



# Эколого-экономические аспекты выбора направлений реабилитации территорий размещения промышленных отходов горно-металлургического комплекса

Н.Ю. Антонинова✉, Л.С. Рыбникова, Ю.О. Славиковская, Л.А. Шубина

Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉natal78@list.ru

**Резюме:** Антропогенная геоэкология получила свое развитие в конце XX в., но по-прежнему испытывает трудности в комплексном методическом подходе оценки загрязнений территорий с многолетними последствиями добычи природных ресурсов. Последствия добычи и первичного обогащения природного сырья заключаются в отсутствии эффективного контроля территорий после завершения добычи руд. Для разработки эффективных приемов купирования развития опасных природно-техногенных процессов на территориях размещения недействующих объектов размещения отходов необходимо анализировать достаточно большой комплекс данных, включающий состояние подземных и поверхностных вод, почв, флоры, а также эффективность защиты таких объектов от прямого или косвенного воздействия на природную среду. Исследования по моделированию процессов переноса и накопления загрязняющих веществ включают в себя общую оценку направления движения техногенных потоков и подбор растительности для фиторемедиации территорий по периметру объектов и направлению миграции загрязнения. Воздействие объектов размещения отходов горного производства (отвалов, хвостохранилищ) прямо коррелируется со временем их существования, токсичностью и скоростью трансформации содержащихся в них компонентов, экономической эффективностью их дальнейшего использования либо консервации. Методический подход к реабилитации экологически неблагополучных территорий в местах завершившейся добычи и первичной переработки ресурсов требует интеграции нескольких приемов и методов оценки существующей экологической ситуации. Внедрение опробованных приемов восстановления предотвратит расширение территорий с необратимыми нарушениями геосистем, которые привели к полной потере продуктивности воспроизводящихся ресурсов.

**Ключевые слова:** техногенное загрязнение, тяжелые металлы, почва, поток загрязнения, фиторемедиация, экономический ущерб

**Благодарности:** Статья подготовлена в рамках гранта РФФИ № 20-45-660014 «Исследование закономерностей миграции и накопления тяжелых металлов в природных системах, испытывающих локальную техногенную нагрузку предприятий горно-металлургического комплекса с целью разработки эффективных методов их экологической реабилитации», при финансовой поддержке Правительства Свердловской области и в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024). Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002), пер. №1021062010532-7-1.5.1.

**Для цитирования:** Антонинова Н.Ю., Рыбникова Л.С., Славиковская Ю.О., Шубина Л.А. Эколого-экономические аспекты выбора направлений реабилитации территорий размещения промышленных отходов горно-металлургического комплекса. *Горная промышленность*. 2022;(1S):71–77. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-71-77.

## Environmental and Economic Aspects of Selecting Reclamation Directions for Industrial Mining and Metallurgical Waste Disposal Sites

N.Yu. Antoninova✉, L.S. Rybnikova, Yu.O. Slavikovskaya, L.A. Shubina

Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

✉natal78@list.ru

**Abstract:** Anthropogenic geoecology was developed at the end of the 20<sup>th</sup> century, but continues to face challenges in an integrated methodological approach to assessing the pollution of territories with long-term consequences of natural resource extraction. The consequences of extraction and primary processing of natural raw materials are the lack of effective control over the territories once the ore mining is completed. In order to develop effective methods to control the development of hazardous natural and man-made processes in the areas of inactive waste disposal facilities, it is necessary to analyze a sufficiently large set of data, including the condition of ground and surface waters, soils, flora, the efficiency of waste disposal facilities protection from direct or indirect impact on the natural environment. Research on modeling the processes of transfer and accumulation of pollutants includes a general assessment of the direction of man-made flows and selection of vegetation for phytoremediation of territories along the boundaries of the facilities as well as the direction of pollutant migration. The impact of mining facilities (dumps, tailings reservoirs) is directly correlated with the time of their existence, the toxicity and the rate of transformation of the components contained, the economic efficiency of their further utilization or conservation.



Thus, the methodological approach to the rehabilitation of environmentally disadvantageous areas in places where mining and primary processing of resources is completed requires integration of several techniques and methods to assess the existing environmental situation. It also includes the speed and direction of its evolvement, and the economic assessment of damage to the natural environment. The introduction of tested recovery techniques will prevent the expansion of territories with irreversible destruction of geosystems, which led to a complete loss of productivity of the reproducing resources.

