

УДК 504.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Лёвихинского рудника, Средний Урал)

Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, А.Н. Галин✉

Институт горного дела УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

✉aynur.galin.1997@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* работы определяется тем, что на протяжении почти ста лет на Лёвихинском руднике происходит непрерывное формирование кислых подотвальных вод, которые являются значимым источником загрязнения гидросферы. **Цель:** анализ состава пород отвала и подотвальных вод для обоснования мероприятий по минимизации их воздействия на окружающую среду. **Объекты:** подотвальные воды, которые формируются в отвале Лёвихинского медноколчеданного рудника. **Методы:** работа основана на результатах гидрохимического опробования подотвальных вод и химического опробования проб пород отвала, определении соответствия качества воды и пород отвала установленным нормативным требованиям; выполнении сбора, анализа и обработки гидрологической и статистической информации; литературном поиске и анализе наилучших доступных технологий для предотвращения загрязнения гидросферы от объектов накопленного вреда. **Результаты.** На Лёвихинском медноколчеданном месторождении (Средний Урал) отвалы пустых вмещающих и вскрышных пород объемом 1,7 млн м³ размещены на площади 30 га. В основании самого крупного из них разгружаются кислые подотвальные воды, расход которых в паводок превышает 1 тыс. м³/сут. Состав воды сульфатный, преобладающие катионы – железо и алюминий, минерализация изменяется от 13 до 52 г/дм³, pH достигает 1,9. Концентрации элементов в подотвальной воде зависят от сезона и климатических условий. Породы отвала представлены преимущественно кварцами, полевыми шпатами и глинистыми минералами, наблюдаются высокие содержания серы, меди, цинка, мышьяка, кобальта и кадмия. Размер эколого-экономического ущерба в результате поступления подотвальных вод составляет более 95 млн р. в год. Для минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду рассмотрено два направления: рекультивация отвала и очистка подотвальной воды, выполнен сравнительный анализ их достоинств, недостатков и затрат на реализацию природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: Лёвихинский рудник, медноколчеданное месторождение, подотвальные воды, вмещающие породы, минеральный состав, химический состав, коэффициент опасности, кларк концентрации, рекультивация отвала, очистка подотвальной воды

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания Института горного дела УрО РАН. Тема 2 (2025–2027 гг.). Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр (FUWE-2025-0002). Г.р. № 1022040300092-1-1.5.1

Для цитирования: Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Галин А.Н. Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Лёвихинского рудника, Средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 102–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517

UDC 504.054

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517

Processes of formation of waste waters and measures to minimize their impact on the hydrosphere (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals)

L.S. Rybnikova, P.A. Rybnikov, A.N. Galin✉

Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

✉aynur.galin.1997@mail.ru

Abstract. Relevance. There is a continuous formation of acidic waste waters at the Levikhinsky mine, while negatively affecting the hydrosphere for almost a hundred years. **Aim.** To establish the relationship between the composition of the waste rock and the waste water in order to justify measures to minimize the waste water impact on the environment. **Objects.** Waste water formed in the dump of the Levikhinsky copper and cobalt mine. **Methods.** The work is based on the results of hydrochemical sampling of waste water and chemical sampling of dump rocks, determination of compliance of water quality and dump rocks with the established regulatory requirements; collection, analysis and processing of hydrological and statistical information; literature search and analysis of the best available technologies to prevent pollution of the hydrosphere from objects of accumulated harm. **Results.** There are more than a dozen waste dumps with a total area of 30 hectares and a volume of 1,7 million m³ at the Levikhinsky copper-pyrite deposit (Middle Urals). At the base of the largest of them, for several decades, acidic bottom waters are discharged, the flow rate of which exceeds 1 thousand m³/day in floods. Water composition is sulfate, predominant cations are iron and aluminum, mineralization varies from 13 to 52 g/dm³, pH reaches 1,9. The concentrations of elements in the dump water depend on the season and climatic conditions. The rocks of the dump are represented mainly by quartz, feldspars and clay minerals; high concentrations of sulfur, copper, zinc, arsenic, cobalt and cadmium are observed. The amount of ecological and economic damage as a result of intake of waste water is more than 95 million rubles per year. To minimize the impact of waste waters on the environment, the authors have considered two directions: dump remediation and waste water treatment, and performed a comparative analysis of their advantages, disadvantages and costs for the implementation of environmental protection measures.

Keywords: Levikhinsky mine, copper-pyrite deposit, bottom waters, host rocks, mineral composition, chemical composition, hazard ratio, concentration clark, dump reclamation, bottom water treatment

Acknowledgements: The work was carried out under the State Assignment of the Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Theme 2 (2025–2027). Geoinformation support of systemic assessment of nature conservation strategies in the development of subsoil resources (FUWE-2025-0002). G.r. no. 1022040300092-1-1.5.1

For citation: Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Galin A.N. Processes of formation of waste waters and measures to minimize their impact on the hydrosphere (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 102–115. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517

Введение

В процессе горнодобывающей деятельности образуются различные техногенно-минеральные образования, в том числе отвалы вскрышных пород, забалансовых руд и т. д. Отчуждение плодородных участков земли, повышение пылевой нагрузки в результате ветровой эрозии, загрязнение почв из-за аэротехногенного переноса, загрязнение гидросферы подотвальными водами являются результатами негативного влияния отвалов на различные элементы окружающей среды. В первую очередь негативное влияние отвалов медно-колчеданных месторождений на окружающую среду определяется их вещественным составом. Данная проблема актуальна уже долгое время по всему миру [1–7].

Территория отработанного Лёвихинского месторождения является одним из основных объектов накопленного вреда [8] на территории Свердловской области. Начиная с 1927 г. отвалы вскрышных пород, окисленных и сульфидных забалансовых руд складировались на неподготовленном основании. Интенсивное выщелачивание элементов с тела отвала происходит на протяжении почти ста лет, что привело к значительному загрязнению прилегающей территории, поверхностных и подземных вод. Обогащенные кислородом атмосферные осадки, контактируя с вмещающими породами, обогащаются металлами, сульфат-ионом и другими компонентами. Непрерывное формирование кислых подотвальных вод негативно отражается на водных

объектах, а также на флоре и фауне прилегающих территорий.

Целью работы является анализ состава пород отвала и подотвальных вод для обоснования мероприятий по минимизации их воздействия на окружающую среду.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи: выполнен анализ химического состава пород отвала и подотвальных вод; предложены мероприятия по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду.

Объект исследования

Лёвихинская группа медноколчеданных месторождений находится в Кировградском районе Свердловской области (рис. 1). Эксплуатация открытым способом началась в 1927 г., а подземным способом позднее. В 2003 г. остановлен водоотлив на руднике и началось затопление горных выработок. В 2007 г. появился сосредоточенный выход кислых шахтных вод с расходом до 2,9 тыс. м³/сут.

11 отвалов общей площадью 0,3 км² и объемом 1,7 млн м³ находятся на территории Лёвихинского рудного поля. Самый большой из них имеет площадь 22,6 га и объем 1,45 млн м³ и находится в южной части возле шахты «Лёвиха-ХП» (рис. 1) [9]. Здесь в течение нескольких десятков лет идёт разгрузка кислых подотвальных вод с расходом в паводок до 1250 м³/сут. Отдельного сбора и нейтрализации подотвальных вод нет, и это пагубно отражается на флоре (рис. 2). Раз-

гружаясь они попадают в русло р. Лёвиха и далее в пруд-осветлитель. Севернее в него со станции нейтрализации со средним расходом 3,2 тыс. м³/сут. поступает нейтрализованная шахтная вода. Очищенные шахтные воды сбрасываются из пруда-осветлителя в русло р. Лёвихи и далее в р. Тагил [10].

