

УДК 504.4.054:622:553.45 (571.62):004.94
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4849
Шифр специальности ВАК: 03.02.08
Научная статья

Очистка техногенных вод хвостохранилища полиметаллических руд методом искусственных геохимических барьеров

К.Р. Фролов[✉], П.Д. Ориничева, П.М. Артемов, В.С. Цыганок, В.Г. Харченко

Дальневосточный федеральный университет, Россия, г. Владивосток

[✉]konstantin.fk@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости снижения негативного воздействия дренажных вод хвостохранилищ на природные поверхностные воды рыбохозяйственного значения, а также минимизации канцерогенных рисков для здоровья населения. *Цель.* Оценить возможность снижения концентрации канцерогенных элементов и превышающих нормативные значения веществ в сбросах техногенных вод действующего хвостохранилища за счет их очистки методом искусственных геохимических барьеров. *Методы.* Экологический мониторинг, анализ гидрохимических проб методами ИСП-МС и ИСП-АЭС, оценка риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, расчетные методы. *Результаты и выводы.* Представлены результаты эксперимента по очистке техногенных вод действующего хвостохранилища полиметаллических руд Дальнегорского рудного района на модельной лабораторной установке искусственных геохимических барьеров. Суть работы заключалась в фильтрации в динамическом режиме гидрохимических проб дренажных вод Центральной обогатительной фабрики ГМК «Дальполиметалл» в стеклянных трубках через предлагаемые материалы искусственных геохимических барьеров – образцы почв рассматриваемого района (бурозём и подбел), а также коммерческий образец карбонатного сорбента таурит. Анализ гидрохимических проб техногенных вод и собранного с установки фильтрата, проведенный методами ИСП-МС и ИСП-АЭС, продемонстрировал общую эффективность их очистки от веществ, превышающих значения ПДК_{рыб.хоз.}: Мп – более чем в 10, Cu – 9,5, Zn – 30,5 раз. Оценка канцерогенных рисков для здоровья населения показала, что в случае применения сорбента таурит их значения снижаются до 9,6 раз – с третьего до второго диапазона приемлемости. Расчет класса опасности материалов барьера после очистки техногенных вод позволил установить соответствие образцов IV классу опасности – малоопасным отходам; ставка за их размещение в виде производственных отходов составляет 835,6 р. за 1 т. Для дальнейших масштабных экспериментов в отношении техногенных вод в работе определены и представлены характеристики насыпной плотности и объемного расхода всех рассмотренных материалов искусственных геохимических барьеров.

Ключевые слова: искусственные геохимические барьеры, загрязнение природных вод, техногенные воды хвостохранилищ, оценка рисков для здоровья населения, класс опасности отходов, Дальнегорский рудный район, р. Рудная

Для цитирования: Очистка техногенных вод хвостохранилища полиметаллических руд методом искусственных геохимических барьеров / К.Р. Фролов, П.Д. Ориничева, П.М. Артемов, В.С. Цыганок, В.Г. Харченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 35–45. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4849

UDC 504.4.054: 622:553.45 (571.62):004.94
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4849
Scientific paper

Treatment of polymetallic ore tailing dump technogenic waters using artificial geochemical barriers

K.R. Frolov[✉], P.D. Orinicheva, P.M. Artemov, V.S. Tsyganok, V.G. Kharchenko

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

[✉]konstantin.fk@gmail.com

Abstract. Relevance. It is imperative to mitigate the detrimental impact of drainage waters from polymetallic ore tailings deposits on natural surface waters of significant ecological and economic value, while concurrently reducing the carcinogenic risks to public health. **Aim.** To evaluate the possibility of reducing the concentration of carcinogenic elements and substances exceeding the normative values in the discharges of technogenic waters from the operating tailing dump by means of their purification using artificial geochemical barriers. **Methods.** Environmental monitoring, analysis of hydrochemical samples by ICP-MS and ICP-AES methods, assessment of the risk to public health posed by chemical substances, calculation methods. **Results and conclusions.** The paper presents the results of the experiment on purification of technogenic waters of the operating tailing pond of polymetallic ores of Dalnegorsk ore district on the model laboratory installation of artificial geochemical barriers. The essence of the study was to filter in dynamic mode hydrochemical samples of drainage water from the Central Concentrating Mill of Dalpolymetal in glass tubes through the proposed materials of artificial geochemical barriers – soil samples of the area under consideration (borozem and podbel), as well as a commercial sample of carbonate sorbent taurite. The analysis of hydrochemical samples of technogenic waters and leachate collected from the plant, carried out by ICP-MS and ICP-AES methods, demonstrated the overall efficiency of their purification from substances exceeding MAC values: Mn – more than 10 times, Cu – 9.5 times, Zn – 30.5 times. Assessment of carcinogenic risks for public health showed that in case of application of taurite sorbent their values are reduced up to 9.6 times – from the third to the second range of acceptability. Calculation of the hazard class of the barrier materials after treatment of technogenic waters allowed establishing the compliance of the samples with the IV class of hazard – low-hazard waste; the rate for their disposal as industrial waste is 835.6 rubles per 1 tone. For further large-scale experiments in relation to technogenic waters, the characteristics of bulk density and volumetric flow rate of all considered materials of artificial waters were determined and presented in the work.

Keywords: artificial geochemical barriers, natural waters pollution, technogenic tailings water, public health risk assessment, waste hazard class, Dalnegorsk ore district, Rudnaya River

For citation: Frolov K.R., Orinicheva P.D., Artemov P.M., Tsyganok V.S., Kharchenko V.G. Treatment of polymetallic ore tailing dump technogenic waters using artificial geochemical barriers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 35–45. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4849

Введение

Дальнегорский рудный район расположен на юге Дальнего Востока, в территориальных границах Дальнегорского городского округа Приморского края (рис. 1). Добыча полезных ископаемых здесь ведется с 1907 г., в результате чего сформировалось три горнопромышленных техногенных системы: Краснореченской и Центральной обогатительной фабрик (КОФ и ЦОФ), а также система Бор. В настоящий момент в районе функционируют две

обогатительные фабрики: Центральная, на которой перерабатываются полиметаллические руды (ГМК «Дальполиметалл»), и Бор (Дальнегорский ГОК), где из боросиликатной руды производится борная кислота и борный ангидрид. Закрытый рудник, разрушенная фабрика и два хвостохранилища (ХВ) оловосульфидных руд техногенной системы КОФ в соответствии с [1] могут рассматриваться как объекты накопленного вреда окружающей среде.