**Keywords:** minerals, mining and geological conditions, ores grades, technological types of ores, quality management, ore processing, mineral composition, block modeling, mining and geological information system

**Acknowledgments:** The paper was prepared under the Russian Foundation for Basic Research Grant No. 20-45-660014 "Research into regularities of migration and accumulation of heavy metals in natural systems affected by local man-caused impact of mining and metallurgical operations with the purpose of developing effective methods of their environmental reclamation" and with financial support from Sverdlovsk Region Government and within the framework of the Government Order No. 075-00412-22 PR. Topic 2 (2022-2024). Development of geoinformation technologies to assess the protection of mining territories and forecast the development of negative processes in subsoil use (FUWE-2022-0002), reg. No.1021062010532-7-1.5.1.

**For citation:** Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., Timokhin A.V. Improvement of Mineral Processing Methods in Mining Structurally-Complex Deposits. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):71–77. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-71-77.

## Введение

Проблемы предотвращения загрязнения токсичными элементами земельных ресурсов, поверхностных и подземных вод, в ареале влияния объектов размещения отходов (ОРО) остро стоят перед промышленной экологией с конца XX в.

Значительное количество действующих ОРО в России построены в прошлом веке, когда проектные решения и дальнейшая эксплуатация объектов не требовали соблюдения необходимых мер экологической безопасности, а их сооружение на градообразующих предприятиях допускалось менее чем в 1000 м от жилой застройки. Следует отметить, что перспективы экологической реабилитации техногенно измененных территорий, основанных на комплексной оценке перспектив реабилитации сложившихся зон техногенеза, мало рассмотрены на методическом уровне, как правило вместо комплексной эколого-экономической оценки проводится анализ влияния ОРО на сопредельные среды различными методами [1–6], общая экономическая оценка от размещения отходов либо оценка их потенциальной стоимости [7], исследования по созданию фитобарьеров [8], При выборе направлений восстановления экоценоза территорий требуется комплексная оценка как трансформации нарушенных экосистем (увеличения ареала загрязнений, динамики почвообразования, термического и гидрологического режимов, изменений видового состава флоры), определение участков территории с толерантными, адаптированными или сукцессионно активными видами растительности на новообразованном субстрате ОРО и в их ареале так и экономической оценки последствий техногенного воздействия на окружающую среду ОРО.

На 2020 г. площадь занятых выведенными из эксплуатации ОРО земель в Свердловской области составила 1279,6 га (табл. 1). Имеется 22 учтенных бесхозных объекта размещения отходов – ОРО (данные Министерства экологии и природных ресурсов Свердловской области), занимающие площадь 380 га. Еще 39 выведенных из эксплуатации объектов общей площадью 1578 га и объемом размещенных отходов 0,8 млрд т, не подвергается реабилитации либо безопасной консервации, следовательно на сопредельных территориях продолжается развитие негативных процессов, угнетающих окружающую биоту.

Значительное количество не включенных в баланс собственников в 90 годы прошлого века объектов вообще никак не учтено, соответственно мониторинг их негативного

**Таблица 1**  
Количественные показатели выведенных из эксплуатации ОРО отходоёмких отраслей на 2020 г.

**Table 1**  
Quantitative indicators of decommissioned waste disposal facilities of waste-intensive industries in 2020

Отраслевая принадлежность	Площадь, га	Объем, млн т
Черной металлургии	685,50	146,12
Цветной металлургии	284,80	57,39
Нерудных материалов	309,30	577, 57

воздействия не проводится и влияние на окружающую среду может быть оценено только по косвенным признакам.

Для разработки предложенного методического подхода привлечены материалы геоэкологического моделирования и полевых исследований в пределах ряда горнопромышленных районов Среднего Урала.

## Постановка проблемы

Особую опасность составляют ОРО добычи, и обогащения цветных металлов, в которых металлы находятся в сульфидной форме, с формированием процесса сернокислотного выщелачивания: отвалы забалансовых руд, продукты обогащения и отходы металлургического передела. Негативное воздействие неиспользуемых шламохранилищ и старогодних отвалов вскрышных и вмещающих пород, размещенных на неподготовленной территории, с изношенными системами водоотведения, построенными по устаревшим технологиям формирования дамб, связано с непрерывной цепью изменений рудного вещества, вмещающих пород и шламовых масс; выветриванием породообразующих минералов; изменением минерального состава, образованием вторичных минералов (кристаллогидраты сульфатов, гидроксиды, гидроокислы). Вследствие гипергенеза происходит трансформация труднорастворимых сульфидов в хорошо растворимые сульфаты, выносимые в окружающую среду и формирующие сернокислый ландшафт в значительном отдалении от места расположения ОРО [9; 10 и др.].