Отвалы сложены пустыми вмещающими породами, содержащими вкрапленные сульфиды, представленными преимущественно пиритом, халькопиритом, сфалеритом, марказитом, и вскрышными породами, представленными амфиболитами и серицитовыми сланцами [9].

Из-за процессов дробления и разрушения пород при добыче происходит увеличение их фильтрационных свойств. По всей поверхности отвала происходит практически полное поглощение атмосферных осадков, обогащенных кислородом [11].

К формированию ряда сульфатных солей, которые включают продукты выветривания сульфидов, приводят процессы окисления, гидролиза и испарения. В теле отвала происходит образование и накопление водорастворимых вторичных минералов или неосульфатов. Основными из них являются минералы, содержащие железо, а также семиводные сульфаты, аналогичные мелантериту, но с переменным соотношением четырех главных металлов – железа, меди, цинка, магния. Повышенной растворимостью характеризуются сульфаты из групп мелантерита, розенита, эпсомита, галотрихита, копиапита [12].

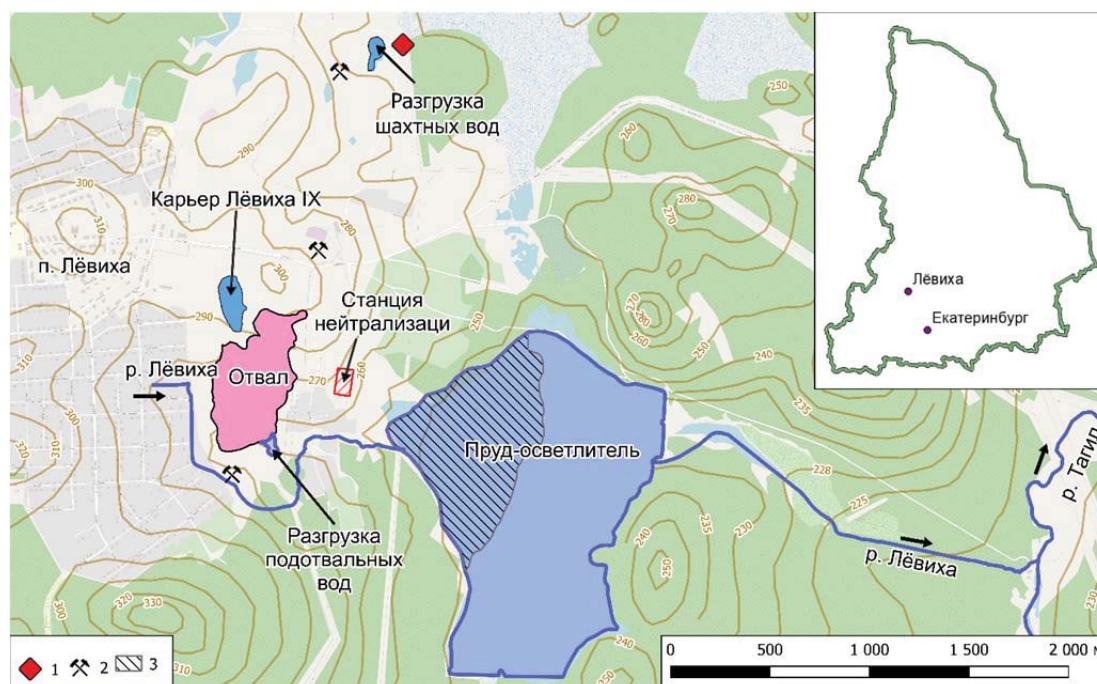


Рис. 1. Обзорная схема расположения объектов в районе отработанного Лёвихинского медноколчеданного рудника: 1 – станция перекачки шахтных вод; 2 – шахты; 3 – пляж пруда-осветлителя

Fig. 1. Overview scheme of the location of facilities in the area of the depleted Levikhinsky copper and cobalt mine: 1 – mine water pumping station; 2 – mines; 3 – clarifier pond beach



Рис. 2. Зона разгрузки подотвальных вод
Fig. 2. Waste water discharge zone

В связи с тем, что тело отвала расположено выше поверхности земли, между внутренней частью отвала и поверхностью существует температурный градиент, который зависит от сезона и времени суток, что, в свою очередь, приводит к изменению растворимости минералов в зависимости от сезона и времени суток. В теле отвала происходит циклический процесс окисления, растворения, осаждения минералов. Все эти процессы приводят к формированию специфического гидрохимического состава вод, которые разгружаются по периметру отвала [13–15].

Методы исследования

Для анализа состава пород отвала и подотвальных вод Лёвихинского рудника использовались результаты работ, выполненных в 2020–2021 гг. лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании Института горного дела УрО РАН по заданию Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области.

Было отобрано 12 проб пород отвала. Опробование выполнялось точечным способом в сухую погоду. Расположение точек опробования показано на рис. 3. Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 [16].

Анализ химического состава пород отвала выполнены в аналитическом сертификационном испытательном центре института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка).

Состав подотвальных вод анализировался в наблюдательной точке в месте их разгрузки (рис. 1). Всего было отобрано 5 проб: 2 в летний период, 2 в осенний и 1 в весенний. Определялись pH, H^+ , Na^+ , K^+ , NH_4 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , $Fe_{общ}$, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Si, Be, Cd (AA), Co, As, Ni, Pb, Se, сухой остаток, минерализация, SiO_2 , окисляемость и жёсткость. Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 [17]. Состав подотвальных вод получен с использованием следующих методов: пламенно-эмиссионной спектрометрии, пламенно-атомно-абсорбционной, фотометрической с реактивом Грисса, потенциометрической с ионоселективным электродом, гравиметрического, меркуриметрического, титриметрического, масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме. Анализ выполнен в химико-аналитическом центре Института промышленной экологии УрО РАН.

Для анализа полученного массива данных удобно использовать безразмерные показатели. В качестве величин, относительно которых нормируются анализируемые показатели, могут использоваться предельно-допустимые значения для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) [18] и почв (ПДК_п) [19]. Был использован коэффициент опасности $K_o = C_i / C_{пдк}$, где C_i – концентрация i -го вещества; $C_{пдк}$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества.

В качестве основного методологического подхода по оценке экологического ущерба, причиненного водному объекту в результате поступления подотвальных вод на Лёвихинском руднике, была использована методика оценки размера вреда [20], наносимого водному объекту, разработанная в соответствии с Водным кодексом. Данная методика используется для количественной оценки экологического ущерба (в денежном выражении), который причиняется поступлением подотвальных вод поверхностным водным объектам.

