

УДК 504.06

РЕАБИЛИТАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ОТРАБОТАННЫХ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЛЕВИХИНСКОГО РУДНИКА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Рыбникова Людмила Сергеевна¹,
luserib@mail.ru

Рыбников Петр Андреевич¹,
ribnikoff@yandex.ru

Наволокина Вера Юрьевна¹,
vunavolokina@gmail.com

¹ Институт горного дела УрО РАН,
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

Актуальность работы связана с необходимостью реабилитации отработанных медноколчеданных месторождений, испытывающих воздействие кислых шахтных вод, и обоснования мероприятий по очистке действующего пруда-осветлителя.

Цель: исследование состава шлама и обоснование мероприятий, направленных на снижение экологической нагрузки на гидросферу.

Объекты: пруд-осветлитель и шлам нейтрализации кислых шахтных вод Левихинского медноколчеданного рудника.

Методы. Лабораторные исследования вод и донных отложений выполнялись с использованием атомноэмиссионного и масс-спектрального анализа; методами пламенно-эмиссионной спектрометрии, пламенно атомно-абсорбционной, фотометрическим методом с реактивом Несслера, титриметрическим, меркуметрическим и потенциометрическим методами; масс-спектрометрией с ионизацией в индуктивно связанной плазме и гравиметрическим методом.

Результат. В пробах шлама преобладают сульфаты (гипс и бассанит), оксиды и гидроксиды железа (гётит), карбонаты (кальцит), глинистые минералы (преимущественно гидрослюда) и хлорсодержащие соли (карналлит). В химическом составе шлама существенно преобладают оксиды железа, серы и кальция. Анализ водной и кислотной вытяжки показал, что из шлама может выщелачиваться до 24 элементов, относящихся ко 2, 3 и 4 классу опасности, в концентрациях, превышающих предельно допустимые значения для водоемов рыбохозяйственного значения. Проанализировано несколько вариантов использования шлама из пруда-осветлителя: рекультивация отвалов пустых пород и некондиционных руд; закладка выработанного пространства карьеров; производство строительных материалов; извлечение ценных компонентов; складирование после обезвоживания шлама в геотубах (Geotube). Наиболее рациональным является использование шлама для производства строительных материалов на основе государственно-частного партнерства, реализация которого позволит государству и частному сектору извлекать взаимную выгоду.

Ключевые слова:

Гидросфера, медноколчеданное месторождение, загрязняющие вещества, кислые шахтные воды, шлам, пруд-осветлитель.

Введение

Горнодобывающая промышленность является значимым фактором преобразования окружающей среды и источником геохимической нагрузки на природные комплексы горнопромышленных территорий. Кислые шахтные воды представляют собой одну из наиболее распространенных и серьезных проблем в этой области. Насыщенные токсичными металлами, они образуются в результате сернокислотного выветривания сульфидных минералов как при отработке, так и после ее завершения. Продолжительность формирования кислых вод после закрытия рудника может составлять сотни или даже тысячи лет [1].

Очистка кислых шахтных вод является важной экологической задачей. Основная сложность заключается в том, что необходимо очищать большие объемы воды, которые представляют собой сложные многокомпонентные системы с низким pH и высокими концентрациями металлов и сульфатов. Во избежание неконтролируемого воздействия на окружающую среду эти воды необходимо собирать и доводить содержание загрязняющих компонентов до нормативных показателей перед сбросом в реки.

Для очистки кислых шахтных вод обычно используется два типа систем, известных как активные (с

добавлением щелочных реагентов) и пассивные (с использованием только естественных источников энергии и биологических, геохимических и гравитационных процессов) [2]. Активная система очистки эффективно используется для снижения кислотности и содержания металлов в кислых шахтных стоках, однако для полной очистки в каждом случае необходимо подбирать наиболее подходящий и экономически выгодный реагент.

Внесение нейтрализующих кислотность и осаждающих металлы химических реагентов является обычной общемировой и российской практикой [3]. На закрытых медноколчеданных рудниках Среднего Урала (Левихинский, Карпушихинский, Ломовский, Дегтярский) используется известь для приготовления известкового молока для повышения pH и осаждения растворенных металлов. В результате образуется осадок различного состава (в зависимости от вида нейтрализующего вещества и состава воды, подлежащей очистке), который накапливается в прудах-осветлителях. За период эксплуатации пруды заполняются шламами и, как следствие, снижается объем, доступный для отстаивания воды после нейтрализации. Возникает проблема периодической очистки таких прудов-осветлителей и обоснования возможности

использования шлама для его дальнейшего использования или безопасного складирования.

За годы эксплуатации (с 1959 по 2022 г.) пруд-осветлитель на Левихинском медноколчеданном месторождении заполнился шламом от нейтрализации, в настоящее время примерно треть его поверхности представляет собой пляж с высохшими шламами. Эффективность очистки воды снизилась и составляет от 32–74 % для марганца и до 90–97 % для железа. В марте–мае 2020 г. кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) варьировала от 2700 по железу до 9600 для цинка [4]. В первую очередь это связано с тем, что оставшегося объема пруда-осветлителя недостаточно для отстаивания воды после нейтрализации.

В пределах горного отвода находится несколько отработанных карьеров и отвалов некондиционных руд, для рекультивации которых потенциально могут быть использованы шламы пруда-осветлителя.

Целью работы является исследование состава шлама и обоснование направления реабилитации территории отработанного Левихинского медноколчеданного месторождения для улучшения его экологического состояния и повышения степени очистки кислых шахтных вод. Для этого был выполнен анализ вещественного, минералогического и химического

состава шлама, а также воды в пруду-осветлителе и в затопленных карьерах и оценена возможность использования шлама нейтрализации кислых шахтных вод рудника.

Объект исследования

Левихинская группа медноколчеданных месторождений расположена на территории Кировградского городского округа Свердловской области, в 30 км северо-западнее г. Кировград, на восточной окраине п. Левиха.

Рудник отрабатывался с 1927 по 2003 г. Эксплуатация проводилась как открытым, так и подземным способом. До конца 1950-х гг. кислые шахтные воды без очистки сбрасывались в болото Пороховое, расположенное на северо-западе месторождения. В 1959 г. в долине р. Левихи был создан осветлительный пруд (проектный срок эксплуатации был определен в 50 лет), который к моменту остановки рудника эксплуатировался без очистки более 40 лет.

Пруд-осветлитель расположен на склоне возвышенности, на левом берегу р. Тагил (рис. 1). Согласно паспорту гидротехнического сооружения, его площадь 142 га, общий объем 3200 тыс. м³, средняя глубина 2,4 м, максимальная 5 м [5]. В настоящее время объем накопленного шлама около 2840 тыс. м³.