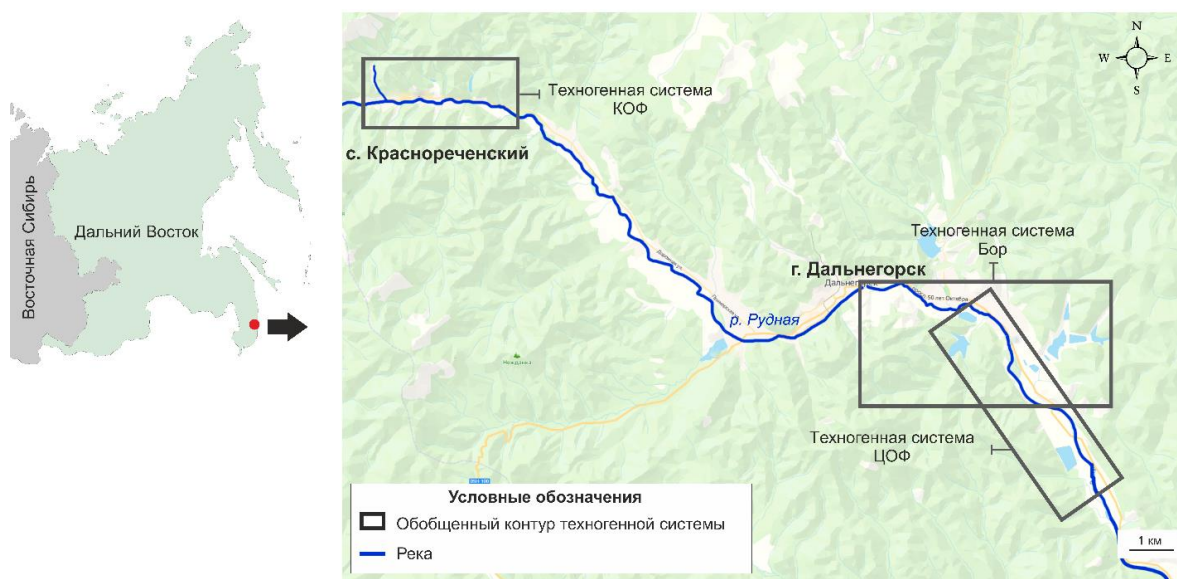


Рис. 1. Географическое положение Дальнегорского рудного района
Fig. 1. Dalnegorsk ore district geographical location

Исследования гипергенных процессов показывают, что взаимодействие агентов выветривания с рудами в горных выработках [2–8], а также с хвостами обогащения в хвостохранилищах приводит к формированию техногенных растворов: рудничных, шламовых и дренажных вод с токсическими содержаниями широкого спектра рудных и элементов вмещающих их пород [9–15]. Их сброс в природные водные объекты является ключевой причиной негативных изменений естественного геохимического фона рудных районов [16–22], что приводит не только к нарушению нормативов качества воды природных объектов, но также повышает риски для здоровья населения [23–28].

В этой связи становится очевидной необходимость очистки техногенных стоков как функционирующих горнорудных предприятий, так и объектов накопленного вреда – безнадзорных разрушенных горнорудных предприятий. Одним из эффективных способов очистки многотоннажных техногенных вод является метод искусственных геохимических барьеров [29–32], который приводится в [33].

Экологический мониторинг техногенных вод и состояния природных водных объектов проводится коллективом авторов более 20 лет. В предыдущих исследованиях [18, 19, 22, 34, 35] установлено, что, являясь главной водной артерией Дальнегогорского района, р. Рудная принимает техногенные стоки перечисленных выше систем, и интенсивность их негативного воздействия на природные воды непрерывно повышается. Так, максимальные превышения фоновых значений в 2018 г. по сравнению с 2012 г. [18] выросли (раз): по Zn – с 25 до 7575, Cu – с 14 до 29, Pb – с 240 до 1280, Fe – с 13 до 989, Mn – с 87 до 9190 и Al – с 19 до 227. Превышение значений ПДК_{рыб.-хоз.} большинства рассмотренных элементов с 2012 по 2018 гг. в воде р. Рудной составило (раз): по Zn – от 1,5 до 606, Cu – 1,0–4,0, Pb – 1,2–10,7, Fe – 3,0–2372,2, Mn – 3,3–357,4, Al – 3,1–59,6, As – 4,0–6,6 и В – 2,1–28,4, в то время как с 2001 по 2011 гг. максимальные превышения этого норматива были ниже: по Zn – в 19, Pb – 2, Fe – 5, Mn – 2, Al – 5 и В в 11 раз [18]. Моделирование процессов, протекающих на геохимических барьерах «техногенные – природные воды р. Рудная», позволило определить распределение элементов сульфидных руд в летний и осенний (S>Zn>As>Cu для ЦОФ и S>Zn>Pb>Cu>As – КОФ), а также зимний периоды 2018–2019 гг. (S>Cu>Zn>As и S>Zn>Cu>As, соответственно) [22].

Цель данной работы – оценить возможность снижения концентрации канцерогенных элементов и загрязняющих веществ, превышающих нормативные значения, в сбросах техногенных вод действующего хвостохранилища за счет их очистки методом искусственных геохимических барьеров.

Методология эксперимента

Методология эксперимента включала несколько стадий: 1) отбор и анализ гидрохимических проб, а также оценку их соответствия нормативным требованиям; 2) подготовку модельной установки искусственных геохимических барьеров; 3) очистку гидрохимических проб на установке; 4) химический анализ проб фильтрата и материала искусственных геохимических барьеров; 5) оценку возможности очистки техногенных вод и расчет класса опасности материала искусственных геохимических барьеров.

На *первом этапе* работы в Дальнегорском районе в 2021 г., согласно схеме, приведенной на рис. 2, в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб», были отобраны гидрохимические пробы техногенных вод хвостохранилища Центральной обогатительной фабрики. Перед проведением химического анализа пробы очищались через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм, их состав был установлен в лаборатории аналитической химии Дальневосточного Геологического института Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВГИ ДВО РАН) методами атомно-эмиссионной масс-спектрометрии (на спектрометре iCAP 6500 Duo, номер в Государственном реестре средств измерений 13987-11) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (на спектрометре Agilent 7700, номер в госреестре 44802-10).

Содержание загрязняющих веществ в пробах сравнивали с предельно допустимыми концентрациями загрязняющих веществ в воде объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рыб.хоз.}) [36]. Кроме того, в соответствии «Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» Р 2.1.10.1920-04 Минздрава РФ, выполнили оценку канцерогенных рисков для As, Cr, Cd и Pb по формулам (1)–(3) [37]:

$$Risk = \sum Risk_i, \quad (1)$$

где $Risk_i$ – канцерогенный риск по конкретному i -му загрязнителю-канцерогену;

$$Risk_i = LADD_i \cdot SF, \quad (2)$$

где $LADD_i$ – среднесуточная доза в течение жизни, мг/(кг·день); SF – фактор наклона, ((мг/(кг·день))⁻¹);

$$LADD_i = \frac{(C_i \cdot CR \cdot ED \cdot EF)}{(BW \cdot AT \cdot 365)}, \quad (3)$$

где C_i – содержание загрязнителя-канцерогена (мг/л); CR – скорость поступления питьевой воды (2 л/день); ED – продолжительность воздействия (70 лет); EF – частота воздействия (365 дней/год); BW – масса тела человека (70 кг); AT – период усреднения экспозиции (70 лет)

