100:6–19. <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>
22. Seleznev A.A., Klimshin A.V. Heavy metals in urban grounds in Ekaterinburg (Russia). *News of the Ural State Mining University*. 2020;(1):96–104. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-1-96-104>
23. Semyenov A.I., Koksharov A.V., Pogodin Yu.I. The content of heavy metals in Chelyabinsk soils. *Occupational Medicine and Human Ecology*. 2015;(3):184–191.
24. Pisareva A.V., Belopukhov S.L., Savich V.I. et al. Migration of heavy metals from the source of pollution depending on the interconnections in a landscape. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2017;20(6):160–163. (In Russ.)
25. Bou Kheir R., Greve M., Greve M. et al. Comparative GIS tree–pollution analysis between arsenic, chromium, mercury, and uranium contents in soils of urban and industrial regions in Qatar. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019;4:10. <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0099-8>
26. Mikkonen H.G., Dasika G., Drake J.A. et al. Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloid concentration in soil. *Science of the Total Environment*. 2018;624:599–610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.131>
27. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019;2019:6730305 <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
28. Raffa C.M., Chiampo F., Shanthakumar S. Remediation of metal/metalloid-polluted soils: a short review. *Applied Sciences*. 2021;11:4134. <https://doi.org/10.3390/app11094134>
29. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Network*. 2011;2011:402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
30. Dutta S., Mitra M., Agarwal P. et al. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant Signaling & Behavior*. 2018;13(8):e1460048 <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1460048>
31. Kinuthia G.K., Ngure V., Beti D. et al. Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya: Community health implication. *Scientific Reports*. 2020;10:8434. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65359-5>
32. Carlon C. (Ed.) *Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization*. Ispra: European Commission, Joint Research Centre; 2007. 306 p.
33. He Z., Shentu J., Yang X. et al. Heavy Metal Contamination of Soil: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*. 2015;9:17–18.
34. Kasyanenko A.A. *Environmental quality control*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia; 1992. 136 p. (In Russ.)
35. Apakashev R.A., Lebzin M.S., Yurak V.V., Malyshev A.N. Hybrid sorbents – meliorants for recultivation of arsenic-contaminated soils. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11–1):18–28. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_111\\_0\\_18](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_18)
36. Fedorov S., Zavyalov S., Yurak V. Ore minerals in technogenic wastes of the levikhinsky mine (Middle Urals) In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference “Earth Science”, ISTC EarthScience 2022*. 2022;988(2):032088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032088>



### Информация об авторах

**Вера Васильевна Юрак** – доктор экономических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента, заведующая научно-исследовательской лабораторией рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://scopus.com/authorid/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail [vera\\_yurak@mail.ru](mailto:vera_yurak@mail.ru)

**Рафаил Абдрахманович Апакашев** – доктор химических наук, профессор, проректор по научной работе, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9006-3667](https://orcid.org/0000-0002-9006-3667), Scopus ID [6603092433](https://scopus.com/authorid/6603092433); e-mail [Apakashev.R@m.ursmu.ru](mailto:Apakashev.R@m.ursmu.ru)

**Максим Сергеевич Лебзин** – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5959-135X](https://orcid.org/0000-0001-5959-135X), Scopus ID [57218647741](https://scopus.com/authorid/57218647741); e-mail [science@ursmu.ru](mailto:science@ursmu.ru)

**Александр Николаевич Мальшев** – лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3104-1687](https://orcid.org/0000-0002-3104-1687), Scopus ID [57223099993](https://scopus.com/authorid/57223099993); e-mail [malyshev.k1b@gmail.com](mailto:malyshev.k1b@gmail.com)

### Information about the authors

**Vera V. Yurak** – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Management, Head of the Research Laboratory for Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; Senior Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://scopus.com/authorid/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail [vera\\_yurak@mail.ru](mailto:vera_yurak@mail.ru)

**Rafail A. Apakashev** – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Vice-Rector for Research, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9006-3667](https://orcid.org/0000-0002-9006-3667), Scopus ID [6603092433](https://scopus.com/authorid/6603092433); e-mail [Apakashev.R@m.ursmu.ru](mailto:Apakashev.R@m.ursmu.ru)

**Maxim S. Lebzin** – Junior Researcher, Research Laboratory for the Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5959-135X](https://orcid.org/0000-0001-5959-135X), Scopus ID [57218647741](https://scopus.com/authorid/57218647741); e-mail [science@ursmu.ru](mailto:science@ursmu.ru)

**Alexander N. Malyshev** – Research Assistant, Research Laboratory for the Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3104-1687](https://orcid.org/0000-0002-3104-1687), Scopus ID [57223099993](https://scopus.com/authorid/57223099993); e-mail [malyshev.k1b@gmail.com](mailto:malyshev.k1b@gmail.com)

Поступила в редакцию 07.07.2023  
Поступила после рецензирования 28.07.2023  
Принята к публикации 15.09.2023

Received 07.07.2023  
Revised 28.07.2023  
Accepted 15.09.2023