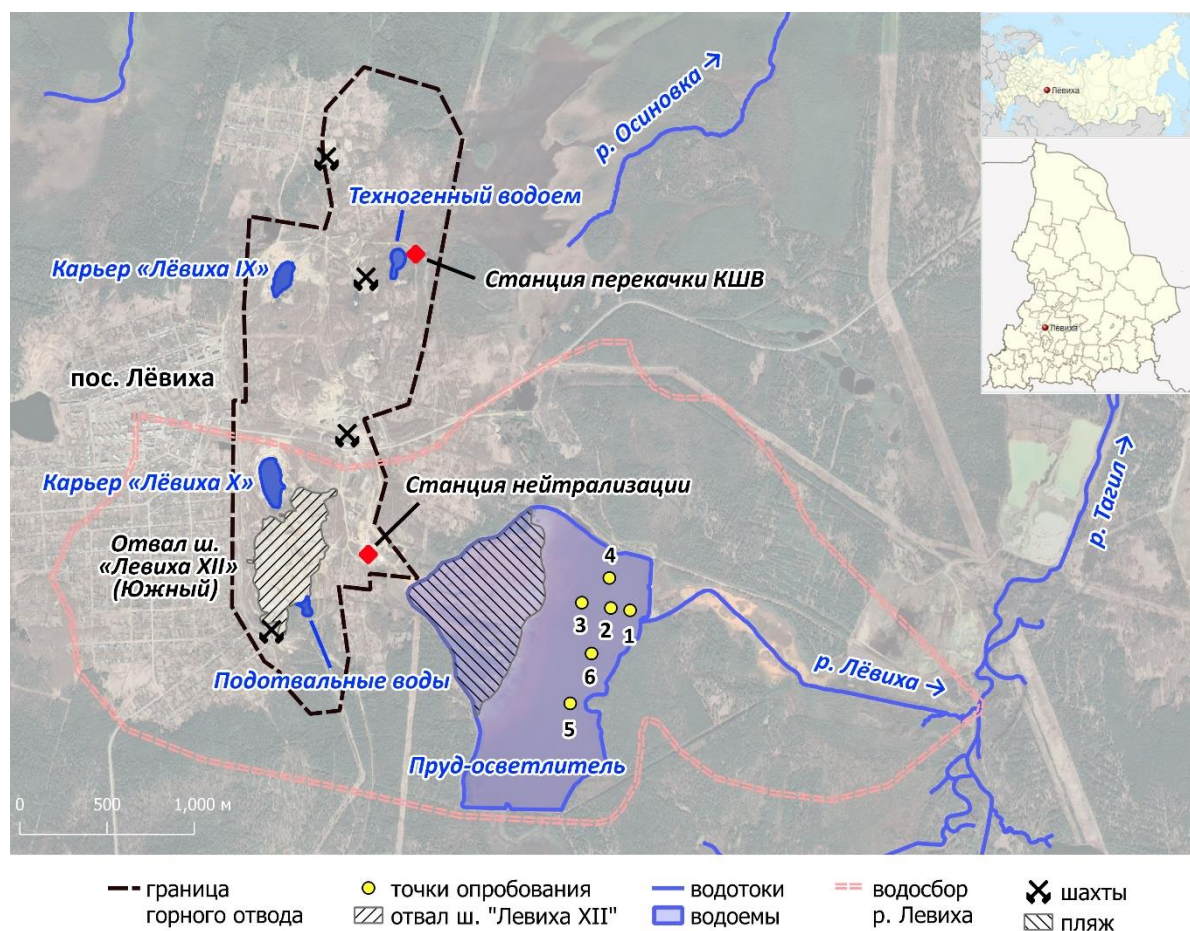


Рис. 1. Обзорная схема расположения объектов на Левихинском руднике

Fig. 1. Overview layout of objects at the Levikhinsky mine

В 2003 г. водоотлив был остановлен, депрессионная воронка заполнилась, и к 2007 г. в самой низкой точке горного отвода в провале сформировался техногенный водоем, в который происходит разгрузка кислых (рН=2,7–4,1) минерализованных (до 12 г/л) шахтных вод (КШВ) сульфатного состава с высоким содержанием Fe, Al, Mg, Zn, Cu, Mn. Расход такой разгрузки порядка 120 м³/час в 2 раза меньше, чем был водоотлив в период отработки [6, 7].

Начиная с 2007 г. нейтрализация КШВ возобновилась: из техногенного водоема шахтные воды перекачиваются на станцию нейтрализации и очищенные сточные воды поступают в пруд-осветлитель. Сброс их происходит в р. Левиху, левый приток р. Тагил (Иртышский бассейновый округ).

Химический состав воды в пруду-осветлителе

Вода имеет кислую реакцию среды (рН=3,1–4,4), минерализация изменяется от 1,5 до 4,8 г/л, Eh=218–571 мВ, что свидетельствует о высоких окислительных условиях (табл. 1).

Таблица 1. Состав воды в пруду-осветлителе

Table 1. Water composition in the clarification pond

Дата опробования Test date	Объект Object	Формула Курлова Kurlov formula
04.08.2020	Пруд-осветлитель (сброс в р. Левиху) Clarification (discharge into the Levikha river)	$M3,96 \frac{SO_4 98}{Mg 37 Ca 32 Al 21} pH 3,1$ T 20,7°C Eh 571 mV
13.10.2020		$M2,96 \frac{SO_4 93 Cl 7}{Ca 42 Mg 34 Al 16} pH 3,88 T$ 7,8°C Eh 498 mV
14.04.2021		$M1,46 \frac{SO_4 98}{Ca 64 Mg 23} pH 4,44$
04.08.2021		$M3,78 \frac{SO_4 99}{Mg 42 Ca 40} pH 3,32 T$ 25,7°C Eh 218 mV
16.03.2021	Пруд-осветлитель (опробование со льда) Clarification pond (testing from ice)	$M4,78 \frac{SO_4 99}{Ca 43 Mg 35 Al 16} pH 3,73 T$ 0,5°C Eh 497 mV

По составу вода сульфатная (концентрация сульфат-иона до 2930 мг/л), хлор обнаружен в количестве 15–107 мг/л, гидрокарбонат-ион – не более 6 мг/л. Содержание азотистых соединений незначительно. Среди катионов на первом месте находятся магний или кальций, на третьем месте – алюминий. Состав воды, отобранной в пруду-осветлителе со льда (215 м восточнее плотины), такой же, как и в точке сброса с пруда-осветлителя.