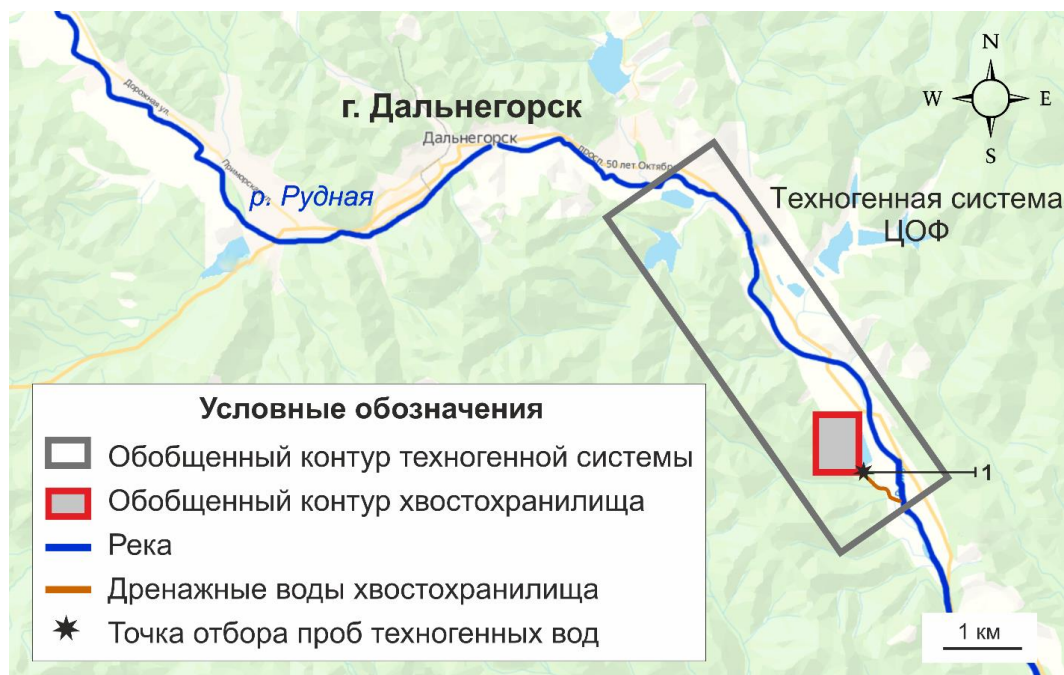
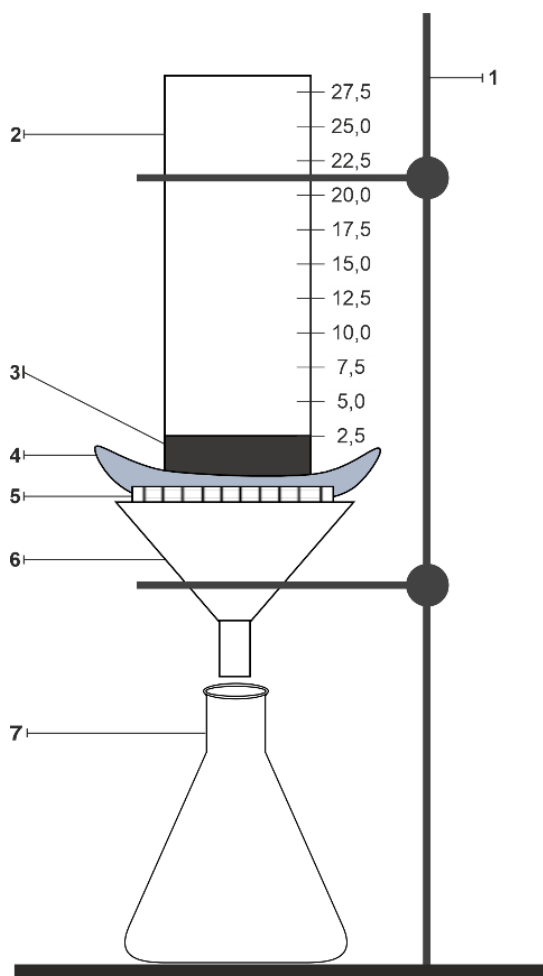


Рис. 2. Схематическая карта отбора проб в горнопромышленной системе ЦОФ Дальнегорского района: 1) дренажные воды хвостохранилища Центральной обогатительной фабрики

Fig. 2. Schematic map of sampling in the mining system of the Dalnegorsk district Central concentrating mill: 1) Central concentration mill tailing dump drainage waters



Второй этап работы заключался в подготовке лабораторной установки – колонок, моделирующих процесс очистки техногенных вод. Они состояли из (рис. 3) штатива (1), на котором закрепляли стеклянные трубки диаметром 3,5 см, длиной 30 см с нанесенными на них шкалами от 0 до 27,5 см (2). В трубки помещали материал моделируемого геохимического барьера объемом 24 см³ (3), содержимое фиксировали с помощью бамбуковой салфетки (4), и сито, покрытое инертной полимерной пленкой (5). Колонки фиксировали держателями и устанавливали на стеклянную воронку (6), фильтрат собирали в конические колбы (7).

В качестве материала искусственного геохимического барьера использовались образцы почв, которые характерны для Дальнегорского района – верхний (бурозем) и нижний горизонт почв (подбел), а также коммерческий образец сорбента таурит карбонатный тонкодисперсный «ТК-Д», СТ 60-1907-23-ТОО-001-2014, производства ГРК «Коксу», Республика Казахстан.

Рис. 3. Схема модельной установки искусственных геохимических барьеров: 1) штатив; 2) стеклянная трубка; 3) материал геохимического барьера; 4) бамбуковая салфетка; 5) металлическое сито; 6) стеклянная воронка; 7) коническая колба

Fig. 3. Scheme of model installation of artificial geochemical barriers: 1) tripod; 2) glass tube; 3) geochemical barrier material; 4) bamboo cloth; metal sieve; 6) glass funnel; 7) conical flask

Пробы почв предоставлены кафедрой почвоведения Института мирового океана Дальневосточного федерального университета (ИМО ДВФУ).

Пробоподготовка материалов барьера для эксперимента по очистке техногенных вод заключалась в выборе фракции однородного размера, обладающего в образцах почвы. Гранулометрический состав почвы установлен в соответствии с ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава» [38] методом ситового анализа с помощью вибрационного грохота Fritsch Milling Analysette 3 Pro. Анализ показал, что основной объем почвы представлен фракцией от 1 до 5 мм (40,47 % у бурозёма и 49,43 % у подбела), поэтому сорбент таурит был измельчен прямым механическим воздействием и отклассифицирован до фракции 1–5 мм, и использовался далее во всех моделях искусственного геохимического барьера.