Выщелачивание в подземные воды и дальнейшая миграция элементов в сопредельные среды напрямую зависит от плотности и пористости почвы, техногенных грунтов территории, степени нарушения рельефа местности, глубины залегания подземных вод, химических, физических и микроструктурных характеристик отходов.



**Методы**

Лабораторией экологии горного производства ИГД УрО РАН ведутся исследования динамики техногенной трансформации природных экосистем в районах функционирования предприятий горнометаллургического комплекса. Как примеры для оценки скорости миграции элементов из хранилищ отходов с оценкой ареала их распространения методами моделирования и дистанционного зондирования рассматриваются несколько территорий сложившихся природно-территориальных комплексов (ПТК) с высокой техногенной нагрузкой. Также ведутся натурные эксперименты в области создания на пути техногенного потока искусственных биогеохимических барьеров.

Кировградское хвостохранилище обогатительной фабрики введено в эксплуатацию в 1960 году. С 1960 г. по 1999 г. в хвостохранилище поступали отходы обогащения медьсодержащих руд (табл. 2). С 2000 г. и по настоящее время в хвостохранилище в основном складываются отходы обогащения металлургических шлаков. Количество размещенных хвостов составляет более 32 млн т.

**Таблица 2**  
Химический состав старогодних шламов (Кировград), содержание, %

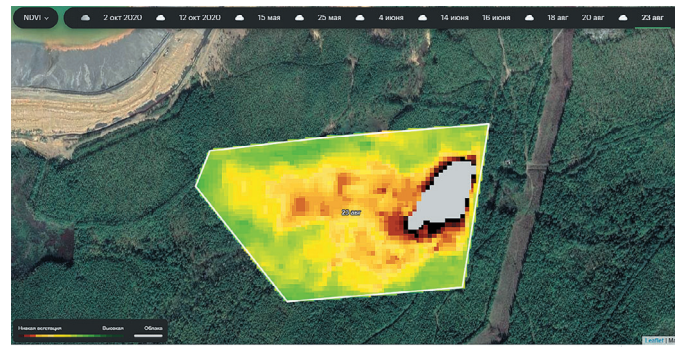
**Table 2**  
Chemical composition of aged tailings (Kirovgrad), content in %

Cu	Zn	S	Pb	Sn	Ni	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	As
0,2–0,25	0,15–0,25	До 25,5	0,05–0,1	Следы	0,02–0,05	21,5–23,5	30,0–35,0	7,5–11,5	2,5–5,5	Следы

Инженерно-геологические элементы, слагающие тело дамбы хвостохранилища: слой техноземов (намывной грунт) мощностью 21,8–23,0 м в виде насыпных, рыхлых новообразований, представленных твердой фракцией хвостов обогащения металлургических шлаков и медьсодержащих руд. Эти конструктивные особенности гидротехнического сооружения со временем не исключают возможности миграции элементов через существующую дамбу, что приводит к гибели биомассы по направлению течения техногенного потока. Хвостохранилище расположено на бывших торфоразработках, рукотворный рельеф территории сильно повлиял на гидрологический режим территории. При помощи расчета показателя количества фотосинтетически активной биомассы (NDVI) с использованием методов дистанционного мониторинга (космоснимков) направление и степень угнетения растительности определяется не менее показательно, чем при стандартном экологическом обследовании территории методами визуальной оценки и отбора проб. Космоснимки позволяют выявлять процессы деградации земельных ресурсов, определять потенциальные угрозы и направления техногенных потоков от мест размещения отходов. На рис.1 представлена территория в отдалении от дамбы хвостохранилища, которая за счет перепада высот рельефа аккумулировала техногенное загрязнение и привела к значительному локальному угнетению фитомассы.

Важной проблемой, возникающей как на стадии отработки, так и на постэксплуатационном этапе, является образование некондиционных шахтных и подотвальных вод, которые обогащены загрязняющими компонентами в количестве значительно выше нормативных.