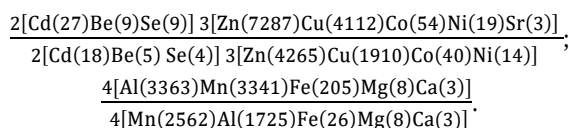
При проведении in situ анализа взвеси с глубины 2,5 м было обнаружено, что сразу же после отбора пробы рН составляет порядка 6, в течение 3–5 минут происходит снижение рН до 4. Это явление объясняется процессом гравитационной дифференциации, в результате которой осаждаются щёлочь и рН собственно водной части достигает тех значений, которые и фиксируются при опробовании. Показатели рН для воды в разных точках варьируют от 3,55 до 3,75 (кислая среда), для взвеси (шлам) – от 5,09 до 6,83 (слабокислая и нейтральная среда) (табл. 2).

Таблица 2. Результаты опробования in situ в пруду-осветлителе со льда (t=0,5 °C)

Table 2. Results of in situ testing in ice clarification pond (t=0,5 °C)

№ точки Point number	Eh, mV	pH, ед./units	TDS, ppt	EC, µS	Примечания Notes
1	407	3,75	2,27	4,5	Вода/Water
2	497	3,66	2,37	4,75	Вода/Water
3	220	6,7	2,0	4,0	Шлам/Sludge
4	450	3,65	2,11	4,34	Вода/Water
5	200	6,83	2,2	4,39	Шлам/Sludge
6	488	3,55	2,4	4,77	Вода/Water
	275	5,09	2,28	4,54	Шлам/Sludge

Химический состав воды на 04.08.2020 г. (числитель) и на 04.08.2021 г. (знаменатель) представлен в виде обобщенной ассоциации, где справа от наименования элемента – кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, арабскими цифрами перед квадратной скобкой показан класс опасности:



В воде в концентрациях выше ПДКх содержатся компоненты 2 (кадмий, бериллий, селен) и 3 (цинк, медь, кобальт, никель) классов опасности. Наиболее значимые превышения ПДКх зафиксированы для цинка (выше 7 тыс.), меди (выше 4 тыс.), алюминия и марганца (выше 3 тыс.).

Химический состав воды в затопленном карьере «Левиха IX»

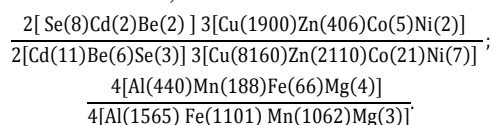
Состав подземных вод в карьере «Левиха IX» сульфатный, хлор обнаружен в количестве 11–35 мг/л, гидрокарбонат-ион – 6,1 мг/л. Среди катионов на первом месте кальций и алюминий (табл. 3). Воды кислые, водородный показатель равен 2,6–2,9. Минерализация 537–2057 мг/л. Температура подземных вод 0,5 °C, Eh=215 мВ.

Таблица 3. Состав воды в карьере IX

Table 3. Composition of water in pit IX

Дата опробования Test date	Формула Курлова Kurlov formula
28.04.2021	$M0,5 \frac{SO_4 87 Cl 12}{Ca 33 Al 25 Mg 22 NH_4 10} pH 2,9 T$ 0,5°C Eh 215 mV
23.06.2021	$M2,1 \frac{SO_4 99}{Mg 27 Ca 24 Al 23 Fe^{3+} 20} pH 2,6$

Химический состав воды на 28.04.2021 г. и на 23.06.2021 г. представлен в виде обобщенной ассоциации, где справа от наименования элемента – кратность превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, слева – класс опасности элемента:



В воде отмечается повышенное содержание компонентов 2 (кадмий, бериллий, селен), 3 (медь, цинк, кобальт, никель) класса опасности. Наиболее значи-

мые превышения ПДК_{рх} зафиксированы для меди (выше 8 тыс.) и цинка (2 тыс.).

На территории Левихинского рудника образовано 11 отвалов общей площадью 30 га, объемом 1,7 млн м³. Самый большой из них находится в южной части (отвал Южный) возле шахты «Лёвиха XII», он имеет площадь 22,6 га и объем 1,45 млн м³ [8].

В карьерных пространствах и зонах обрушения сформировано 14 водоемов площадью 10 га (4 га карьеры и 6 га провалы и зоны обрушения). Суммарный полный объем карьеров «Лёвиха IX» и «Лёвиха X» по контуру верхнего борта составляет 3753 тыс. м³, из них затопленная часть около 15 %.

Методы исследования

С целью изучения минералогического и химического состава шлама в пруду-осветлителе в мае 2021 г. были отобраны 6 проб. Опробование проводилось с лодки с помощью пробоотборника Робур-ИЛ. Максимальная мощность отложений составила 7 м в точке № 1, в остальных точках точное значение не получено из-за наличия на дне уплотненного шлама. Слой воды составляет 1–4 м (табл. 4).

Таблица 4. Глубина воды и мощность шлама

Table 4. Water depth and sludge power

Показатели, м Indicators, m	№ точки опробования Sampling point number					
	1	2	3	4	5	6
Глубина воды до дна Water depth to the bottom	4	4	1	4	1	2
Мощность шлама Sludge thickness	7	>1	>1,5	>2	>2,5	>4

Минералогический состав шлама анализировался в секторе наноминералогии и центре коллективного пользования уникальным научным оборудованием Пермского государственного национального исследовательского университета с использованием дифрактометрического анализа.

Анализ химического состава шлама пруда-осветлителя, водная и кислотная вытяжка из него (с применением азотной кислоты) выполнены в аналитическом сертификационном испытательном центре института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка) с использованием атомноэмиссионного анализа (ИСП-АЭС) и масс-спектрального анализа (ИСП-МС). В каждой вытяжке было определено по 67 компонентов, в пробах шлама по 64.

Химический состав воды в пруду-осветлителе исследовался в течение 2020–2021 гг., анализы выполнены в химико-аналитическом центре Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург) с использованием методов пламенно-эмиссионной спектроскопии, пламенно атомно-абсорбционной, масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме. В каждой пробе определено по 23 компонента.

Для работы с большим массивом данных целесообразно применять безразмерные показатели. В качестве величин, относительно которых нормируются полученные данные, используются предельно-

допустимые значения для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) [9] и для почв (ПДК_п) [10]. Коэффициент опасности определялся как $K_o = C_i / C_{пдк}$, где C_i – концентрация i -го вещества; $C_{пдк}$ – предельно допустимая концентрация i -го вещества. Для детального анализа были выбраны компоненты, которые имеют превышения по ПДК.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический, минеральный и химический состав шлама

По данным гранулометрического анализа ил из пруда-осветлителя Левихинского рудника представлен алеврито-глинистыми (пробы 1, 2, 4 и 5) и глинисто-алевритовыми (3 и 6) частицами, размер которых обычно не превышает 100 мкм. Мода распределения глинистых частиц для проб 1, 4 и 5 приходится на класс 6,30–8,00 мкм и для проб 2, 3 и 6 – на класс 12,50–16,00 мкм. В пробе 2 зафиксированы частицы песка размером менее 1,6 мм, содержание которых не превышает 0,02 %.