С помощью градуированных цилиндров по формуле (4) была определена насыпная плотность материалов барьеров; определение производили в серии из трёх измерений, полученные данные усредняли [38]:

$$\rho_{\text{нас.}} = \frac{m_1 - m_2}{V}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{нас.}}$ – насыпная плотность, г/мл; m_1 – масса материала в цилиндре, г; m_2 – масса пустого цилиндра, г; V – объем цилиндра, мл.

На *третьем этапе* работы проводили очистку техногенных сбросов хвостохранилища и холостых проб (дистиллированной воды) при температуре 20 °С и атмосферном давлении. Для этого материал моделируемого барьера помещался в стеклянные трубки, после чего в них заливали дренажные воды хвостохранилища или холостую пробу. Фильтрация проводилась в динамическом режиме, высота водного столба поддерживалась на уровне не менее 25,0 см. Соотношение «фильтрующий материал – фильтрат» было принято 1:5, объём – 24 и 120 см³ соответственно. В конические колбы с каждой колонки последовательно отбирали по 5 проб – 120, 240, 360, 480 и 600 мл; время, затраченное на фильтрование каждой из проб, фиксировали. Для каждого материала рассматривалась параллель из трех проб.

Скорость фильтрации рассматривалась как объемный расход (м³/с), то есть объем фильтрата за единицу времени, и рассчитывалась по формуле (5):

$$Q_v = \frac{V}{t}, \quad (5)$$

где Q_v – объемный расход фильтрата, м³/с; V – объем фильтрата, проходящий через поперечное сечение потока, м³; t – фактическое время, с.

Четвертый этап заключался в измерении водородного показателя всех рассматриваемых в работе водных растворов (с помощью Mettler Toledo

Seven Compact S220, номер в госреестре 50453-12), а также в химическом анализе проб собранного фильтрата ранее обозначенными методами.

Материал барьера был также проанализирован методами ИСП-МС и ИСП-АЭС с предварительным кислотным разложением (HClO₄+HNO₃+HF). Класс его опасности рассчитан в программном комплексе «Расчёт класса опасности» 5.0 (Разработчик Фирма «Интеграл», г. Санкт-Петербург) согласно требованиям [39].

Результаты и их обсуждение

Сравнение содержания загрязняющих веществ в пробах со значениями ПДК_{рыб.хоз.} [36] показало *превышение концентрации* Zn в 18,3, Cu – 18,7 и Mn – 39,2 раза. Расчет значений канцерогенных рисков для здоровья населения от воздействия химических веществ, содержащихся в воде (формулы (1)–(3)) показал, что суммарное значение риска составляет значение $4,5 \cdot 10^{-4}$ и относится к третьему диапазону критериев приемлемости риска (более $1 \cdot 10^{-4}$, но менее $1 \cdot 10^{-3}$). При этом максимальный вклад в значение риска вносит As (98,46 %), в то время как вклад остальных элементов составляет (%): Cr – 0,26, Cd – 1,11 и Pb – 0,17.

Насыпная плотность материалов искусственно-геохимического барьера, рассчитанная по формуле (4), составила (г/мл): 0,835 у нижнего и 1,025 у верхнего слоя почвы, а также 1,415 у сорбента таурит (835, 1025 и 1415 кг/м³ соответственно). На основании данных об объеме фильтрата, прошедшего через поперечное сечение потока за единицу времени, по формуле (5) был рассчитан *объемный расход фильтрата* (л/мин.): 0,91 и 2,896 для нижнего и верхнего горизонтов почвы, а также 0,281 для таурита.

На рис. 4 приведены значения *водородного показателя* водных растворов до фильтрации (0 мл) и в каждой из последующих отобранных проб фильтрата (120, 240, 360, 480 и 600 мл) холостой пробы (а) и дренажных вод хвостохранилища (б).

Во всех случаях pH фильтрата возрастает со слабокислого (рис. 4, а) и щелочного (б) до щелочных значений. При этом если в результате взаимодействия водных растворов с нижним горизонтом почв в первой отобранной пробе фильтрата (120 мл) водородный показатель снижается с 6,3 до 5,7 (холостая проба) и с 7,5 до 6,1 (техногенные воды), то в дальнейшем его значение постепенно возрастает и достигает значений 6,4 и 7,1 соответственно.

В свою очередь, при фильтрации через верхний горизонт почвы pH фильтрата холостой пробы возрастает до 6,7, а техногенных – снижается до 7,35. В обоих случаях очистка сорбентом таурит повышает значения водородного показателя до 7,7.

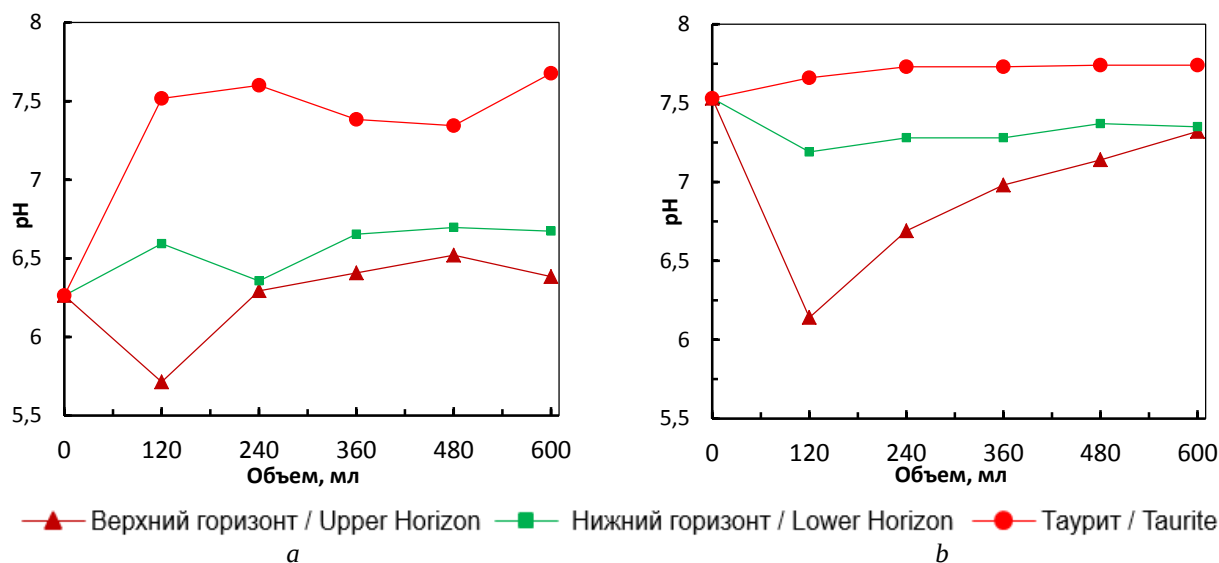


Рис. 4. Водородный показатель фильтрата: а) холостая проба; б) техногенные воды
 Fig. 4. Hydrogen potential of leachate: a) blank sample; b) technogenic waters

Химический анализ фильтрата холостых проб – дистиллированной воды – показал, что применение всех рассмотренных видов материалов практически не влияет на содержание рассматриваемых в работе загрязняющих веществ. Исключением является фильтрация через нижний почвенный горизонт: здесь концентрация Mn повышается со значения

<0,0001 мг/л в исходной пробе до 8,428 мг/л в первой (120 мл) и постепенно снижается вплоть до 5,138 мг/л в пятой пробе фильтрата (600 мл).