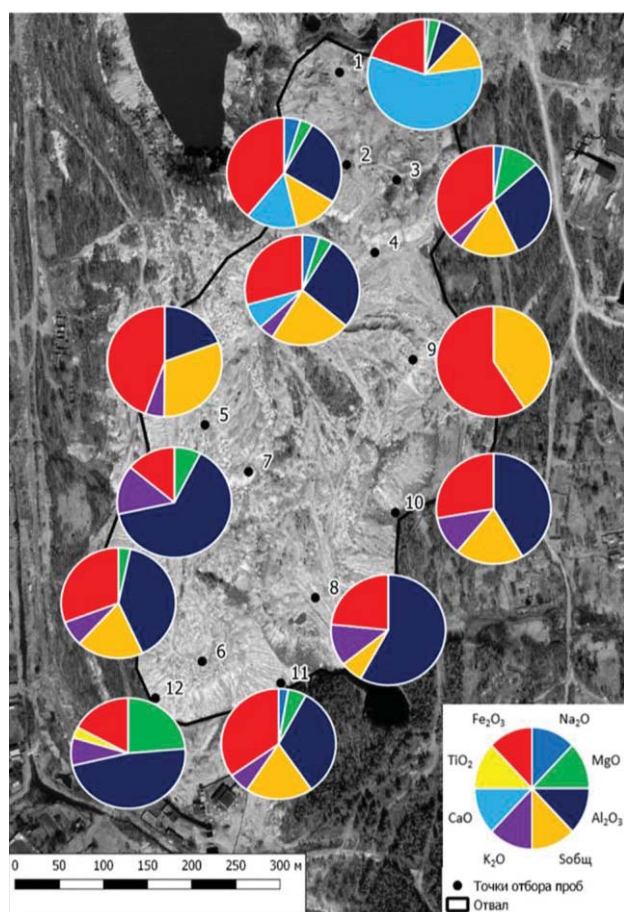


Рис. 3. Расположение точек отбора проб из отвала и их химический состав

Fig. 3. Location of sampling points from the dump and their chemical composition

Результаты исследования

Химические анализы проб, отобранных в ручьях, текущих с отвала, показывают сильно кислую реакцию среды (pH=1,92–2,6), состав воды сульфатный магниевое-алюминиево-железистый, минерализация варьирует от 13 до 52 г/л, воды имеют высокие концентрации (г/л) сульфат-иона (10–39), железа (1,5–8,7), алюминия (0,6–2,9), магния (0,4–1,7), меди (0,09–0,3), цинка (0,1–0,3) (табл. 1). Состав воды очень сильно зависит от сезона и ко-

личества осадков за предшествующие 7 дней, при этом pH не показывает такой зависимости.

Таблица 1. Состав подотвальных вод

Table 1. Composition of waste waters

Дата опробования Sampling date	Формула Курлова Kurlov's formula
04.08.2020	$M23,5 \frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 46 Al 31 Mg 17} pH 2,31 T 18,1$ °C Eh 566 mV
13.10.2020	$M52,1 \frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 56 Al 22 Mg 17} pH 2,16 T 8,5$ °C Eh 554 mV
14.04.2021	$M13,0 \frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 36 Al 34 Mg 19} pH 2,60 T 11,4$ °C Eh 244 mV
04.08.2021	$M44,0 \frac{SO_4 100}{Al 42 Fe^{3+} 41 Mg 14} pH 1,92 T 25$ °C Eh 300 mV
24.09.2021	$M38,5 \frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 42 Al 31 Mg 22} pH 2,26 T 14,4$ °C Eh 281 mV

Средние превышения ПДК_{рх} в подотвальной воде доходят до 213 тыс. раз (Cu), а породе отвала – до 250 раз (S) (рис. 4).

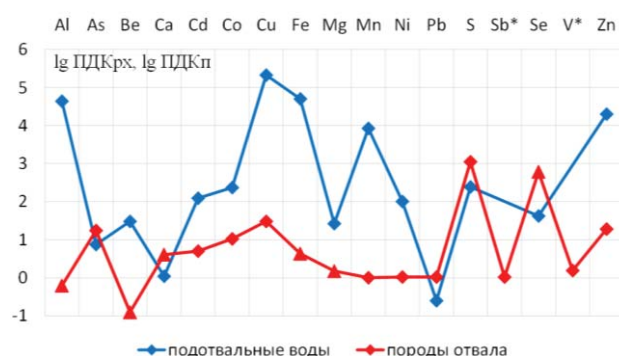


Рис. 4. Геохимический спектр распределения элементов по отношению к ПДК в подотвальной воде (ПДК_{рх}) и в породе отвала (ПДК_п) (красный треугольник – по отношению КК, так как отсутствует ПДК), * – не определялся в подотвальной воде

Fig. 4. Geochemical distribution spectrum of elements in relation to MPC in waste water (MPC_{fish}) and in the dump rock (MPC_s) (red triangle – in relation to CC, as there is no MPC), * – not determined in waste water

Максимальные показатели значений коэффициента опасности элементов в породе отвала (числитель) и в подотвальной воде (знаменатель) представлены в виде обобщенной ассоциации, где в скобках показана кратность превышения ПДК:

- I класс опасности: $\frac{Zn(37)As(33)Cd(10)Pb(2)}{Cu(60)Ni(2)Sb(2)}$;
- II класс опасности: $\frac{Cu(60)Ni(2)Sb(2)}{Cd(156)Se(45)Be(33)}$;

- III класс опасности: V(3)Mn(2);
Cu(332 200)Zn(30 370)Co(260)Ni(110)As(10);
- IV класс опасности: Fe(86 700)Al(72 500)Mn(13 460)Mg(42)Ca(2);

В породе отвала присутствуют элементы I класса опасности с максимальными превышениями ПДКп до 37 раз (Zn) и II класса опасности – до 60 раз (Cu). В подотвальной воде максимальные превышения ПДКрх достигают 156 раз (Cd) для элементов II класса опасности, для III класса опасности – 332 тыс. раз (Cu) и для IV класса опасности – 86 тыс. раз (Fe).

Оценка эколого-экономического ущерба

Размер вреда (У, тыс. р.), причиненного водному объекту сбросом вредных (загрязняющих) веществ в составе подотвальных вод, рассчитывается по формуле [20]:

$$У = K_{вг} \cdot K_{в} \cdot K_{ин} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot M_i \cdot K_{из},$$

где $K_{вг}$, $K_{в}$, $K_{ин}$, $K_{из}$ – коэффициенты, учитывающие природно-климатические условия, экологические факторы, инфляционную составляющую, интенсивность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект; H_i – таксы для исчисления размера вреда от сброса i -го вредного (загрязняющего) вещества в водные объекты, тыс. р./т; $M_i = Q(C_{фи} - C_{ди})T \cdot 10^{-6}$; M_i – масса сброшенного i -го вредного (загрязняющего) вещества определяется по каждому загрязняющему веществу, т; Q – расход подотвальных вод с превышением содержания i -го вредного (загрязняющего) вещества, м³/ч; $C_{фи}$ – средняя фактическая за период сброса концентрация i -го вредного (загрязняющего) за период времени T , мг/дм³; $C_{ди}$ – допустимая концентрация i -го вредного (загрязняющего) вещества, мг/дм³; T – продолжительность сброса подотвальных вод, час; 10^{-6} – коэффициент перевода массы вредного (загрязняющего) вещества в т.

Расход подотвальных вод в межень практически отсутствует, в паводок достигает 1250 м³/сут. Площадь отвала составляет 0,226 км². Количество осадков за 2019–2020 гг. составило 581–590 мм. При условии, что все выпавшие на площадь отвала осадки поступают в его тело, получаем, что среднегодовой расход подотвальных вод составляет 365 м³/сут (4,2 л/с).

Масса ежегодного выноса элементов 900 т, в том числе более 600 т железа, более 200 т алюминия, десятки килограммов меди, цинка, марганца (табл. 2).

Размер эколого-экономического ущерба (для элементов, превышающих ПДКрх), причиненного реке Лёвиха при поступлении в неё подотвальных вод, превышает 95 млн р. в год. Основной вклад вносят железо, алюминий, медь и цинк (табл. 2)

Таблица 2. Масса выноса элементов с подотвальными водами и размер экологического ущерба

Table 2. Mass of removal of elements with waste water and the amount of environmental damage

Загрязняющее вещество Contaminant	Среднее содержание, мг/л Average content, mg/L	Кратность ПДКрх MACfish multiplicity	Масса выноса (M_i), т/год Weight of removal (M_i), t/year	Ущерб, тыс. р. Damage, thousand rubles
Al	1535	38381	202	16240
As	0,5	10	0,06	53
Be	0,01	33	0,001	589
Cd	0,8	156	0,1	15073
Co	2,6	260	0,3	932
Cu	224	223835	29	2370
Zn	206	20554	27	2179
Fe	4791	47913	630	50689
Mn	88	8800	12	931
Ni	1,1	110	0,1	646
Se	0,08	39	0,01	5 457
Итого/Total			900	95160

Физико-химическое моделирование процессов формирования подотвальных вод Лёвихинского месторождения, выполненное с использованием программного кода Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1, показало, что загрязнение окружающей среды кислыми водами будет продолжаться сотни лет [21].