В пробах шлама преобладает минеральная фаза сульфатов (гипс и бассанит), массовая доля которых варьирует от 65 до 72 %. Содержание оксидов и гидроксидов железа (гётит) варьирует от 12 до 20 %. В меньшем количестве содержатся карбонаты (кальцит 3,5–8,4 %), глинистые минералы (преимущественно гидрослюда 3,9–10 %) и хлорсодержащие соли (карналлит 1,7–3,5 %). В пробах 2 и 6 зафиксирован пирит, содержание которого не превышает 1 %. В пробе 1 содержится кварц, массовая доля которого также не превышает 1 %. Во всех пробах преобладает три минерала – гипс, бассанит и гётит (рис. 2).

Анализ дифрактограмм проб ила предполагает наличие рентгеноаморфной фазы, о чем свидетельствует присутствие высокого фона кривой. Среди рентгеноаморфных минералов, согласно химическому составу проб ила, можно предположить присутствие гидроксидов железа.

В химическом составе шлама существенно преобладают оксиды железа, серы, кальция, что соответствует минеральному составу (табл. 5).

Таблица 5. Химический состав проб ила из пруда-осветлителя, мас. %

Table 5. Chemical composition of silt samples from the clarification pond, wt. %

Элемент Element	Мин Min	Макс Max	Среднее значение Median value
SiO ₂	0,91	1,26	1,11
TiO ₂	0,02	0,03	0,02
Al ₂ O ₃	3,68	5,27	4,26
Fe ₂ O ₃ общ.	23,5	35	29,8
MgO	0,78	2,97	1,80
CaO	16,4	24,5	22,7
MnO	0,4	0,93	0,59
Na ₂ O	0,34	0,61	0,4
K ₂ O	0,02	0,02	0,02
SO ₃	24,7	29,1	27,9
P ₂ O ₅	0,1	0,15	0,12
ППП	11	18,1	12,1

Примечание/Note: ППП – потери при прокаливании/loss on ignition.

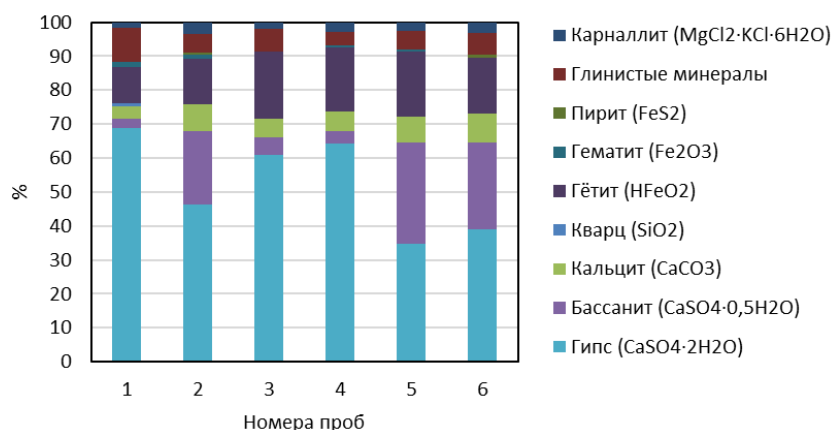


Рис. 2. Минеральный состав проб шлама, массовая доля, %

Fig 2. Mineral composition of sludge samples, mass fraction, %

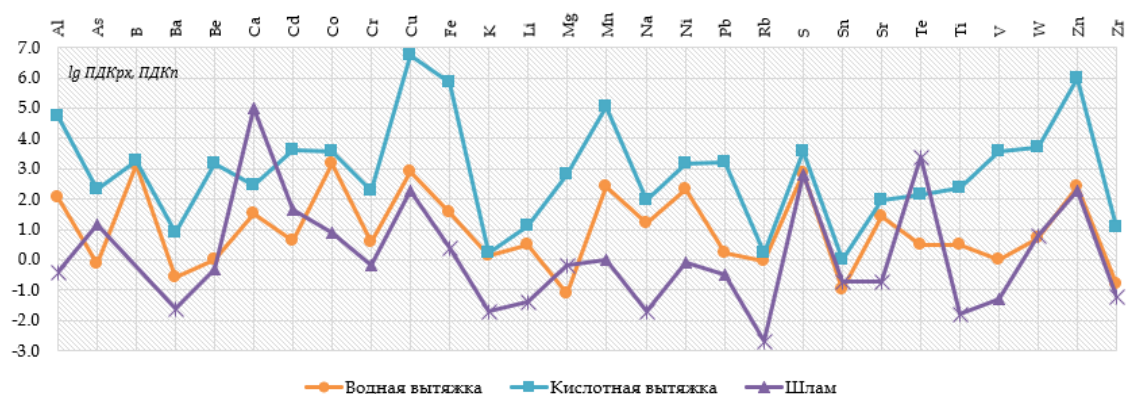


Рис. 3. Геохимический спектр элементов в шламe (lg ПДКп), водной и кислотной вытяжках (lg предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения ПДКрх); «*» – ПДКп для элементов не установлен, приведен lg для кларка концентраций в земной коре по А.П. Виноградову; В в шламe не определялся

Fig. 3. Geochemical spectrum of elements in sludge (log MACs), water and acid extracts (lg Maximum Allowable Concentration for fishery reservoirs (MACf)) «*» – maximum concentration limit for elements has not been established, lg is given for clark concentrations in the earth's crust according to A.P. Vinogradov; B was not determined in sludge

Таблица 6. Содержание компонентов в шламe и значения коэффициентов опасности

Table 6. Content of components in the sludge and the hazard coefficient values

Элементы Element	Шлам, мкг/г Sludge, µg/g			Класс опасности Hazard class [11]	Коэффициент опасности Hazard coefficient		
	мин min	макс max	среднее значение median value		мин min	макс max	среднее значение median value
As	19	37	30	1	10	19	15
Cd	12	39	22	1	25	77	44
Co	29	56	38	2	6*	11*	8*
Cr	3,3	5,8	4,2	2	–	–	–
Cu	4422	7749	6260	2	134	235	190
Mn	955	2326	1547	3	–	1,5	–
Ni	12,2	30	16,1	2	–	1,5	–
Pb	8,4	12,8	11	1	–	–	–
Sb	0,4	0,6	0,4	2	–	–	–
V	5	12	8,5	3	–	–	–
Zn	8717	18558	10138	1	158	337	185

Примечание/Note: «*» – использовался ПДК для подвижной формы/mobile form of MAC is used; «–» – не превышает предельно допустимых концентраций в почве (ПДКп)/does not exceed Maximum Allowable Concentration in soil (MACs).