Результаты химического анализа проб реальных растворов – дренажных вод хвостохранилища ЦОФ – приведены в табл. 1.

Таблица 1. Содержание загрязняющих веществ в фильтрате техногенных вод, мг/л

Table 1. Pollutant content in technogenic waters leachate, mg/L

Вещ-во Substance	ПДК _{рыб.хоз.} , мг/л MPC of fishery, mg/l	Материал барьера Barrier material	С, мг/л/mg/l					
			фильтрат/filtrate					
			До очистки Before treatment	I (120 мл/ml)	II (240 мл/ml)	III (360 мл/ml)	IV (480 мл/ml)	V (600 мл/ml)
Канцерогенные элементы/Carcinogenic elements								
Cr	0,07	НГП/LSH	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		ВГП/USH		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		Таурит/Taurite		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
As	0,05	НГП/LSH	0,008	0,001	0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		ВГП/USH		0,005	0,004	0,005	0,004	0,004
		Таурит/Taurite		0,001	0,002	0,001	0,003	0,003
Cd	0,005	НГП/LSH	0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		ВГП/USH		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		Таурит/Taurite		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Pb	0,06	НГП/LSH	0,001	<0,0001	0,001	<0,0001	0,001	<0,0001
		ВГП/USH		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		Таурит/Taurite		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Неканцерогенные элементы/Noncarcinogenic elements								
Mn	0,01	НГП/LSH	0,392	11,217	8,381	5,031	3,128	2,116
		ВГП/USH		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,002
		Таурит/Taurite		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Cu	0,001	НГП/LSH	0,019	0,006	0,003	0,002	0,003	0,003
		ВГП/USH		0,005	0,003	0,004	0,002	0,002
		Таурит/Taurite		0,002	0,002	0,002	0,003	0,002
Zn	0,01	НГП/LSH	0,183	0,051	0,047	0,045	0,037	0,020
		ВГП/USH		0,009	0,008	0,031	0,004	0,009
		Таурит/Taurite		0,028	0,040	0,006	0,011	0,011

Примечания: ВГП – Верхний горизонт почвы; НГП – Нижний горизонт почвы.

Note: LSH – Lower soil horizon; USH – Upper soil horizon.

Таблица 2. Канцерогенный риск от воздействия химических веществ

Table 2. Chemical carcinogen exposure

Материал барьера Barrier material	$\Sigma Risk_i$					
	До очистки Before treatment	фильтрат/filtrate				
		I (120 мл/ml)	II (240 мл/ml)	III (360 мл/ml)	IV (480 мл/ml)	V (600 мл/ml)
НГП/LSH	5,29·10 ⁻⁴	2,16·10 ⁻⁴	8,73·10 ⁻⁴	3,06·10 ⁻⁴	5,24·10 ⁻⁴	8,58·10 ⁻⁵
ВГП/USH		1,91·10 ⁻⁴	1,26·10 ⁻⁴	2,29·10 ⁻⁴	1,11·10 ⁻⁴	1,11·10 ⁻⁴
Таурит/Taurite		1,03·10 ⁻⁴	6,01·10 ⁻⁵	5,48·10 ⁻⁵	1,10·10 ⁻⁴	9,72·10 ⁻⁵

Содержание канцерогенных элементов Cr, Cd и Pb в случае применения всех рассмотренных материалов снижается до значений <0,0001 мг/л, а As наиболее эффективно удаляется сорбентом таурит – до 0,001 мг/л в первой, но его концентрация постепенно возрастает до 0,003 мг/л в последней пробе фильтрата.

Далее рассмотрим неканцерогенные элементы, превышающие ПДК_{рыб.хоз.}. Аналогично холостым пробам концентрация Mn при фильтрации через нижний горизонт почвы возрастает с 0,392 мг/л (до очистки) до 11,217 мг/л в первой и снижается до 2,116 мг/л в пятой пробе фильтрата, а ПДК_{рыб.хоз.} превышает от 1122 до 212 раз. Это исключает применение данного материала для очистки.

Применение верхнего горизонта почвы и таурита снижает концентрации Mn, Cu и Zn до нормативных значений для вод рыбохозяйственного значения: в случае Cu эффективнее таурит (исходная концентрация снижается до 9,5 раз), а Zn – верхний горизонт почвы (до 45,8 раз).

В целом применение таурита снижает содержание Cr, As, Cd, Pb и Mn более чем в 10, а Cu и Zn до 9,5 и 30,5 раз.

В табл. 2 приведены суммарные значения канцерогенных рисков, полученные в результате очистки техногенных вод. Из таблицы следует, что среди рассмотренных материалов наиболее эффективен сорбент таурит: в третьей пробе фильтрата (360 мл) значение составляет 5,48·10⁻⁵, т. е. в 9,6 раз меньше исходного, но в пятой пробе фильтрата оно достигает 9,72·10⁻⁵ – эффективность снижается до 5,4 раза. Во всех случаях критерий приемлемости риска снижается с третьего до второго диапазона (более 1·10⁻⁵, но менее 1·10⁻⁴).

Расчет класса опасности всех материалов, использованных для очистки техногенных вод на искусственном геохимическом барьере, показал, что степень опасности нижнего и верхнего горизонта

почвы, а также сорбента таурит составляет 30,02, 38,87 и 22,22 соответственно. Данные значения соответствуют IV классу опасности – малоопасные отходы, согласно [40], в случае размещения этих материалов в виде производственных отходов плата за них составляет 835,6 р. за 1 т.

Закключение

Экспериментальные исследования по очистке гидрохимических проб техногенных вод действующего хвостохранилища полиметаллических руд методом искусственных геохимических барьеров позволили оценить возможность снижения концентрации канцерогенных и превышающих требования ПДК_{рыб.хоз.} загрязняющих веществ: Cr, As, Cd, Pb, а также Mn, Cu, Zn.

Нижний горизонт почв Дальнегорского района повышает содержание Mn в фильтрате и неприемлем для использования на искусственном геохимическом барьере. Наибольшей эффективностью обладает сорбент таурит: концентрации Cr, As, Cd, Pb и Mn в результате его применения снижаются более чем в 10, а Cu и Zn до 9,5 и 30,5 раз соответственно; значения канцерогенных рисков снижаются до 9,6 раза от исходного – с третьего до второго диапазона приемлемости.

Расчет класса опасности верхнего почвенного горизонта и сорбента таурит после очистки растворов на модельной установке показал их соответствие IV классу – малоопасным отходам; ставка за их размещение в виде производственных отходов составляет 835,6 р. за 1 т.