Внедрение современных технологий и технических решений позволит значительно снизить экологический ущерб р. Лёвиха.

Рекомендуемые мероприятия

Литературный поиск [22, 23] и анализ показал, что мероприятия по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду могут быть реализованы двумя способами: А – рекультивацией отвала; Б – сбором и очисткой подотвальных вод.

Мероприятие А – рекультивация отвалов

Рекультивация отвала может быть выполнена с использованием: варианта А1 – бентонитовых матов [24] или варианта А2 – грунтобетона [25].

Вариант А1. На техническом этапе рекультивации выполняется планировка поверхности, покрытие песчано-гравийной смесью, укладка экранизирующего слоя из бентонитовых матов «Bentizol» [26], нанесение искусственного субстрата из потенциально-плодородного грунта. На биологическом этапе рекультивации вносятся удобрения и осуществляется посев многолетних семян травосмеси (табл. 3).

Вариант А2. На техническом этапе после грубой и чистовой планировки укладывается экранизирующий слой из грунтобетона, сверху суглинок и почвенный слой. На биологическом этапе укладывается биополотно (табл. 3).

Таблица 3. Необходимое количество материалов и их экономические показатели для рекультивации отвала

Table 3. Required amount of materials and their economic indicators for dump reclamation

Материал/Material	Количество/Amount	Стоимость, тыс. р. /Cost, thous. rub.
Вариант А1 (бентонитовые маты)/Option 1 (bentonite mats)		
Песчано-гравийная смесь, м³ Sand and gravel mixture, m³	33900	15102
Бентонитовые маты «Bentizol» марки «SAB 5», га Bentonite mats "Bentizol" brand "SAB 5", ha	22,6	56500
Бентонитовые гранулы, т Bentonite granules, t	22	550
Объёмная георешетка Геотех® [27], га Geotech® volumetric geogrid [27], ha	6	11700
Искусственный субстрат (плодородный грунт), м³ Artificial substrate (fertile soil), m³	33900	43748
Удобрение, кг/Fertilizer, kg	2260	32
Семена травосмеси, кг Grass mixture seeds, kg	1582	221
Древесная мульча, кг/Wood mulch, kg	29380	4701
Вода для полива, л/Water for irrigation, L	135600	2
Итого/Total		132556
Вариант А2 (грунтобетон)/Option 2 (soil concrete)		
Грунтобетон, м³/Soil concrete, m³	33900	254000
Объёмная георешетка Геотех®, га Geotech® volumetric geogrid, ha	6	8370
Суглинок, м³/Loam, m³	67800	6102
Чернозём, м³/Chernozem, m³	113000	62150
Биополотно, га/Bioshelf, ha	22,6	28250
Итого/Total		358872

Затраты на рекультивацию отвала в зависимости от используемого материала различаются в 2,7 раза: 5,9 млн р. за 1 га по первому варианту и 15,9 млн р. за 1 га по второму варианту, поскольку грунтобетон более дорогой материал, чем бентонитовые маты. При этом срок службы обоих материалов при соблюдении всех требований при эксплуатации не менее 50 лет. Продолжительность реализации мероприятий 3–4 года.

Мероприятие Б – очистка подотвальных вод

В этом случае выполняется сбор подотвальных вод и их обработка на станции нейтрализации. Отечественный и мировой опыт показывает [28–39], что после нейтрализации всегда необходима доочистка путем отстаивания, так будет обеспечиваться осаждение металлов вследствие снижения скорости течения воды и увеличения времени взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами. Этот этап может выполняться с использованием одной из двух схем: варианта Б1 – аэротенков и радиальных отстойников, варианта Б2 – отстаивание в системе, состоящей из каскада прудов. В обеих схемах после очистки происходит сброс в р. Лёвиху.

В любой из предложенных схем для перекачки подотвальных вод необходимо оборудовать насосную станцию на восточной стороне провала ш. «Лёвиха XII», в котором собираются поверхностные и подотвальные воды. Для организации работы насосной станции необходимо провести воздушную линию электропередач, наземный/подземный напорный трубопровод диаметром 146 мм. Длина трубопровода до существующей станции нейтрализации 500 м. Капитальные затраты для постройки станции перекачки подотвальных вод составят 7,5 млн р., эксплуатационные – 3,6 млн р. в год в современных ценах без НДС.

Количество гашенной извести, необходимой для нейтрализации подотвальных вод и осаждения металлов, определяется по следующей формуле [40]:

$$G = k \frac{100}{B} Q(aA + b_1C_1 + b_2C_2 + \dots + b_nC_n),$$

где k – коэффициент запаса расхода реагента по сравнению с теоретическим ($k=1,1$ для известкового молока); B – количество активной части в товарном продукте (95 %); Q – объем подотвальных вод, подлежащих нейтрализации (133 тыс. м³/год); a – расход реагента для нейтрализации, г/кг; A – содержание серной кислоты, кг/м³; $C_1, C_2, \dots, C_n$ – концентрации металлов в подотвальной воде, кг/м³; $b_1, b_2, \dots, b_n$ – концентрации реагентов, требуемых для перевода металла из растворенного состояния в осадок, кг/кг.

На основании полученных результатов расчетов (табл. 4) можно сделать вывод о необходимости использования не менее 4 тыс. т извести в год.

Таблица 4. Расчёт количества гашенной извести

Table 4. Calculation of burnt lime quantity

Компоненты/Components	Концентрации до нейтрализации C, кг/м³ Concentrations before neutralization C, kg/m³	Расход Ca(OH)₂, кг/кг Ca(OH)₂ consumption, kg/kg	Количество гашенной извести G, т/год Burnt lime quantity G, t/year
Cu	0,2	1,16	3979
Zn	0,2	1,13	
Fe	4,8	1,32	
Ni	0,001	1,26	
SO₄	25	0,76	

Капитальные затраты на строительство станции нейтрализации (строительно-монтажные, подготовительные работы и приобретение оборудования) составляет 1,6 млн р. Эксплуатационные затраты (фонд оплаты труда, налоги, расходные материалы, электроэнергия, вода и известь порошкообразная) составят 43,7 млн р./год.

Вариант Б1. Поток кислых подотвальных вод и приготовленное на станции нейтрализации известковое молоко поступают в очистное сооружение, состоящее из аэратора FUCHS OxyStar Aerators типа OS 15 (11 kW) [41] и отстойника радиального типа OPC-65 со встроенной камерой флокуляции [42]. В качестве примера может служить станция очистки шахтных вод Цшельн (Tzschelln) (Саксония, Германия) [28].

После радиального отстойника очищенная вода по самотечному трубопроводу поступает в р. Лёви-ху и далее в р. Тагил.

Итоговая эффективность очистки подотвальных вод составляет 99,9 % [43], что позволяет очистить подотвальные воды от железа, марганца и сульфата до фоновых значений для р. Тагил. Однако после всей системы очистки всё ещё будут присутствовать повышенные концентрации меди и цинка (табл. 5).

Таблица 5. Изменение концентраций загрязняющих веществ после доочистки (вариант Б1, использование аэротенков и радиального отстойника)

Table 5. Changes in concentrations of pollutants after post-treatment (option B1, use of aeration tanks and radial settling tank)

Этапы очистки Treatment steps	Загрязняющие вещества Pollutants				
	Fe	Mn	Cu	Zn	SO ₄
	Содержание, мг/л Content, mg/L				
Подотвальные воды Waste waters	4791	88	224	206	24500
Выход после аэротенков Outlet after the aerotanks	47,9	0,9	2,2	2,0	245
Выход после радиального отстойника Outlet after the radial sump	0,5	0,01	0,02	0,02	2,5
Фоновые значения р. Тагил Background values of the Tagil River	0,5	0,03	0,004	0,01	18

Капитальные затраты на приобретение аэратора и радиального отстойника составляют 10,2 млн р. Эксплуатационные затраты в основном складываются из затрат на электроэнергию и составляют 0,7 млн р./год.