Формирование гидрогеохимических систем горнопромышленных ландшафтов определяется наличием техногенной зоны гипергенеза, в которой при отработке медноколчеданных месторождений в течение десятилетий



**Рис. 1**  
NDVI утечка по направлению миграции поверхностных вод в 1 км от дамбы шламоохранилища г. Кировград (построено с использованием веб-приложение OneSoil)

**Fig. 1**  
The NDVI leakage in the direction of surface water migration in 1 km from the tailings dam in Kirovgrad. Kirovgrad (plotted using OneSoil web application)

происходила последовательная непрерывная цепь изменений рудного вещества и вмещающих пород: выветривание породообразующих минералов; изменение минерального состава пород; образование вторичных минералов (кристаллогидраты сульфатов, гидроксиды, гидроокислы).

Циклический процесс осаждения и растворения продуктов выветривания сульфидов

в техногенной зоне гипергенеза является важным источником кислых металлоносных вод в районах разработки месторождений и размещения отходов добычи. После завершения отработки эти зоны становятся практически неограниченным поставщиком сульфатов, железа, цинка и других элементов в подземные воды в течение десятков лет.

Отвал Левихинского рудника представляет собой зону окисления, в его строении по вертикали сверху вниз выделяется несколько подзон: окисления, выщелачивания и вторичного обогащения [11]. В зоне вторичного обогащения в виде сульфидов накапливаются металлы, вынесенные из верхних горизонтов. Дезинтеграция пород при отсыпке отвала и в процессе его окисления способствует увеличению активной поверхности взаимодействия сульфидов и инфильтрующихся вод. Скорость водообмена невысокая, зависит от ряда факторов, таких как величина осадков, температурный градиент (степень промороженности поверхности), испаряемость, которые изменяются в течение года.

После прекращения добычи и затопления рудника в местах разгрузки подземных вод образуются участки накопления загрязняющих компонентов в кислых шахтных водах. Их состав может быть представлен следующими гидрогеохимическими моделями: 1) окислительного выщелачивания сульфидов (пирит, сфалерит, халькопирит); 2) растворения кристаллогидратов сульфата (мелантерит, госларит, халькантит); ярозита. Источниками алюминия, магния, кальция, марганца являются алюмосиликаты, которые растворяются в результате воздействия кислых шахтных вод.

Сульфидная минерализация обуславливает сульфатный состав вод (содержание сульфатов до 50 г/л), среди катионов преобладают железо, алюминий и магний. Содержание металлов в водах очень высокое: железо до 9,5 г/л,



алюминий до 2,7 г/л, цинк и медь до 0,5 г/л. Состав подотвальных вод зависит от сезона, наибольшие значения компонентов наблюдаются в сухой период. Сравнение состава шахтных и подвальных вод показывает, что подотвальные воды, как правило, более минерализованные (TDS в 3–5 раз больше), концентрации алюминия и железа выше в 7–8 раз, меди и цинка в 3–4 раза больше. Состав пород, участвующих в формировании дренажных и подотвальных вод одинаковый, поэтому можно предположить, что гидрогеохимические процессы формирования дренажных и подотвальных вод имеют принципиальные отличия. В отвалах степень дезинтеграции пород выше, температурный градиент больше, скорость водообмена ниже. Совокупность гидродинамических, геомеханических и температурных факторов способствует образованию более кислых минерализованных вод, формирующихся в теле отвалов. Компьютерное моделирование (Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1) показало, что скорость окисления сульфидов составляет  $3,6 \cdot 10^3$  моль/час, масса находящегося в отвалах сульфидов будет продуцировать разгрузку кислых подотвальных вод на объекте в течение нескольких сотен лет [12; 13].

Породы, слагающие отвал, в химическом и минералогическом отношении гетерогенны, это сланцы, альбитофиры, порфириды, порфиры [14]. В составе пород преобладают силикаты, соединения алюминия и железа. Породы отвалов содержат значительные количества сульфидов, от 3 до 10%, их состав распределяется следующим образом: пирит 95%, халькопирит 2%, сфалерит 3%. Содержание меди варьирует от 0,1 до 0,3%, цинка от 0,2 до 0,3%, серы от 2,8 до 10,9%. Pb, Co, Ni, Mo, As, Sb обнаружены в количестве  $n \cdot 10^{-2} \div n \cdot 10^{-3}\%$ . Редкоземельные элементы находятся в количестве н г/т, исключение составляет Ga – до 27 г/т. Объем отвалов на одном месторождении как правило порядка 3,5 – 6,0 млн т.