Для дальнейшей реализации масштабных экспериментов в отношении техногенных вод для всех рассмотренных в работе материалов искусственных геохимических барьеров определены и представлены характеристики насыпной плотности и объемного расхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ; в ред. от 25.12.2023 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102074303> (дата обращения: 01.07.2024).
2. Nordstrom D.K., Alpers C.N. Geochemistry of acid mine waters // The environmental geochemistry of mineral deposits. – Littleton: Society of Economic Geologists, 1999. – P. 133–160. DOI: 10.5382/Rev.06.06

3. Зверева В.П. Экологические последствия гипергенных процессов на оловорудных месторождениях Дальнего Востока. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 165 с.
4. Dissolved thiolated arsenic formed by weathering of mine wastes / J.D. Ali, A. Guatame-Garcia, M.I. Leybourne, A.L. Harrison, B. Vriens // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 321. – P. 138124. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138124
5. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // *Applied Geochemistry*. – 2015. – Vol. 57. – P. 3–16. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.02.008
6. Влияние разработки Сибайского месторождения (Южный Урал) на трансформацию потока металлов в подчиненных ландшафтах / А.Ю. Опекунов, М.Г. Опекунова, В.В. Сомов, Е.С. Митрофанова, С.Ю. Кукушкин // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. – 2018. – № 1. – С. 14–24.
7. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review // *Journal of cleaner production*. – 2017. – Vol. 151. – P. 475–493. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082
8. Acid mine drainage formation and arsenic mobility under strongly acidic conditions: Importance of soluble phases, iron oxyhydroxides/oxides and nature of oxidation layer on pyrite / C.B. Tabelin, R.D. Corpuz, T. Igarashi, M. Villacorte-Tabelin, R.D. Alorro, K. Yoo, N. Hiroyoshi // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 399. – P. 122844. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122844
9. Dewatered and stacked mine tailings: a review / E. Furnell, K. Bilaniuk, M. Goldbaum, M. Shoaib, O. Wani, X. Tian // *ACS ES&T Engineering*. – 2022. – Vol. 2. – № 5. – P. 728–745. DOI: 10.1021/acsestengg.1c00480
10. Moncur M.C., Ptacek C.J., Blowes D.W. Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment // *Applied geochemistry*. – 2005. – Vol. 20. – № 3. – P. 639–659. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2009.09.013
11. Prediction of acid mine drainage: where we are / A. Elghali, M. Benzaazoua, Y. Taha, H. Amar // *Earth-Science Reviews*. – 2023. – Vol. 241. – P. 104421. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104421
12. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings / M.B. Lindsay, M.C. Moncur, J.G. Bain, J.L. Jambor, C.J. Ptacek, D.W. Blowes // *Applied geochemistry*. – 2015. – Vol. 57. – P. 157–177. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.01.009
13. A review on the impact of mining operation: monitoring, assessment and management / O. Agboola, D.E. Babatunde, O.S.I. Fayomi, E.R. Sadiku // *Results in Engineering*. – 2020. – Vol. 8. – P. 100181. DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100181
14. Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Саева О.П. Направления подземного и поверхностного стоков с хвостохранилищ горнорудного производства по данным геофизических и геохимических исследований // *Интерэкспо Гео-Сибирь-2015: Сборник материалов XI Международного научного конгресса*. – Новосибирск, 13–25 апреля 2015. – Новосибирск, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2015. – Т. 2. – С. 305–310.
15. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact / P. Wang, Z. Sun, Y. Hu, H. Cheng // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 695. – P. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893
16. Geochemical and mineralogical investigation of cemented crusts in the tailings cover at Long Lake Gold Mine, Sudbury, Canada / B. Sapkota, B. Verbuyst, J. Bain, C. Ptacek, D. Blowes, T. Al // *Journal of Hazardous Materials*. – 2023. – Vol. 451. – P. 131192.
17. Da Conceição F.T., Vasconcelos P.M., Godoy L.H. Water/rock interactions, chemical weathering and erosion, and supergene enrichment in the Tapira and Catalão I alkaline-carbonate complexes, Brazil // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2022. – Vol. 237. – P. 106999. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106999
18. Зверева В.П. Оценка воздействия техногенных вод Кавалеровского и Дальнегорского горнорудных районов на гидросферу Приморского края // *Экологическая химия*. – 2019. – Т. 28. – № 4. – С. 199–210.
19. Frolov K.R., Lysenko A.I., Pyatakov A.D. A study of the qualitative chemical composition of technogenic waters in the tailing dumps of the Russian Southern Far East in a wide temperature range using the physicochemical modeling method // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 272. – № 2. – P. 022124 (1–8). DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022124
20. Distribution and mobilization of heavy metals at an acid mine drainage affected region in South China, a post-remediation study / C. Luo, J. Routh, M. Dario, S. Sarkar, L. Wei, D. Luo, Y. Liu // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 724. – P. 138122. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138122
21. A critical review on the migration and transformation processes of heavy metal contamination in lead-zinc tailings of China / T. Chen, X. Wen, J. Zhou, Z. Lu, X. Li, B. Yan // *Environmental Pollution*. – 2023. – Vol. 338. – P. 122667. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122667
22. Frolov K.R. Assessment of the Rudnaya River geochemical barriers water composition using physico-chemical modeling method (Dalnegorsk Ore District, Russia) // *Sustainable Development of Water and Environment*. – 2020. Springer International Publishing. – Ch. 17. – P. 1–13. DOI: 10.1007/978-3-030-45263-6_17
23. Lee J.S., Chon H.T., Kim K.W. Human risk assessment of As, Cd, Cu and Zn in the abandoned metal mine site // *Environmental geochemistry and health*. – 2005. – Vol. 27. – P. 185–191. DOI: 10.1007/s10653-005-0131-6
24. Obasi P.N., Akudinobi B.B. Potential health risk and levels of heavy metals in water resources of lead-zinc mining communities of Abakaliki, southeast Nigeria // *Applied Water Science*. – 2020. – Vol. 10. – № 7. – P. 1–23. DOI: 10.1007/s13201-020-01233-z
25. Frolov K.R., Artemova M.I., Ponomarev O.A. Risk assessment on human health: the case of Primorsky Krai abandoned sulfide-rich tailings dump // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 666. – № 3. – P. 032017 (1–5). DOI: 10.1088/1755-1315/666/3/032017
26. A global meta-analysis of heavy metal (loid) s pollution in soils near copper mines: Evaluation of pollution level and probabilistic health risks / L. Chen, M. Zhou, J. Wang, Z. Zhang, C. Duan, X. Wang, S. Zhao, X. Bai, Z. Li, L. Fang // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 835. – P. 155441. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155441
27. Evaluation of surface water contamination and its impacts on health in the mining districts of Kambélé and Bétaré-Oya (Eastern-Cameroon) / N.M.E. Sylvie, A.Z.E. Bessa, R.E.A. Mbomo, J.V. Akono, B. Dairou, K. Pierre // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – № 7. – P. e29189. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29189
28. Human health risks due to exposure to water pollution: a review / P. Babuji, S. Thirumalaisamy, K. Duraisamy, G. Periyasamy // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – № 14. – P. 2532. DOI: 10.3390/w15142532