Вариант Б2 подразумевает доочистку кислых вод с помощью каскада прудов-осветлителей, ниже действующего в настоящее время. В результате будет обеспечиваться осаждение металлов вследствие снижения скорости течения воды и увеличения времени взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами.

Для оценки общей площади каскада прудов используется зависимость [44]:

$$A = \frac{Q_d(C_i - C_t)}{R_a},$$

где A – требуемая площадь пруда (м^2); Q_d – среднесуточный расход воды ($365 \text{ м}^3/\text{сут}$); C_i – концентрация загрязняющих веществ на входе, (мг/л); C_t – концентрации загрязняющих веществ при сбросе (мг/л); R_a – скорость удаления загрязняющих веществ (г/сут/м^2). Для обеспечения инженерного запаса при расчетах используются значения R_a для зимнего периода времени.

Необходимая площадь варьирует от 6,1 га (для цинка) до 31 га (для сульфата) (табл. 6, рис. 5). Водосбросы необходимо расположить в максимальном удалении друг от друга для увеличения времени отстаивания воды и эффективности прудов.

Таблица 6. Расчетные показатели площадей водоемов

Table 6. Calculated indicators of the area of water reservoirs

Компоненты Components	Концентрации, мг/л Concentration, mg/L		Скорость удаления R_a , г/сут/м ² Removal rate R_a , g/day/m ²	Требуемая площадь A , м ² Required area A , m ²
	на входе at the input C_i^*	на сбросе at the reset C_t^{**}		
Fe	2396	0,5	10	87436
Mn	47	0,03	0,22	779-8
Cu	72	0,004	0,10	262785
Zn	101	0,01	0,60	61436
SO ₄	9065	100***	10,54	310458

Примечание: *среднегодовое значение на сбросе из пруда-осветлителя; **фоновые значения концентрации в верховьях реки Тагил; ***ПДК_{рх}.

Note: *annual average value at the discharge from the clarifier pond; **background values of concentrations in the upper reaches of the Tagil river; ***MAC_{fish}.

Затраты на сооружение каскада прудов общей площадью 31 га составят 66 млн р. в современных ценах без НДС.

Приобретение аэротенков и радиального отстойника обойдется дешевле в 4 раза, чем строительство каскада прудов, при этом эксплуатационные затраты практически не отличаются. Предположительная продолжительность заполнения каскада прудов шламом составляет 50 лет.

Итоговые экономические показатели по выше-рассмотренным мероприятиям представлены на рис. 6. Затраты на рекультивацию отвала по варианту А1 составляют 133 млн р., по варианту А2 – 359 млн р. При очистке подотвальных вод по варианту Б1 капитальные затраты составят 19 млн р., а эксплуатационные затраты – 48 млн р./год, при этом по варианту Б2 капитальные затраты выше – 75 млн р., а эксплуатационные такие же – 47 млн р./год.

Для оценки экономических затрат в долгосрочной перспективе был построен график кумулятивных затрат для всех вариантов (рис. 7).

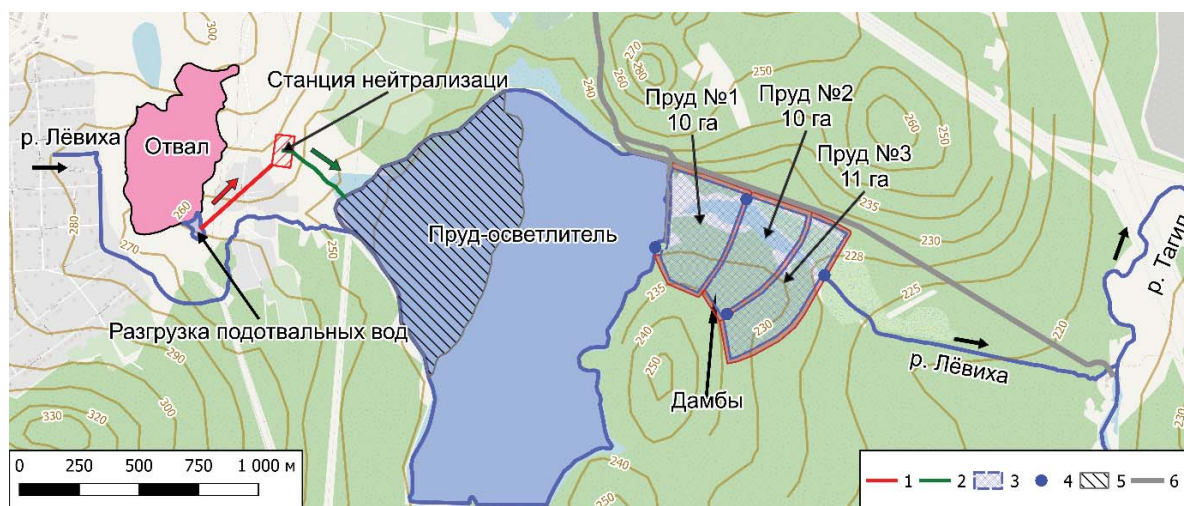


Рис. 5. Карта-схема размещения каскада прудов в долине р. Лёвихи: 1 – перекачка подотвальных вод на станцию нейтрализации; 2 – сброс нейтрализованной воды; 3 – проектируемые пруды; 4 – водосбросы; 5 – пляж пруда-осветлителя; 6 – дороги

Fig. 5. Schematic map of the ponds cascade location in the Levikha river valley: 1 – pumping of waste water to the neutralization station; 2 – neutralized water discharge; 3 – projected ponds; 4 – spillways; 5 – beach of the clarifier pond; 6 – roads



Рис. 6. Итоговые экономические показатели всех мероприятий по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду: КЗ – капитальные затраты; ЭЗ – эксплуатационные затраты, млн р.

Fig. 6. Final economic indicators of all measures to minimize the impact of waste water on the environment: КЗ (CC) – capital costs; ЭЗ (OC) – operating costs