Основным процессом формирования химического состава подземных вод в районах медноколчеданных рудников является окисление сульфидов [15]. В результате подземные воды обогащаются сульфатами, железом, цинком, медью; растворение водовмещающих пород является источником поступления алюминия, магния, кальция и других компонентов. Насыщение подземных вод продуктами растворения приводит к формированию вторичных минералов при изменении окислительно-восстановительных условий. Результаты компьютерного моделирования с использованием Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1 показывают, что при содержании пирита в породе 10% (около 1 моль/кг), в зависимости от pH изменяются индексы насыщения подземных вод: при  $\text{pH} < 3$  осаждаются двухвалентное железо в виде мелантерита ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), при снижении кислотности раствора осаждаются минералы, содержащие трехвалентное железо: гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), гетит ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), ферригидрит ( $\text{Fe}_{10}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ ). Растворимость мелантерита непостоянна, при уменьшении температуры от 50 до 0°C растворимость мелантерита уменьшается почти в 6 раз. Наличие окислительно-восстановительных, температурных, испарительных барьеров обуславливает циклический характер осаждения – растворения вторичных минералов и формирование кислых подотвальных вод.

Подотвальные воды пересыщены по отношению к магнетиту, гематиту, гетиту, что свидетельствует о возможных процессах осаждения этих минералов.

Отдельную проблему представляют карьерные выемки,

формально рекультивированные путем естественного обводнения, особенно карьеры, оставшиеся после отработки месторождений цветных металлов. Это связано с химическими свойствами пород, слагающих борта карьера и размещенных в непосредственной близости к ним отвалов вмещающих пород.

Территория отработки Кабанского месторождения занята отвалами рыхлой вскрыши и крупнообломочными вмещающими породами, окружающий ландшафт состоит в основном из техногенных грунтов.

Отходы ликвидированных рудников, подвергшиеся воздействию процессов выветривания с течением времени приводят к развитию почв, именуемых шахтным грунтом (Sencindiver, Ammons, 2000), и представляющей из себя молодые эмбриоземы. Значительное количество тяжелых металлов них отрицательно влияет на качество образуемых почв и тормозит восстановление функциональной экосистемы. Также грунты, сильно загрязненные тяжелыми металлами, такие как Cu, Pb, Zn ограничивают рост растений, влияют на метаболизм и в итоге на из роста и размножение культур, затрудняя процесс вторичной сукцессии (рис. 2).

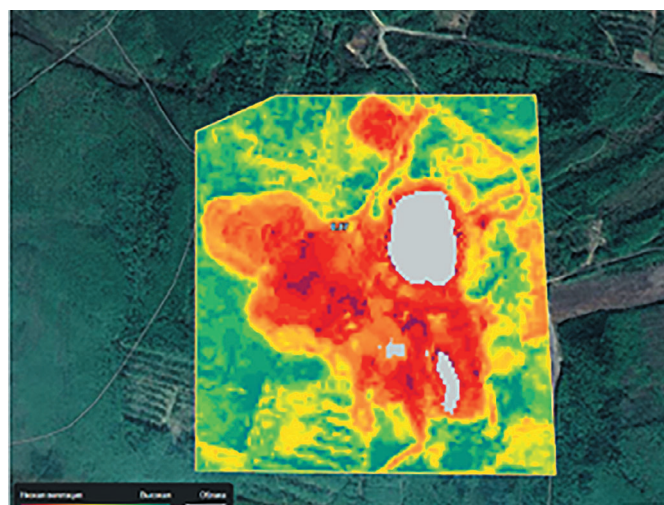


Рис. 2  
Общий вид техногенных грунтов у подножия отвалов Кабанского месторождения и оценка потенциала растительности (NDVI) территории (2020 г.)

Fig. 2  
General view of man-made soils at the foot of the Kabansky deposit waste dumps and assessment of the vegetation potential (NDVI) of the area (2020)



Оценка содержания тяжелых металлов во вмещающих пород Кабанского рудника [16] показала содержание меди в количестве 0,1%, цинка – 0,025%, свинца – 0,02% фтора – 0,02%; мышьяка – 0,006%; сернистого ангидрида – 3%. Кларк концентрации тяжелых металлов в отвальной массе равен 66,4.