Химический состав шлама имеет значительные превышения значений коэффициента опасности по 5 элементам. В концентрациях выше ПДКп содержатся компоненты 1 (цинк, кадмий, мышьяк) и 2 (медь, кобальт) классов опасности (табл. 6, рис. 3).

Согласно действующим нормативам по расчету класса опасности отходов [12], шлам Левихинского рудника относится к 3 классу опасности (умеренно опасные).

Элементный состав водной и кислотной вытяжки

Для определения содержания легкорастворимых в воде компонентов были проанализированы водные и кислотные вытяжки из образцов шлама пруда-осветлителя Левихинского рудника.

В водной вытяжке ПДКрх превышены для 14 элементов – кобальт, бор, медь, сера, марганец, цинк, никель, алюминий, железо, кальций, стронций, натрий и кадмий; самые значительные для кобальта (1,4 тыс. раз) и бора (1,3 тыс. раз) (рис. 3). Из токсичных элементов особенно заметны повышенные концентрации по 6 элементам: кадмию, относящемуся ко 2 классу опасности, а также кобальту, меди, цинку, никелю и стронцию, относящимся к 3 классу опасности (табл. 7).

В пробах кислотной вытяжки установлены значительные превышения ПДК_{рх} по 24 элементам, самые существенные для меди ($5,4 \cdot 10^6$) и цинка (940,8 тыс.), для железа, марганца, алюминия, вольфрама, кадмия, серы, кобальта, ванадия, бора, свинца, никеля и бериллия (рис. 3). Из токсичных элементов особенно

заметны повышенные концентрации по 13 элементам – кадмий, свинец и бериллий, относящиеся ко 2 классу опасности, а также медь, цинк, вольфрам, кобальт, ванадий, никель, мышьяк, хром, теллур и стронций, относящиеся к 3 классу опасности (табл. 8).

Таблица 7. Содержание компонентов в водной вытяжке и значения коэффициента опасности

Table 7. Content of components in the water extract and the values of the hazard coefficient

Элементы Elements	Водная вытяжка, мкг/г Water extract, mg/g			Класс опасности Hazard class [11]	Коэффициент опасности Hazard coefficient		
	мин min	макс max	среднее значение median value		мин min	макс max	среднее значение median value
Al	3,3	80,1	4,4	4	84	2002	111
B	101	287	135	4	1013	2868	1354
Ca	5499	6455	6092	4	31	36	34
Cd	0,004	11,3	0,02	2	–	2258	4
Co	0,1	29	14,4	3	8	2866	1437
Cu	0,2	215	0,8	3	208	214 949	806
Fe	1,8	274,2	3,8	4	18	2742	38
Li	0,1	0,4	0,3	4	–	5	3
Mn	0,4	863	2,6	4	41	86 313	260
Na	911	3987	1874	4	8	33	16
Ni	0,1	4	2,1	3	13	405	209
S	6019	13064	7050	4	602	1306	705
Sr	7,5	11,6	10,7	3	19	29	27
Zn	0,8	5572,4	2,6	3	84	557 239	259

Примечание/Note: «–» – не превышает ПДК_{рх}/does not exceed MAC_f.

Таблица 8. Содержание компонентов в кислотной вытяжке и значения коэффициента опасности

Table 8. Content of components in the acid extract and the hazard coefficient values

Элементы Elements	Кислотная вытяжка, мкг/г Acid extract, mg/g			Класс опасности Hazard class [11]	Коэффициент опасности Hazard coefficient		
	мин min	макс max	среднее значение median value		мин min	макс max	среднее значение median value
Al	1 558	2 931	2 199	4	38 935	73 265	54 965
As	5	19	10	3	100	384	202
B	119	243	181	4	1 194	2 427	1 811
Ba	2,6	7,7	5,9	4	3	10	8
Be	0,3	0,7	0,4	2	1 029	2 221	1 418
Ca	45 383	52 152	51 025	4	252	290	283
Cd	11,4	39	20	2	2 275	7 768	4 035
Co	26,6	61,3	38,0	3	2 659	6 129	3 800
Cr	3,0	5,4	3,6	3	149	272	182
Cu	3 462	6 875	5 452	3	$3,46 \cdot 10^6$	$6,87 \cdot 10^6$	$5,45 \cdot 10^6$
Fe	49 549	106 712	68 335	4	495 487	$10,67 \cdot 10^6$	683 348
Li	0,5	1,1	1,0	4	6	14	13
Mg	17 702	27 457	26 129	4	443	686	653
Mn	808	2 062	1 120	4	80 789	206 187	111 970
Na	3 588	20 153	11 458	4	30	168	95
Ni	11,6	27,7	15,4	3	1 160	2 768	1 540
Pb	7,6	10,6	9,4	2	1 272	1 770	1 571
S	34 122	53 939	38 342	4	3 412	5 394	3 834
Sr	25	55	36	3	62	138	90
Te	0,3	0,7	0,4	3	84	236	137
Ti	11,7	15,3	14,2	4	195	255	237
V	2,7	6,0	3,8	3	2 737	6 007	3 781
W	2,6	7,1	4,0	3	3 220	8 899	5 020
Zn	7 515	18 855	9 409	3	751 513	$1,89 \cdot 10^6$	940 871

Химический состав шлама (вверху), водной (в середине) и кислотной (внизу) вытяжки представлен в виде обобщенной ассоциации, где справа от наименования элемента – кратность превышения ПДК_п (для шлама) ПДК_{рх} (для водной и кислотной вытяжки) назначения, слева – класс опасности элемента (приведены 1–3 класс опасности):

$$1[\text{Zn}(185)\text{Cd}(44)\text{As}(15)] 2[\text{Cu}(190)\text{Co}(8)] \\ 2[\text{Cd}(4)] 3[\text{Co}(1437)\text{Cu}(806)\text{Zn}(259)\text{Ni}(209)\text{Sr}(27)] \\ 2[\text{Cd}(4035)\text{Pb}(1571)\text{Be}(1418)] \times \\ \times 3 \left[\begin{array}{l} \text{Cu}(5 \cdot 10^6)\text{Zn}(9 \cdot 10^5)\text{W}(5020)\text{Co}(3800) \\ \text{V}(3781)\text{Ni}(1540)\text{As}(202)\text{Cr}(182)\text{Te}(137) \end{array} \right]$$

Предложения по очистке пруда-осветлителя

В результате накопления больших объемов донных отложений и высокой степени заполнения существующего пруда-осветлителя на Левихинском руднике вопрос утилизации шламов является актуальным. Направления использования шлама могут быть связаны с рекультивацией отвалов; закладкой выработанного пространства; производством цемента; извлечением ценных компонентов; складированием и обезвоживанием шлама в геотубах.