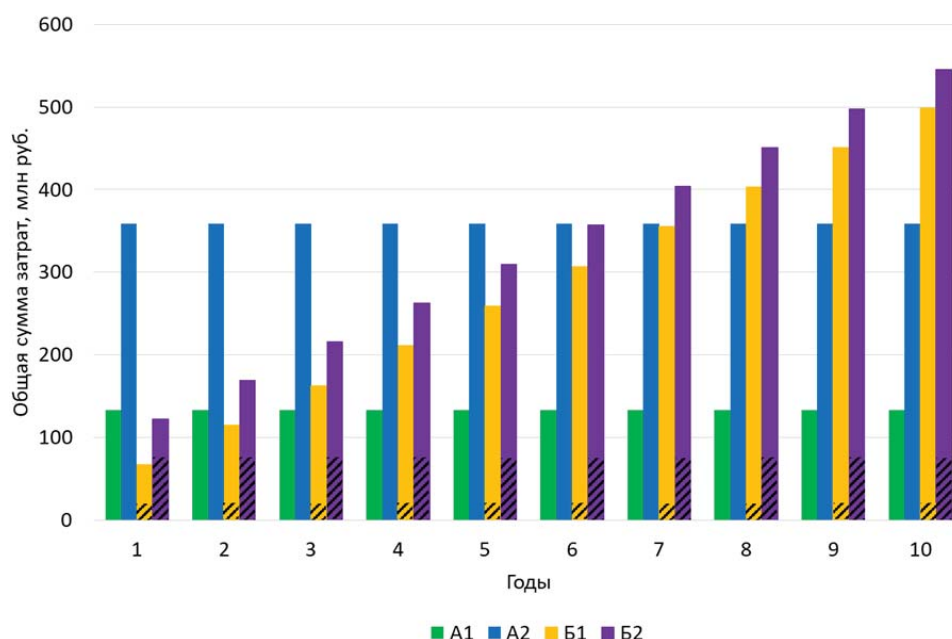


Рис. 7. Кумулятивные затраты: штриховкой выделены капитальные затраты

Fig. 7. Cumulative costs: capital expenditures are highlighted by shading

Все рассмотренные варианты с точки зрения экологии эффективны: ожидается как полное прекращение образования подотвальных вод (мероприятие А), так и их поступление в р. Лёвиху (мероприятие Б). Однако экономический аспект тоже не маловажный. Допустим ситуацию, когда были реализованы все четыре варианта. Очистка подотвальных вод (мероприятие Б) потребует меньше капитальных затрат, чем рекультивация отвала (мероприятие А). Тем не менее в первый год эксплуатации общие затраты на рекультивацию отвала не будут меняться (только капитальные), а общие затраты на очистку подотвальных вод будут увеличиваться из-за присутствия эксплуатационных затрат. И так год за годом. В отличие от очистки подотвальных вод любым рассмотренным вариантом, рекультивация отвала с использованием бентонитовых матов окажется дешевле уже на 3 год эксплуатации, а с использованием грунтобетона – на 8 год (рис. 7).

Выводы

1. Подотвальные воды сильно кислые (до $\text{pH}=1,92$) и минерализованные (от 13 до 52 г/л), состав сульфатный магниевый-алюминиево-железистый с высокими содержаниями меди (до 332200 ПДК_{рх}), цинка (до 30370 ПДК_{рх}), марганца (до 13460 ПДК_{рх}) и кобальта (до 260 ПДК_{рх}). Расход во время паводка достигает 1250 м³/сут.
2. В химическом составе пород отвала присутствуют элементы I–III класса опасности, превышающие ПДК для почв: медь (до 60 ПДК_п), цинк (до 37 ПДК_п), мышьяк (до 33 ПДК_п), кадмий (до 10 ПДК_п).
3. Ежегодно с отвала выносятся 900 т элементов, в том числе железо, алюминий, медь, цинк и марганец. Физико-химическое моделирование показало, что вынос элементов будет продолжаться ещё сотни лет. Экологический ущерб составляет более 95 млн р. в год.
4. Мероприятия по минимизации воздействия подотвальных вод на окружающую среду могут быть реализованы двумя способами: А – рекультивацией отвала; Б – очисткой подотвальных вод. По каждому способу было рассмотрено два варианта. Рекультивации отвала может быть выполнена с использованием: варианта А1 – бентонитовых матов или варианта А2 – грунтобетона. Для очистки кислых подотвальных вод была рассмотрена следующая технологическая цепочка: сбор и нейтрализация. Для доочистки возможно использование аэротенков и радиальных отстойников (вариант Б1) либо отстаивание в существующем пруду-осветлителе и в каскаде прудов (вариант Б2).
5. Затраты на рекультивацию отвала в зависимости от используемых материалов составляют (за 1 га) 5,9 млн р. при использовании бентонитовых матов и 15,9 млн р. при использовании грунтобетона. Срок их службы не менее 50 лет.
6. Капитальные затраты для очистки подотвальных вод при использовании каскада прудов в 3,9 раза выше, чем при использовании аэротенков и радиальных отстойников, а эксплуатационные практически равны.
7. Во всех вышерассмотренных вариантах мероприятий по минимизации воздействия кислых подотвальных вод на гидросферу подразумевается полное прекращение попадания кислой подотвальной воды в р. Лёвиху или же её очистку до фоновых показателей р. Тагил перед сбросом в неё. Следовательно, экологическую эффективность рассмотренных вариантов в денежном эквиваленте можно считать равной 95 млн р. в год.
8. Экономически выгодным и экологически эффективным мероприятием по минимизации воздействия кислых подотвальных вод Лёвихинского медноколчеданного рудника на гидросферу является рекультивация отвала с использованием бентонитовых матов. Это приведет к полному прекращению попадания кислых подотвальных вод в р. Лёвиху при затратах 133 млн р., срок реализации 3–4 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mayes W.M., Potter H.A.B., Jarvis A.P. Inventory of aquatic contaminant flux arising from historical metal mining in England and Wales // *Science of The Total Environment*. – 2010. – Vol. 408. – P. 3576–3583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.04.021.
2. Quantifying system disturbance and recovery from historical mining-derived metal contamination at Brotherswater, northwest England / D.N. Schillereff, R.C. Chiverrell, N. Macdonald, J.M. Hooke, K.E. Welsh // *J Paleolimnol*. – 2016. – Vol. 56. – P. 205–221. DOI: 10.1007/s10933-016-9907-1.
3. Geochemistry of trace metals and rare earth elements in stream water, stream sediments and acid mine drainage from Darrehzar copper mine, Kerman, Iran / N. Soltani, F. Moore, B. Keshavarzi, R. Sharifi // *Water Qual Expo Health*. – 2014. – Vol. 6. – P. 97–114. DOI: 10.1007/s12403-014-0114-x.
4. Bird G. The influence of the scale of mining activity and mine site remediation on the contamination legacy of historical metal mining activity // *Environ Sci Pollut Res*. – 2016. – Vol. 23. – P. 23456–23466. DOI: 10.1007/s11356-016-7400-z.
5. Assessment of soil and water contamination at the Tab-Simco coal mine: a case study / A. RoyChowdhury, D. Sarkar, Y. Deng, R. Datta // *Mine Water Environ*. – 2017. – Vol. 36. – P. 248–254. DOI: 10.1007/s10230-016-0401-9.
6. Temporal fluctuations in water contamination from abandoned pyrite Wisciszowice mine (Western Sudetes, Poland) / M.R. Costa, H. Marszalek, E.F. da Silva, A. Mickiewicz, M. Wasik, C. Candeias // *Environ Geochem Health*. – 2021. – Vol. 43. – P. 3115–3132. DOI: 10.1007/s10653-021-00809-1.