На территории рудника проведен ряд экспериментально-аналитических исследований по формированию биогеохимических барьеров, установлению перспективных видов растений, толерантных к накопленному загрязнению и способных к применению в качестве фитомелиорантов. В 2021 г. проведен опыт посадок в качестве фитомелиоранта растения сныть обыкновенная (лат. *Aegorodium podagraria*), показавшего в течение сезона не только удовлетворительную приживаемость, но и хорошую адсорбцию загрязнителей. Сныть является прекрасным аккумулятором железа и цинка, уступая хвощу по аккумуляции меди и мышьяка. Результаты исследований позволили выявить факторы, ограничивающие восстановление преобразованного горными работами ландшафта с использованием метода фитостабилизации, который предполагает использование растений и других мер по улучшению почвы в целях иммобилизации тяжелых металлов за счет абсорбции и накопления корнями видов растений с высокой толерантностью к наиболее распространенным загрязнителям.

Частью комплексной оценки перспектив и направлений реабилитации территорий ПТК является экономическая составляющая, включающая расчет наносимого ущерба в постэкспла период и перспективы использования накопленных масс отходов с целью извлечения полезных компонентов.

Были выявлены тенденции формирования ущерба в стоимостном выражении на основе эколого-экономической оценки последствий техногенного воздействия на окружающую среду ОРО. За основу приняты объемные показатели объектов размещения отходов горнопромышленного комплекса, рассматривались отвалы пустых пород, хвосто- и шламохранилища предприятий черной и цветной металлургии по Свердловской области. Укрупнено суммарный ущерб от размещения ОРО может быть определен по следующей формуле:

$$Y_{\text{общ.}} = Y_{\text{л}} + Y_{\text{з}} + Y_{\text{в}} + Y_{\text{а}} + Y_{\text{б.п.}} + Y_{\text{ж}}$$

где  $Y_{\text{общ.}}$  – суммарный ущерб, наносимый в результате размещения отходов горнопромышленного комплекса на поверхности, руб.;  $Y_{\text{л}}$  – ущерб лесным ресурсам в результате их уничтожения;  $Y_{\text{з}}$  – ущерб земельным ресурсам, руб.;  $Y_{\text{в}}$  – ущерб водным объектам, руб.;  $Y_{\text{а}}$  – ущерб от выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, руб.;  $Y_{\text{б.п.}}$  – ущерб беспозвоночным и насекомым в результате снятия почвенно-растительного слоя, руб.;  $Y_{\text{ж}}$  – ущерб объектам животного мира в результате нарушения зоны их обитания, руб.

Выполненные расчеты показали, что в среднем окружающей среде наносится ущерб от размещения отходов пред-

приятий черной металлургии: отвалов вскрышных пород в размере 162,7 руб. на 1 т заскладированных пород, отходов обогатительного передела 320,6 руб. на 1 т. Для предприятий цветной металлургии усредненные показатели экономического ущерба составляют при размещении отвалов 163,8 руб. на 1 т. отходов, при складировании отходов обогащения – 554,7 руб./т. Однако необходимо отметить, что наиболее существенный прирост токсичности, а, следовательно, и больший экономический ущерб, формируется в процессе длительного хранения отходов, складываемых на поверхности. Так для отвалов вскрышных пород, некондиционных руд и шлаковых отвалов, запаздывание составляет 10–15 лет. В течение этого срока наблюдается минимальное пылеобразование и окислительные процессы. Через 20–30 лет, в результате сезонных колебаний температур и периодического увлажнения, удельная активная поверхность отходов в теле отвалов начинает быстро нарастать, что приводит к экспоненциальному росту концентрации тяжелых металлов в подотвальных водах. Изменение во времени токсичности отходов приводит к увеличению экологического ущерба.

### Выводы

Результаты исследований динамики изменения состояния природных сред в районах добычи и первичного обогащения медноколчеданных руд показали, что основным источником эмиссии загрязняющих веществ от старогодних ОРО, сформированных в результате добычи медьсодержащих руд являются подотвальные кислые воды, высокая аэрационная нагрузка с поверхности и дренажные процессы на старогодних гидротехнических сооружениях. Установлено, что собственных компенсационных возможностей экосистемы недостаточно для восстановления ценозов, а конструктивные недостатки существующих сооружений (отвалов, ГТС) препятствуют естественным сукцессионным процессам.