Использование шлама для рекультивации отвалов пустых пород и некондиционных руд

Лабораторные и полевые испытания, проводимые на руднике Дойон (золотодобывающая компания IAMGOLD), расположенном на северо-западе Квебека, Канада [13], показали, что покрытие отвалов смесью шлама, образованного от нейтрализации кислых шахтных вод, с грунтом препятствует образованию кислых подотвальных вод и снижает концентрацию растворенных металлов в них [14]. Для обеспечения эффективности барьера решающее значение имеет целостность покрытия. В качестве защитного слоя поверх смеси ила и грунта необходимо добавление песчано-гравийного и плодородного слоя.

Для перекрытия отвалов отработанного Шемурского карьера (Свердловская область) используется специальный изолирующий материал. Это многослойные бентонитовые маты, которые укрывают склоны, чтобы в грунт вместе с атмосферными осадками не проникала влага. Такая изоляция горной породы исключает распространение веществ, которые могли бы негативно влиять на экологию. На биологическом этапе рекультивации на бентонитовый мат будет нанесен плодородный слой [15].

На территории Левихинского рудника в основании отвала Южный в течение нескольких десятков лет разгружаются кислые ($\text{pH}=1,9$), высокоминерализованные (от 13 до 52 г/л) подотвальные воды сульфатного состава с высоким содержанием Fe, Al и расходом в паводок до 1 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$. Необходимый объем материала (шлама) для рекультивации 30 га (при высоте георешетки, в которую будет укладываться шлам, 15 см) составляет 45 тыс. м^3 .

Таким образом, отвалы, образованные на Левихинском руднике, можно рекультивировать с помощью шлама и правильно подобранного грунта. Поскольку из шлама могут выщелачиваться элементы, относящиеся ко 2 (кадмий), к 3 (кобальт, медь, никель, стронций, цинк) и к 4 (алюминий, кальций, железо, калий, литий, марганец, натрий) классу опасности, необходимо использовать экранирующий слой (песчано-гравийный материал и плодородный слой). Использование шлама, помещенного в георешетки, грунта и экранирующего слоя позволит изолировать тело отвала от атмосферных осадков, что приведет к прекращению процесса формирования кислых подотвальных вод.

Использование шлама для рекультивации отработанных карьеров

В качестве успешного примера реализации такого подхода может служить Главный карьер Высокогорского горно-обогатительного комбината (ВГОК) в Свердловской области, в который поступают шламы фабрики мокрого обогащения, таким образом проводится техническая рекультивация нарушенных земель (рис. 4). После заполнения карьера будет проведена биологическая рекультивация [16].



Рис. 4. Чаша Главного карьера ВГОК (Фото: Юлия Григорьева)

Fig. 4. Bowl of the Main Quarry of VGOK (Photo: Yulia Grigoryeva)

В настоящее время на Шемурском медно-цинковом месторождении в чаше карьера размещают серный колчедан. Предварительно была выполнена гидроизоляция карьера. Трещины в бортах карьера были продуты и высушены компрессором. Пустоты были заполнены, на борта и дно карьера был нанесен слой торкрет-бетона и закреплен специальной базальтовой сеткой. На бортах карьера сформировался защитный слой толщиной 50 мм, который помогает предотвратить поступление воды через борта и дно карьера [15].

Объем отработанных карьеров «Левиха IX» и «Левиха X» 3753 тыс. м³. Использование шлама нейтрализации кислых шахтных вод для их закладки позволит полностью очистить пруд-осветлитель от образованного шлама объемом 2840 тыс. м³.

Использование шлама для производства строительных материалов

Исследования, которые проводились на ОАО «Гайский ГОК» и ЗАО «Бурибаевский ГОК», показали, что утилизация шлама может осуществляться несколькими путями: (1) использовать его в качестве минерального порошка в составе строительных, насыпных или асфальтобетонных смесей при строительстве дорог; (2) включать шлам в глинистую массу при производстве строительной керамики; (3) добавлять в состав сырьевой смеси для производства портландцементного клинкера [17].

Многие компоненты донных отложений аналогичны тем, которые используются в производстве цемента. Кальцит, гипс, кремнезем, алюминий, железо и магний являются обычным сырьем для цемента. Исследования показали, что шлам может заменить до 30 % портландцемента в цементной смеси [18]. Как и в большинстве вариантов повторного использования, осадок требует сушки, прежде чем его можно будет использовать [19].

Для обеспечения возможности использования шлама для производства цемента или строительных смесей необходимо выполнить большой объем земляных работ по извлечению шлама из пруда (с помощью земснаряда) с последующей сушкой на пресс-фильтре. Такие мероприятия требуют значительных финансовых затрат (по предварительным оценкам только работа земснаряда будет стоить 35 млн р.). В связи с этим утилизация шлама Левихинского рудника возможна только на основе государственно-частного партнерства, реализация которого позволит государству и частному сектору извлекать взаимную выгоду [20, 21]. Потенциальным потребителем шлама при производстве цемента может рассматриваться Невьянский цементный завод, расположенный в 35 км от п. Левиха (производительность завода составляет 85 т/час).

Использование шлама для извлечения ценных компонентов

В патенте RU 2 482 198 C1 предложен способ переработки шламов нейтрализации кислых шахтных вод с попутным извлечением цинка и меди [22]. Способ переработки шламов нейтрализации кислых шахтных вод включает его предварительное измель-

чение, после чего ведут сернокислотное выщелачивание при перемешивании путем обработки шлама кислыми шахтными водами и серной кислотой и добавление имиодиоацетатного амфолита для одновременной сорбции меди и цинка. Из сернокислого раствора путем электролиза последовательно извлекают медь, а затем цинк.

В пруду-осветлителе Левихинского рудника донные отложения содержат медь (около 0,5 % сухой массы), цинк (1 %). Количество ценных компонентов в шламе пруда-осветлителя составляет около 1,1 тыс. т меди и 2,4 тыс. т цинка (расчет выполнен по данным анализа кислотной вытяжки, табл. 8). При таких содержаниях возможна промышленная переработка донных отложений. Ценность сырья в недрах [23] составляет более 728 млн р. и 550 млн р., соответственно (табл. 9). При этом содержание золота и серебра в кислотных вытяжках ниже предела обнаружения.