7. Molenda T., Kidawa J. Natural and anthropogenic conditions of the chemical composition of pit lake waters (based on example pit lakes from central Europe) // *Mine Water Environ.* – 2020. – Vol. 39. – P. 473–480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00660-3>.
8. Федеральный закон от 10 января 2002 г. N 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изменениями на 8 августа 2024 года). Принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года.
9. Техногенные месторождения Урала и оценка их воздействия на окружающую среду / С.И. Мормиль, В.И. Сальников, Л.А. Амосов, Г.Г. Хасанова, А.И. Семячков, Б.Б. Зобнин, А.В. Бурмистренко / под ред. Ю.А. Боровкова. – Екатеринбург: НИИ-Природа, ДПР по Уральскому региону, ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ, 2002. – 206 с.
10. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Снижение негативного влияния законсервированного медноколчеданного рудника Урала на состояние гидросферы // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2022. – № 3. – С. 194–201. DOI: 10.15372/FTPRPI20220318.
11. Nordstrom D., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // *Applied Geochemistry.* – 2015. – Vol. 57. – P. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>.
12. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия.* – 2019. – Т. 64. – № 3. – С. 282–299. DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299.
13. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. – Свердловск: Изд-во УрГУ, 1991. – 256 с.
14. Алексеев В.А. Причины образования кислых дренажных вод в отвалах сульфидсодержащих пород // *Геохимия.* – 2022. – Т. 67. – № 1. – С. 69–83. DOI: 10.31857/S0016752522010022.
15. Effect of ore mineralogy and bedrock lithology on metal loading rates and acid-mine drainage: Bayhorse creek, Idaho and the North Fork of the American Fork River, Utah / T.E. Lachmar, H.L. McDonough, N.I. Burk, P.T. Kolesar // *Mine Water Environ.* – 2019. – Vol. 38. – P. 3–15. DOI: 10.1007/s10230-018-00574-1.
16. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
17. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2020. – 57 с.
18. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. – М.: Изд-во ВНИРО, 2011. – 257 с.
19. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: введён в действие с постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 2.
20. Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. – М.: Министерство природных ресурсов, 2009. – 41 с.
21. 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. – Vol. 17. – P. 857–860. DOI: 10.1016/j.proeps.2017.01.038.
22. Рекультивация породного отвала ОАО Шахта «Капитальная» Кемеровской области / А.Е. Некрасова, Е.Г. Бобренко, А.И. Кныш, В.И. Сологаев // *Вестник ОмГАУ.* – 2016. – Т. 21. – № 1. – С. 154–160.
23. Шелканов Н.С., Овешников Ю.М., Субботин Ю.В. Рекультивация отвалов вскрышных пород на угольных разрезах Забайкальского края // *Вестник ЗабГУ.* – 2012. – Т. 18. – № 11. – С. 28–33.
24. Способ рекультивации хвостохранилищ: пат. № 2643038, Российская Федерация, С1; заявл. 13.06.2017; опубл. 30.01.2018, Бюл. № 4. – 12 с.
25. Ульрих Д.В. Научное обоснование и разработка технологий комплексного восстановления техногенно-нарушенных территорий в районах добычи и переработки медных руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2020. – 44 с.
26. ООО «БентИзол». URL: <https://bentizol.ru/> (дата обращения: 17.03.2024).
27. Компания «Геотех». URL: <https://www.geotx.ru/> (дата обращения: 17.03.2024).
28. FUCHS Mine Water Treatment. Case Studies, 2021. URL: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_Mine_Water_Treatment_Case_Studies_2021-01.pdf (дата обращения 16.03.2024).
29. Информационное агентство «URA.RU». URL: <https://ura.news/news/1052441120> (дата обращения 16.03.2024).
30. Karaca O., Cameselle C., Reddy K.R. Acid pond sediment and mine tailings contaminated with metals: physicochemical characterization and electrokinetic remediation // *Environ Earth Sci.* – 2017. – Vol. 76. – № 408. DOI: 10.1007/s12665-017-6736-0.
31. Sandhya B., Tarun K.B. Phytoremediation of the coalmine effluent // *Ecotoxicology and Environmental Safety.* – 2012. – Vol. 81. – P. 36–42. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.04.009.
32. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Removal of acidity and metals from acid mine drainage-impacted water using industrial byproducts // *Environmental Management.* – 2019. – Vol. 63. – P. 148–158. DOI: 10.1007/s00267-018-1112-8.
33. Choi H.J. Biosorption of heavy metals from acid mine drainage by modified sericite and microalgae hybrid system // *Water Air Soil Pollut.* – 2015. – Vol. 226. – № 185. DOI: 10.1007/s11270-015-2433-3.
34. Etale A., Tutu H., Drake D.C. Application of maghemite nanoparticles as sorbents for the removal of Cu(II), Mn(II) and U(VI) ions from aqueous solution in acid mine drainage conditions // *Applied Water Sci.* – 2016. – Vol. 6. – P. 187–197. DOI: 10.1007/s13201-014-0217-3.
35. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Remediation of acid mine drainage-impacted water // *Curr Pollution Rep.* – 2015. – Vol. 1. – P. 131–141. DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3.
36. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review / N.D. Nnaji, H. Onyeaka, T. Miri, C. Ugwa // *SN Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 5. – № 125. DOI: 10.1007/s42452-023-05351-6.
37. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки / А.А. Куликова, Ю.А. Сергеева, Т.И. Овчинникова, Е.И. Хабарова // *ГИАБ.* – 2020. – № 7. – С. 135–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.

38. Geochemical behaviour of rare earth elements throughout an acid mine drainage passive treatment system in the Lousal mine area, Portugal / C. Obregon-Castro, M.I. Prudencio, C. Diamantino, E. Carvalho, D. Russo, R. Marques // *Mine Water Environ.* – 2023. – Vol. 42. – P. 533–545. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00954-2>.
39. Nordstrom D. Geochemical modeling of iron and aluminum precipitation during mixing and neutralization of acid mine drainage // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – № 547. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10060547>.
40. Филиппов В.Н., Зиновьев А.П., Рыжов Г.И. Оборудование и технология очистки сточных вод, примеры расчета. – Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2003. – 299 с.
41. FUCHS OxyStar Aerator Brochure EN 2020-11. URL: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_OxyStar_Aerator_Brochure_EN_2020-11.pdf (дата обращения 16.03.2024).
42. НПО ЭКОСИСТЕМА. Отстойник радиальный высокой производительности для очистки сточных вод – ОРСВ. URL: https://eco-systema.com/productions/modules/Otstoynik_ORSV/ (дата обращения 16.03.2024).
43. Долина Л.Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов. – Днепропетровск: Континент, 2008. – 255 с.
44. PIRAMID Consortium. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage" (PIRAMID). – Newcastle Upon Tyne UK: University of Newcastle Upon Tyne, 2003. – 166 p.

Информация об авторах

Людмила Сергеевна Рыбникова, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; luserib@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

Пётр Андреевич Рыбников, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; ribnikoff@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

Айнур Нафисович Галин, младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; aunur.galin.1997@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7090-0379>

Поступила в редакцию: 25.12.2023

Поступила после рецензирования: 02.05.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. Mayes W.M., Potter H.A.B., Jarvis A.P. Inventory of aquatic contaminant flux arising from historical metal mining in England and Wales. *Science of The Total Environment*, 2010, vol. 408, pp. 3576–3583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.04.021.
2. Schillereff D.N., Chiverrell R.C., Macdonald N., Hooke J.M., Welsh K.E. Quantifying system disturbance and recovery from historical mining-derived metal contamination at Brotherswater, northwest England. *J Paleolimnol*, 2016, vol. 56, pp. 205–221. DOI: 10.1007/s10933-016-9907-1.
3. Soltani N., Moore F., Keshavarzi B., Sharifi R. Geochemistry of trace metals and rare earth elements in stream water, stream sediments and acid mine drainage from Darrehzar copper mine, Kerman, Iran. *Water Qual Expo Health*, 2014, vol. 6, pp. 97–114. DOI: 10.1007/s12403-014-0114-x.
4. Bird G. The influence of the scale of mining activity and mine site remediation on the contamination legacy of historical metal mining activity. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, vol. 23, pp. 23456–23466. DOI: 10.1007/s11356-016-7400-z.
5. RoyChowdhury A., Sarkar D., Deng Y., Datta R. Assessment of soil and water contamination at the Tab-Simco coal mine: a case study. *Mine Water Environ*, 2017, vol. 36, pp. 248–254. DOI: 10.1007/s10230-016-0401-9.
6. Costa M.R., Marszalek H., Da Silva E.F., Mickiewicz A., Wasik M., Candeias C. Temporal fluctuations in water contamination from abandoned pyrite Wisciszowice mine (Western Sudetes, Poland). *Environ Geochem Health*, 2021, vol. 43, pp. 3115–3132. DOI: 10.1007/s10653-021-00809-1.
7. Molenda T., Kidawa J. Natural and anthropogenic conditions of the chemical composition of pit lake waters (based on example pit lakes from central Europe). *Mine Water Environ*, 2020, vol. 39, pp. 473–480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00660-3>.
8. *Federal Law of January 10, 2002 N 7-FL «On Environmental Protection» (as amended on August 8, 2024)*. Adopted by the State Duma on December 20, 2001.
9. Mormil S.I., Salnikov V.I., Amosov L.A., Khasanova G.G., Semyachkov A.I., Zobnin B.B., Burmistrenko A.V. *Technogenic deposits of the Urals and assessment of their impact on the environment*. Ekaterinburg, NIA-Priroda, DPR for the Ural Region, VNIIZARUBEZHGEOLGIA Publ., 2002. 206 p. (In Russ.)
10. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu. Reduction of the negative impact of the mothballed copper-coal mine of the Urals on the state of the hydrosphere. *Physico-technical problems of mineral resources development*, 2022, no. 3, pp. 194–201. (In Russ.) DOI: 10.15372/FTPRPI20220318.
11. Nordstrom D., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>.

12. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Regularities of groundwater quality formation at the worked-out copper-coal mines of the Levikha ore field (Middle Urals, Russia). *Geochemistry*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 282–299. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299.
13. Emlin E.F. *Technogenesis of the Ural's sinter deposits*. Sverdlovsk, UrSU Publ., 1991. 256 p. (In Russ.)
14. Alexeev V.A. Causes of acid drainage water formation in the dumps of sulfide-bearing rocks. *Geochemistry*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 69–83. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016752522010022.
15. Lachmar T.E., McDonough H.L., Burk N.I., Kolesar P.T. Effect of ore mineralogy and bedrock lithology on metal loading rates and acid-mine drainage: Bayhorse creek, Idaho and the North Fork of the American Fork River, Utah. *Mine Water Environ*, 2019, vol. 38, pp. 3–15. DOI: 10.1007/s10230-018-00574-1.
16. SS 17.4.4.02-2017. *Nature conservation. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis*. Moscow, Standardinform Publ., 2017. 12 p. (In Russ.)
17. SS P 59024-2020. *Water. General requirements for sampling*. Moscow, Standardinform Publ., 2020. 57 p. (In Russ.)
18. *Norms of water quality of water bodies of fishery significance, including norms of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance*. Moscow, VNIRO Publ., 2011. 257 p. (In Russ.)
19. SanPiN 1.2.3685-21. *Hygienic norms and requirements to ensure the safety and (or) harmlessness to humans of habitat factors: enacted by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on January 28, 2021. no. 2*. (In Russ.)
20. *Methodologies for calculating the amount of damage caused to water bodies due to violation of water legislation*. Moscow, Ministry of Natural Resources Publ., 2009. 41 p. (In Russ.)
21. 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, vol. 17, pp. 857–860. DOI: 10.1016/j.proeps.2017.01.038.
22. Nekrasova A.E., Bobrenko E.G., Knysh A.I., Sologayev V.I. Recultivation of the rock dump of JSC Mine "Kapitalnaya" Kemerovo region. *Vestnik OmGAU*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 154–160. (In Russ.)
23. Schelkanov N.S., Oveshnikov Yu.M., Subbotin Yu.V. Recultivation of overburden dumps at coal mines of Zabaikalsky Krai. *Vestnik ZabGU*, 2012, vol. 18, no. 11, pp. 28–33. (In Russ.)
24. Pashkevich M.A., Smirnov Y.D., Kremcheev E.A., Nagornov D.O., Afanasiadi. *Method of reclamation of tailing dumps*. Patent RF, no. 2643038, 2018. (In Russ.)
25. Ulrich D.V. *Scientific substantiation and development of technologies for integrated restoration of technogenically disturbed territories in the areas of mining and processing of copper ores*. Dr. Diss. Abstract. Moscow, 2020. 44 p.
26. «BentIsol» LLC. Available at: <https://bentisol.ru/> (accessed 17 March 2024).
27. «Geotech» Company. Available at: <https://www.geotx.ru/> (accessed 17 March 2024).
28. FUCHS Mine Water Treatment. *Case Studies*, 2021. Available at: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_Mine_Water_Treatment_Case_Studies_2021-01.pdf (accessed 16 March 2024).
29. «URA.RU» News Agency. Available at: <https://ura.news/news/1052441120> (accessed 16 March 2024).
30. Karaca O., Cameselle C., Reddy K.R. Acid pond sediment and mine tailings contaminated with metals: physicochemical characterization and electrokinetic remediation. *Environ Earth Sci*, 2017, vol. 76, no. 408. DOI: 10.1007/s12665-017-6736-0.
31. Sandhya B., Tarun K.B. Phytoremediation of the coalmine effluent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, vol. 81, pp. 36–42. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.04.009.
32. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Removal of acidity and metals from acid mine drainage-impacted water using industrial byproducts. *Environmental Management*, 2019, vol. 63, pp. 148–158. DOI: 10.1007/s00267-018-1112-8.
33. Choi H.J. Biosorption of heavy metals from acid mine drainage by modified sericite and microalgae hybrid system. *Water Air Soil Pollut*, 2015, vol. 226, no. 185. DOI: 10.1007/s11270-015-2433-3.
34. Etale A., Tutu H., Drake D.C. Application of maghemite nanoparticles as sorbents for the removal of Cu(II), Mn(II) and U(VI) ions from aqueous solution in acid mine drainage conditions. *Applied Water Sci*, 2016, vol. 6, pp. 187–197. DOI: 10.1007/s13201-014-0217-3.
35. RoyChowdhury A., Sarkar D., Datta R. Remediation of acid mine drainage-impacted water. *Curr Pollution Rep*, 2015, vol. 1, pp. 131–141. DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3.
36. Nnaji N.D., Onyeaka H., Miri T., Ugwa C. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Appl. Sci*, 2023, vol. 5, no. 125. DOI: 10.1007/s42452-023-05351-6.
37. Kulikova A.A., Sergeeva Yu.A., Ovchinnikova T.I., Khabarova E.I. Formation of mine waters and analysis of methods of their treatment. *GIAB*, 2020, no. 7, pp. 135–145. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.
38. Obregon-Castro C., Prudencio M.I., Diamantino C., Carvalho E., Russo D., Marques R. Geochemical behaviour of rare earth elements throughout an acid mine drainage passive treatment system in the Lousal mine area, Portugal. *Mine Water Environ*, 2023, vol. 42, pp. 533–545. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00954-2>.
39. Nordstrom D. Geochemical modeling of iron and aluminum precipitation during mixing and neutralization of acid mine drainage. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 547. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10060547>.
40. Filippov V.N., Zinoviev A.P., Ryzhov G.I. *Equipment and technology of wastewater treatment, calculation examples*. Ufa, Ufa State Petroleum Technical University Publ., 2003. 299 p. (In Russ.)
41. FUCHS OxyStar Aerator Brochure EN 2020-11. Available at: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_OxyStar_Aerator_Brochure_EN_2020-11.pdf (accessed 16 March 2024).
42. NPO ECOSYSTEM. *High capacity radial settling tank for wastewater treatment – OPCW*. (In Russ.) Available at: https://ecosystema.com/productions/modules/Otstoynik_ORSV/ (accessed 16 March 2024).
43. Dolina L.F. *Modern techniques and technologies for wastewater treatment from heavy metal salts*. Dnepropetrovsk, Continent Publ., 2008. 255 p. (In Russ.)
44. PIRAMID Consortium. *Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage" (PIRAMID)*. Newcastle Upon Tyne UK, University of Newcastle Upon Tyne, 2003. 166 p.

Information about the authors

Liudmila S. Rybnikova, Dr. Sc., Chief Scientific Associate, Institute of Mining UB RAS, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; luserib@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

Petr A. Rybnikov, Cand. Sc., Leading Researcher, Head of Laboratory of Geoinformation and Digital Technologies in Subsoil Use, Institute of Mining UB RAS, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; ribnikoff@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

Aynur N. Galin, Junior Researcher, Institute of Mining UB RAS, 58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russian Federation; aynur.galin.1997@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7090-0379>

Received: 25.12.2023

Revised: 02.05.2024

Accepted: 24.01.2025