Выявленные аномалии содержания поллютантов по пути сложившегося техногенного потока характеризуют динамику экзогенных процессов, значительную нагрузку на все природные среды района расположения их источника и доказывают необходимость ее снижения путем создания искусственных, либо использования естественных биогеохимических барьеров, использование приемов фитостабилизации не только толерантными растительными формами, но и растениями, являющимися активными накопителями тяжелых металлов.

При выборе методов реабилитации территорий требуется комплексная оценка изменений техноэкосистемы, сложившейся на территории после окончания добычи ресурсов (динамики почвообразования, термического и гидрологического режимов, изменений видового состава флоры), подбор участков для заселения толерантными, сукцессионно активными видами растительности способной к адсорбции загрязнителей на новообразованном субстрате ОРО и в их ареале.

### Список литературы

1. Kanmani S., Gandhimathi R. Assessment of heavy metal contamination in soil due to leachate migration from an open dumping site. *Applied Water Science*. 2013;3(1):193–205. <https://doi.org/10.1007/s13201-012-0072-z>
2. Reddy K.R. Evolution of geoenvironmental engineering. *Environmental Geotechnics*. 2014;1(3):136–141. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00088>





3. Chileshe M.N., Syampungani S., Festin E.S., Tigabu M., Daneshvar A., Odén P.C. Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration. *Journal of Forestry Research*. 2020;31(4):1283–1293. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00921-0>
4. Хоменко О.Е., Кононенко М.Н., Миронова И.Г., Юрченко К.О. Пути снижения техногенной нагрузки на горнодобывающие регионы Украины. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2017;(51):77–83. Режим доступа: <http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/150359/77-83.pdf>
5. Исмаилов В.А., Адылов А.А., Агзамова И.А., Норматова Н.Р., Бозоров Д.Ш. К методике оценки геоэкологического состояния горнопромышленных районов. В: Осипов В.И. (ред.) *Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии в рамках Года экологии в России, г. Москва, 4–5 апреля 2017 г.* Вып. 19. М.: РУДН; 2017. С. 41–47.
6. Корнилков С.В. Об организации геоинформационного мониторинга горного производства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S37):177–186.
7. Яндыганов Я.Я., Власова Е.Я. *Экология региона: проблемы, решения*. Екатеринбург: АМБ; 2010. 413 с.
8. Pehoiu G., Murescu O., Radulescu C., Dulama I.D., Teodorescu S., Stirbescu R.M. et al. Heavy metals accumulation and translocation in native plants grown on tailing dumps and human health risk. *Plant and Soil*. 2020;456(1):405–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04725-8>
9. Макаров А.Б. *Техногенно-минеральные месторождения Урала: дис. ... д-ра геолог.-мин. наук*. Екатеринбург; 2007. 327 с. Режим доступа: <http://www.dslib.net/metallogenia/tehnogenno-mineralnye-mestorozhdenija-urala.html>
10. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Проблемы экологического законодательства и методические подходы при обращении с отходами ГМК. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2020;(4):53–64. <https://doi.org/10.25635/b4138-1960-9073-i>
11. Емлин Э.Ф. *Техногенез колчеданных месторождений Урала*. Свердловск: Изд-во УрГУ; 1991. 256 с.
12. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Formation of waste-rock drainage water on massive sulfide deposits of the Urals (Russia). *Procedia Earth and Planetary Science*. 2017;(17):857–860. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2017.01.038>
13. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites. *Applied Geochemistry*. 2015;(57):17–34. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.010>
14. Боровков Ю.А. (ред.) *Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду*. Екатеринбург: НИА–Природа; 2002. 206 с.
15. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2<sup>nd</sup> ed. London: CRC Press; 2005. 683p. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>
16. Sencindiver J.C., Ammons J.T. Minesoil genesis and classification. *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. 2000;41:595–613. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr41.c23>