Таблица 9. Количество ценных компонентов в шламе пруда-осветлителя

Table 9. Number of valuable components in the clarification pond sludge

Элемент Element	Содержание элемента в сухом шламе, т Element content in dry sludge, t	Ценность сырья в недрах, млн р. Value of raw materials in the bowels, million rubles
Ag	<ПО	<ПО
Al	482	85,4
Au	<ПО	<ПО
Cu	1 162	728,3
Fe	15867	120,2
Pb	2	0,3
Zn	2424	550,0

Примечание/Note: <ПО – ниже предела обнаружения/below detection limit; для расчета использованы данные Лондонской биржи/data of the London Stock Exchange were used for the calculation.

Обезвоживание и складирование шлама

Технология геотекстильных контейнеров идеально подходит для расчистки шламохранилищ, для временного хранения обезвоженного осадка на объекте и, что особо примечательно, для захоронения отхода непосредственно на месте обезвоживания в виде высоконагружаемого полигона, устойчивого к разрушению [24].

В качестве примера может служить объект с дренажем кислотных пород возле горы Skytop, США (рис. 5) [25]. Кислотный дренаж собирается в отстойниках, затем перекачивается в осветлители и подается в установку Geotube. Сточные воды из технологического процесса выходят почти полностью прозрачными (по сравнению с грязно-коричневыми до очистки), а качество воды пригодно для отвода в местные водоемы без дополнительной очистки [26].

В дальнейшем с обезвоженным шламом можно поступить двумя способами:

- оставить на месте в геотекстильных контейнерах и рекультивировать аналогично отвалам;
- использовать при производстве строительных материалов.



Рис. 5. Общий вид сложенных геотубов (Geotube) [25]

Fig. 5. General view of folded geotubes (Geotube) [25]

Использование геотубов (Geotube) на Левихинском руднике позволит очистить пруд-осветлитель от образованного шлама, а также исключит пыление шлама при высыхании и будет способствовать формированию рекреационного ландшафта. Тем не менее у данного предложения есть ограничения: во-первых, высокая

стоимость; во-вторых, большие затраты времени на обезвоживание материала (1–3 месяца и более); в-третьих, значительное отчуждение земли (необходимая площадь 39 га, рис. 6); в-четвертых, необходимость утилизации геотубов после временного хранения обезвоженного осадка либо их рекультивация.

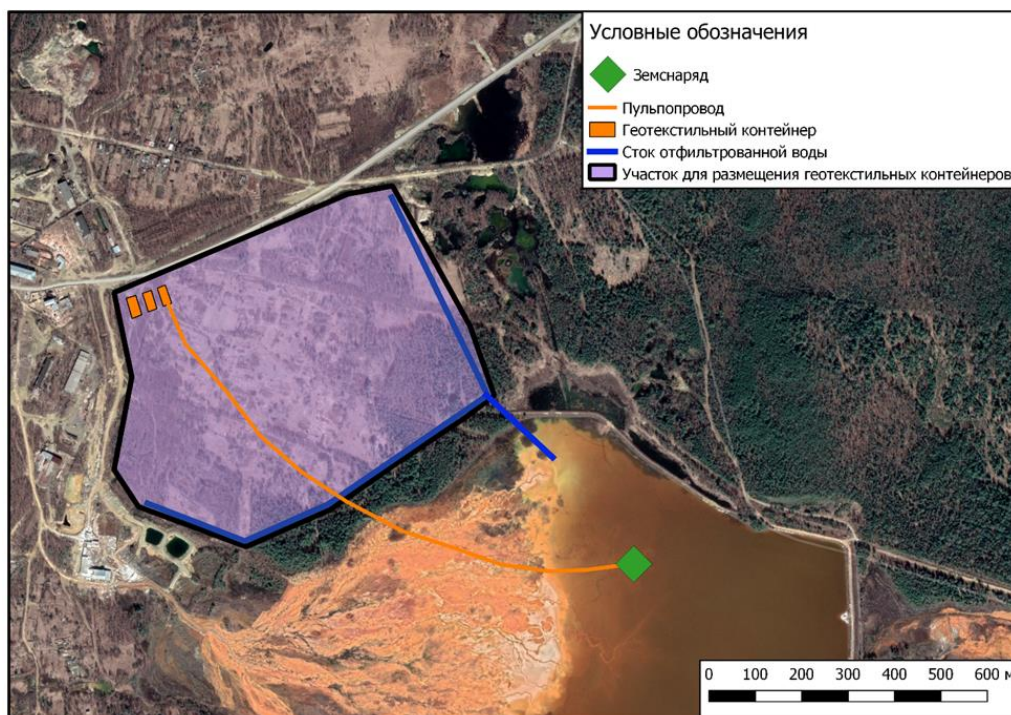


Рис. 6. Участок для размещения геотекстильных контейнеров возле пруда-осветлителя на Левихинском руднике

Fig. 6. Area for placement of geotextile containers near the clarification pond at the Levikhinsky mine

Характеристики основных рассмотренных выше направлений утилизации шлама из пруда-осветлителя Левихинского рудника, их преимуществ и недостат-

ков представлены в табл. 10. Методом балльно-рейтинговой оценки получено приоритетное направление использования донных отложений. Суть данно-

го метода заключается в следующем: определяется перечень преимуществ и ограничений; каждому фактору присваиваются соответствующие значения в баллах (от –5 до 5), к их сумме применяется весовой коэффициент – степень очистки пруда (%). Как показала балльно-рейтинговая оценка, наиболее рациональным является утилизация шлама в качестве производства строительных материалов на основе государственно-частного партнерства, реализация которо-

го позволит государству и частному сектору извлекать взаимную выгоду, при этом будет произведена 100 % очистка пруда. Наименее рациональным направлением будет извлечение ценных компонентов, основное ограничение – неполная утилизация шлама, образование отходов после извлечения ценных компонентов, необходимость подготовки и гидроизоляции площадки, а также строительство установок по извлечению.