29. Geochemistry of a permeable reactive barrier for metals and acid mine drainage / S.G. Benner, D.W. Blowes, W.D. Gould, R.B. Herbert, C.J. Ptacek // *Environmental Science & Technology*. – 1999. – Vol. 33. – № 16. – P. 2793–2799. DOI: 10.1021/es981040u
30. Максимович Н.Г. Создание геохимических барьеров для очистки кислых стоков породных отвалов // *Уголь*. – 2006. – № 9. – С. 64–55.
31. Искусственные геохимические барьеры для решения экологических и технологических задач / Ю.Л. Баярова, Д.П. Нестеров, Е.А. Корнева, А.В. Светлов, Д.В. Макаров, В.А. Маслобоев // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 16 (3). – С. 536–541.
32. A review on design, material selection, mechanism, and modelling of permeable reactive barrier for community-scale groundwater treatment // *Environmental Technology & Innovation*. – 2020. – Vol. 19. – P. 100917. DOI: 10091710.1016/j.eti.2020.100917
33. ИТС 53-2022 Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде. – М.: Бюро НДТ, 2022. – 147 с.
34. Зверева В.П., Фролов К.Р., Лысенко А.И. Влияние техногенных вод на реку Рудную дальневосточного региона // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 49–58 DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3715
35. Экологический мониторинг состояния природных вод в зоне влияния горнопромышленных техногенных систем Приморского края / К.Р. Фролов, М.И. Артемова, А.Е. Чешкин, П.М. Артемов // *Экологические исследования на Дальнем Востоке России: история и современность*. – Владивосток: ВГУЭС, 2023 – С. 191–201.
36. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приказ от 13 декабря 2016 г. № 552. – М.: Минсельхоз России, 2016. – 78 с.
37. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: (Р 2.1.10.1920-04). – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.
38. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартинформ, 2019. – 31 с.
39. Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2014 № 536 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201512310003> (дата обращения: 01.07.2024).
40. О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах: Постановление Правительства Российской Федерации от 17.04.2024 № 492. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201609150007> (дата обращения: 01.07.2024).

Информация об авторах

Константин Русланович Фролов, кандидат химических наук, доцент департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии Политехнического института, доцент департамента ядерных технологий Института наукоемких технологий и передовых материалов Дальневосточного федерального университета, Россия, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; konstantin.fk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6122-2980>

Полина Дмитриевна Ориничева, магистрант департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии Политехнического института Дальневосточного федерального университета, Россия, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; orinicheva.pd@dvfu.ru

Павел Максимович Артемов, аспирант департамента ядерных технологий Института наукоемких технологий и передовых материалов Дальневосточного федерального университета, Россия, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; artemov.pm@dvfu.ru

Вероника Сергеевна Цыганок, магистрант департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии Политехнического института Дальневосточного федерального университета, Россия, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; tcyganok.vs@dvfu.ru

Виктория Георгиевна Харченко, магистрант департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии Политехнического института Дальневосточного федерального университета, Россия, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; kharchenko.vge@dvfu.ru

Поступила в редакцию: 02.10.2024

Поступила после рецензирования: 04.12.2024

Принята к публикации: 17.07.2025

REFERENCES

1. *On environmental protection: Federal Law of 10.01.2002 no. 7-FZ; in edition of 25.12.2023. Official Internet Portal of Legal Information.* (In Russ.) Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102074303> (accessed: 1 July 2024).
2. Nordstrom D.K., Alpers C.N. Geochemistry of acid mine waters. *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*. Eds. G.S. Plumlee, M.J. Logsdon, L.F. Filipek. Society of Economic Geologists, 1997, pp. 133–160. DOI: 10.5382/Rev.06.06
3. Zvereva V.P. *Ecological consequences of hypergenic processes at tin ore deposits of the Far East*. Vladivostok, Dalnauka, 2008. 165 p. (In Russ.)
4. Ali J.D., Guatame-Garcia A., Leybourne M.I., Harrison A.L., Vriens B. Dissolved thiolated arsenic formed by weathering of mine wastes. *Chemosphere*, 2023, vol. 321, pp. 138124. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138124
5. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16. DOI: /10.1016/j.apgeochem.2015.02.008

6. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G., Somov V.V., Mitrofanova E.S., Kukushkin S.Yu. Impact of Sibayskoye deposit development (Southern Urals) on metal flux transformation in subordinate landscapes. *Herald of Moscow University. Series 5. Geography*, 2018, vol. 1, pp. 14–24. (In Russ.)
7. Skousen J.G., Ziemkiewicz P.F., McDonald L.M. Acid mine drainage formation, control and treatment: approaches and strategies. *The Extractive Industries and Society*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 241–249. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082
8. Tabelin C.B., Corpuz R.D., Igarashi T., Villacorte-Tabelin M., Alorro R.D., Yoo K., Raval S., Ito M., Hiroyoshi N. Acid mine drainage formation and arsenic mobility under strongly acidic conditions: Importance of soluble phases, iron oxyhydroxides/oxides and nature of oxidation layer on pyrite. *Journal of Hazardous Materials*, 2020 Nov 15, 399:122844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122844>
9. Furnell E., Bilaniuk K., Goldbaum M., Shoaib M., Wani O., Tian X. Dewatered and stacked mine tailings: a review. *ACS EST*, vol. 2, pp. 728–745. DOI: [acsestengg.1c00480](https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00480).
10. Moncur M.C., Ptacek C.J., Blowes D.W. Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied geochemistry*, 2005, vol. 20, no. 3, pp. 639–659. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2009.09.013
11. Elghali A., Benzaazoua M., Taha Y., Amar H. Prediction of acid mine drainage: where we are. *Earth-Science Reviews*, 2023, vol. 241, pp. 104421. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104421
12. Lindsay M.B., Moncur M.C., Bain J.G., Jambor J.L., Ptacek C.J., Blowes D.W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 157–177. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.01.009
13. Agboola O., Babatunde D.E., Fayomi O.S., Sadiku E.R., Popoola P., Moropeng L., Yahaya A., Mamudu O.A. A review on the impact of mining operation: monitoring, assessment and management. *Results in Engineering*, 2020, vol. 1, no. 8, pp. 100181. DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100181
14. Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Saeva O.P. Directions of underground and surface runoff from tailing ponds of mining production according to the data of geophysical and geochemical studies. *Proceedings of the XI International Scientific Congress. Interexpo Geo-Siberia-2015*. Novosibirsk, 13–25 April 2015. Novosibirsk, Siberian State University of Geosystems and Technologies Publ., 2015. Vol. 2, pp. 305–310.
15. Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 695, pp. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893
16. Sapkota B., Verbuyst B., Bain J., Ptacek C., Blowes D., Al T. Geochemical and mineralogical investigation of cemented crusts in the tailings cover at Long Lake Gold Mine, Sudbury, Canada. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 451, pp. 131192. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131192
17. Da Conceição F.T., Vasconcelos P.M., Godoy L.H., Navarro G.R., Montibeller C.C., Sardinha D.S. Water/rock interactions, chemical weathering and erosion, and supergene enrichment in the Tapira and Catalão I alkaline-carbonatite complexes, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, vol. 237, p. 106999. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106999
18. Zvereva V.P. Impact of technogenic wastewaters of Kavaleroyskii and Dalnegorskii mining districts on the hydrosphere of Primorsky Krai. *Russian Journal of General Chemistry*, 2019, vol. 89, no. 13, pp. 2808–2817. DOI: 10.1134/S1070363219130115
19. Frolov K.R., Lysenko A.I., Pyatakov A.D. A Study of the qualitative chemical composition of technogenic waters in the tailing dumps of the Russian Southern Far East in a wide temperature range using the physicochemical modeling method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, no. 2, p. 022124. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022124
20. Luo C., Routh J., Dario M., Sarkar S., Wei L., Luo D., Liu Y. Distribution and mobilization of heavy metals at an acid mine drainage affected region in South China, a post-remediation study. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 724, pp. 138122. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138122
21. Chen T., Wen X., Zhou J., Lu Z., Li X., Yan B. A critical review on the migration and transformation processes of heavy metal contamination in lead-zinc tailings of China. *Environmental Pollution*, 2023, vol. 338, p. 122667. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122667
22. Frolov K. Assessment of the Rudnaya River geochemical barriers water composition using physico-chemical modeling method (Dalnegorsk Ore District, Russia). *Sustainable Development of Water and Environment: Proceedings of the ICSDWE2020*, 2020, pp. 177–189. DOI: 10.1007/978-3-030-45263-6_17
23. Lee J.S., Chon H.T., Kim K.W. Human risk assessment of As, Cd, Cu and Zn in the abandoned metal mine site. *Environmental geochemistry and health*, 2005, vol. 27, pp. 185–191. DOI: 10.1007/s10653-005-0131-6
24. Obasi P.N., Akudinobi B.B. Potential health risk and levels of heavy metals in water resources of lead-zinc mining communities of Abakaliki, southeast Nigeria. *Applied Water Science*, 2020, vol. 7, pp. 1–23. DOI: 10.1007/s13201-020-01233-z
25. Frolov K.R., Artemova M.I., Ponomarev O.A. Risk assessment on human health: the case of Primorsky Krai abandoned sulfide-rich tailings dump. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, no. 3, p. 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/666/3/032017
26. Chen L., Zhou M., Wang J., Zhang Z., Duan C., Wang X., Zhao S., Bai X., Li Z., Li Z., Fang L. A global meta-analysis of heavy metal (loid) s pollution in soils near copper mines: Evaluation of pollution level and probabilistic health risks. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 835, pp. 155441 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155441
27. Sylvie N.M.E., Bessa A.Z.E., Mbomo R.E.A., Akono J.V., Dairou B., Pierre K. Evaluation of surface water contamination and its impacts on health in the mining districts of Kambélé and Bétaré-Oya (Eastern-Cameroon). *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 7, pp. e29189
28. Babuji P., Thirumalaisamy S., Duraisamy K., Periyasamy G. Human health risks due to exposure to water pollution: a review. *Water*, 2023, vol. 15, no. 14, pp. 2532. DOI: 10.3390/w15142532
29. Benner S.G., Blowes D.W., Gould W.D., Herbert R.B., Ptacek C.J. Geochemistry of a permeable reactive barrier for metals and acid mine drainage. *Environmental Science & Technology*, 1999, vol. 33, no. 16, pp. 2793–2799. DOI: 10.1021/es981040u

30. Maksimovich N.G. Creation of geochemical barriers for treatment of acidic effluents of rock dumps. *Ugol*, 2006, no. 9, pp. 64–55. (In Russ.)
31. Baiurova Y.L., Nesterov D.P., Korneva E.A., Svetlov A.V., Makarov D.V., Masloboev V.A. Artificial geochemical barriers for solving ecological and technological problems. *Bulletin of Murmansk State Technical University*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 536–541. (In Russ.)
32. Thakur A.K., Vithanage M., Das D.B., Kumar M. A review on design, material selection, mechanism, and modelling of permeable reactive barrier for community-scale groundwater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, vol. 19, pp. 100917. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100917
33. ITS 53-2022 *Elimination of sites of accumulated environmental damage*. Moscow, BAT Bureau, 2022. 147 p. (In Russ.)
34. Zvereva V.P., Frolov K.R., Lysenko A.I. Impact of technogenic waters on the Rudnaya river of the Russian Far East. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 49–58. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3715 (In Russ.)
35. Frolov K.R., Artemova M.I., Cheshkin A.E., Artemov P.M. Ecological monitoring of the state of natural waters in the zone of influence of mining technogenic systems of Primorsky Krai. *Ecological research in the Far East of Russia: history and modernity*. Vladivostok, VGUES Publ., 2023. pp. 191–201. (In Russ.)
36. *On approval of water quality standards of water bodies of fishery significance, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance*. Ministry of Agriculture of the Russian Federation Order no. 552, 13.12.2016. (In Russ.) Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201701160006> (accessed: 1 July 2024).
37. P 2.1.10.1920-04. *Guidelines for public health risk assessment of exposure to chemical substances polluting the environment*. Moscow, Federal Centre of Gosanepidnadzor of the Ministry of Health of Russia Publ., 2004. 143 p. (In Russ.)
38. SS 12536-2014. *Soils. Methods of laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition*. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 31 p. (In Russ.)
39. *On approval of the criteria for attributing wastes to I-V hazard classes by the degree of negative impact on the environment*. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation no. 536, 04.12.2014. (In Russ.) Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201512310003> (accessed: 1 July 2024).
40. *On rates of payment for negative environmental impact and additional coefficients: Resolution of the Government of the Russian Federation no. 492, 17.04.2024*. (In Russ.) Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201609150007> (accessed 1 July 2024).

Information about the authors

Konstantin R. Frolov, Cand. Sc., Associate Professor, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; konstantin.fk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6122-2980>

Polina D. Orinicheva, Master's Student, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; orinicheva.pd@dvfu.ru

Pavel M. Artemov, Postgraduate Student, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; artemov.pm@dvfu.ru

Veronika S. Tcyganok, Master's Student, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; tcyganok.vs@dvfu.ru

Victoria G. Kharchenko, Master's Student, Far Eastern Federal University, 10, Ayaks, Russky island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; kharchenko.vge@dvfu.ru

Received: 02.10.2024

Revised: 04.12.2024

Accepted: 17.07.2025