## References

1. Kanmani S., Gandhimathi R. Assessment of heavy metal contamination in soil due to leachate migration from an open dumping site. *Applied Water Science*. 2013;3(1):193–205. <https://doi.org/10.1007/s13201-012-0072-z>
2. Reddy K.R. *Evolution of geoenvironmental engineering*. *Environmental Geotechnics*. 2014;1(3):136–141. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00088>
3. Chileshe M.N., Syampungani S., Festin E.S., Tigabu M., Daneshvar A., Odén P.C. Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration. *Journal of Forestry Research*. 2020;31(4):1283–1293. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00921-0>
4. Khomenko O.E., Kononenko M.N., Myronova I.G., Yurchenko K.O. Ways of technogenic loading decreasing on mining regions of Ukraine. *Collection of Research Papers of the National Mining University*. 2017;(51):77–83. (In Russ.) Available at: <http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/150359/77-83.pdf>
5. Ismailov V.A., Adylov A.A., Agzamova I.A., Normatova N.R., Bozorov D.Sh. Regarding methodology of geoenvironmental assessment of mining areas. In: *Osipov V.I. (ed.) Sergeev's Readings Geoenvironmental safety of mineral mining: Proceedings of the Annual Session of the RAS Scientific Council on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology in the framework of the Year of Ecology in Russia, Moscow, April 4–5, 2017*. Iss. 19. Moscow: RUDN University; 2017, pp. 41–47. (In Russ.)
6. Kornilkov S.V. About the organization of geoinformation monitoring of mining production. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(S37):177–186. (In Russ.)
7. Yandyganov Ya.Ya., Vlasova E.Ya. *Ecology in the region: issues and solutions*. Ekaterinburg: АМБ; 2010. 413 p. (In Russ.)
8. Pehoiu G., Murescu O., Radulescu C., Dulama I.D., Teodorescu S., Stirbescu R.M. et al. Heavy metals accumulation and translocation in native plants grown on tailing dumps and human health risk. *Plant and Soil*. 2020;456(1):405–424. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04725-8>
9. Makarov A.B. *Man-made mineral deposits of the Urals: Doctor of Science in Geology and Mineralogy dissertation* Ekaterinburg; 2007. 327 p. (In Russ.) Available at: <http://www.dslib.net/metallogenia/tehnogenno-mineralnye-mestorozhdenija-urala.html>
10. Antoninova N.Yu., Shubina L.A. Problems of environmental legislation and methodological approaches in the management of FMMC waste. *Izvestija Tulskegogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula State University*. Sciences of Earth. 2020;(4):53–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/b4138-1960-9073-i>



11. Emlin E.F. *Technogenesis of pyrite deposits of the Urals*. Sverdlovsk: Ural State University; 1991. 256 p. (In Russ.)
12. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Formation of waste-rock drainage water on massive sulfide deposits of the Urals (Russia). *Procedia Earth and Planetary Science*. 2017;(17):857–860. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2017.01.038>
13. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites. *Applied Geochemistry*. 2015;(57):17–34. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.010>
14. Borovkov Yu.A. (ed.) *Man-made deposits of the Middle Urals and assessment of their environmental impact*. Ekaterinburg: NIA–Priroda; 2002. 206 p. (In Russ.)
15. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2<sup>nd</sup> ed. London: CRC Press; 2005. 683p. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>
16. Sencindiver J.C., Ammons J.T. Minesoil genesis and classification. *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. 2000;41:595–613. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr41.c23>

#### **Информация об авторах**

**Антонинова Наталья Юрьевна** – кандидат технических наук, заведующий лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: natal78@list.ru

**Рыбникова Людмила Сергеевна** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Славиловская Юлия Олеговна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

**Шубина Любовь Андреевна** – научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

#### **Information about the authors**

**Natalya Yu. Antoninova** – Candidate of Sciences (Engineering), Head of Laboratory Ecology of Mining Production, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: natal78@list.ru

**Ludmila S. Rybnikova** – Doctor of Science in Geology and Mineralogy, Main Scientist Researcher Laboratory of Ecology of Mining Production, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

**Yulia O. Slavikovskaya** – Candidate of Sciences (Engineering), Research Officer Laboratory of Ecology of Mining Production, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

**Lubov A. Shubina** – Researcher, Laboratory of Ecology of Mining Production, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

#### **Article info**

Received: 13.09.2021

Revised: 18.10.2021

Accepted: 21.10.2021

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 13.09.2021

Поступила после рецензирования: 18.10.2021

Принята к публикации: 21.10.2021