Таблица 10. Основные направления утилизации шлама

Table 10. Main directions of sludge disposal

Приоритет (баллы) Priority (points)	Направление Direction	Объем (тыс. м ³)/ степень очистки пруда (%) Volume, (thous. m ³)/ degree of pond clean- ing (%)	Преимущества (балл) Advantages (point)	Ограничения применения (балл) Application restrictions (point)	Примеры реализации Implementation examples
I (3)	Производство строительных материалов Production of building materials	2840/100	Полная утилизация шлама, экономическая вы- года и частичная компенсация затрат Complete sludge dis- posal, economic bene- fit and partial cost re- covery 5	Необходимость организации частно-государственного парт- нерства Need to organize public-private partnership –2	ОАО «Гайский ГОК» и ЗАО «Бурибаев- ский ГОК» (Россия) Gaisky GOK OJSC and Buribaevsky GOK CJSC (Russia) [17]
II (2)	Складирование в геотубы Warehousing in geotubes	2840/100	Простота рекуль- тивации геотубов Ease of reclamation of geotubes 5	Необходимая площадь 39 га Required area 39 ha –3	Дренаж кислотных пород (США) Acid rock drainage (USA) [24] Патент RU 2 482 198 C1 Patent RU 2 482 198 C1 [19]
III (1)	Закладка выработанного пространства Worked-out space backfill	2840/100	Частичная рекуль- тивация Partial reclamation 2	Необходимость подготовки ре- культивационной смеси для снижения класса опасности Need to prepare a reclamation mixture to reduce the hazard class –1	Высокогорский гор- но-обогатительный комбинат (Россия) Vysokogorsky Mining and Processing Plant (Russia) [15]
IV (0,2)	Рекультивация отвалов Reclamation of dumps	45/10	Прекращение раз- грузки кислых подотвалных вод Termination of dis- charge of of acid wastewater 3	Необходимость подготовки ре- культивационной смеси для снижения класса опасности Need to prepare a reclamation mixture to reduce the hazard class –1	Рудник Дойон (Ка- нада) Doyon Mine (Canada) [13]
V (0,02)	Извлечение цен- ных компонентов (около 1,1 тыс. т меди и 2,4 тыс. т цинка) Extraction of valua- ble components (about 1,1 thousand tons of copper and 2,4 thousand tons of zinc)	7,7/2	Экономическая вы- года Economic benefit 5	Образование отходов после из- влечения ценных компонентов, подготовка и гидроизоляция площадки, строительство уста- новок по извлечению Waste generation after extraction of valuable components, prepara- tion and waterproofing of the site, construction of extraction facili- ties –4	Патент RU 2 482 198 C1 Patent RU 2 482 198 C1 [18]

Выводы

За 63 года работы (с 1959 по 2022 г.) пруд-осветлитель на Левихинском медноколчеданном месторождении заполнился на 95 % шламом от нейтрализованных кислых шахтных вод, в результате чего эффективность очистки воды снизилась и составляет 44–72 %. По сравнению с 2007 г. в 2020 г. превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения

увеличилась для железа в 14 раз и составляет 47 мг/л, для марганца, сульфат-иона в 2 раза и составляет 31 и 2462 мг/л, соответственно. В первую очередь это связано с тем, что оставшегося объема пруда-осветлителя недостаточно для отстаивания воды после нейтрализации.

Анализ вещественного состава шлама, образовавшегося в результате нейтрализации кислых шахтных

вод Левихинского медноколчеданного рудника, показал, что в нем преобладает минеральная фаза сульфатов (гипс и бассанит), оксидов и гидроксидов железа (гётит), карбонатов (кальцит), глинистых минералов (преимущественно гидрослюда) и хлорсодержащих солей (карналлит).

Элементный состав шлама в пруду-осветлителе имеет значительные превышения ПДК для почв по компонентам 1 (мышьяк, кадмий, цинк) и 2 (кобальт, медь) классов опасности.

Среди микрокомпонентов в пробах кислотной вытяжки значительные превышения ПДК_{рх} имеются по 24 элементам: самые существенные для меди ($5,4 \cdot 10^6$) и цинка (940,8 тыс.). Из токсичных элементов особенно заметны повышенные концентрации по 13 элементам, относящимся ко 2 и 3 классу опасности.

В водной вытяжке, в отличие от кислотной, компонентов, которые превышают ПДК_{рх}, значительно меньше – 14 элементов: существенные по кобальту (1,4 тыс. раз) и бору (1,3 тыс. раз). Из токсичных элементов особенно заметны повышенные концентрации по 6 элементам, относящимся ко 2 и 3 классу опасности.

В пределах горного отвода Левихинского рудника находится несколько отработанных карьеров (общей площадью 4 га, объем $1,45 \text{ млн м}^3$) и отвалов некондиционных руд (общей площадью 30 га, объемом $1,7 \text{ млн м}^3$), для рекультивации которых потенциально могут быть использованы шламы пруда-осветлителя.

Для повышения эффективности очистки кислых шахтных вод необходимо очистить действующий пруд-осветлитель от образованного шлама.

Были рассмотрены следующие варианты: рекультивация отвалов пустых пород и некондиционных руд, складирование в отработанных карьерах, производство строительных материалов, извлечение ценных компонентов и складирование после обезвоживания шлама в геотубах (Geotube).

Рекультивация отвала позволит изолировать тело отвала от поступления атмосферных осадков, что приведет к сокращению расхода кислых подотвальных вод, но позволит увеличить емкость пруда-осветлителя только на 10 %. Поскольку из донных отложений возможно выщелачивание элементов 2–4 классов опасности, необходимо использовать экранящий слой.

Использование шлама для закладки отработанных карьеров является привлекательным в связи с тем, что весь объем шлама из пруда-осветлителя можно разместить в карьерах, расположенных на территории Левихинского рудника. Утилизация шлама позволит устранить загрязнение поверхностных вод и улучшить экологическое состояние местности, но требуется подготовка рекультивационной смеси для снижения класса опасности шлама.

Использование шлама для производства строительных материалов является наиболее предпочтительным как с экономической, так и экологической позиции. Для реализации этого варианта необходима организация государственно-частного партнерства.

Извлечение ценных компонентов из шлама пруда-осветлителя является наименее привлекательным направлением, это связано как с экономическими затратами на строительство установок по извлечению, подготовку гидроизоляции площадки, так и с образованием попутного отхода.

Складирование шлама в геотубах (Geotube Dewatering) после обезвоживания позволит полностью очистить пруд-осветлитель от донных отложений и будет способствовать формированию рекреационного ландшафта. Основные ограничения связаны с высокой стоимостью контейнеров и необходимостью значительного отчуждения земли.

По совокупности показателей наиболее предпочтительным для очистки действующего пруда-осветлителя Левихинского рудника и решения экологических проблем представляется использование шлама в качестве производства строительных материалов. В этом случае утилизация донных отложений позволит не только продлить эксплуатацию пруда-осветлителя, повысить эффективность очистки кислых шахтных вод, значительно снизить негативное воздействие на гидросферу, но и получить выгоду при ликвидации накопленного вреда окружающей среде.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022–2024 гг.) «Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании» (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1 и за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20140, <https://rscf.ru/project/22-27-20140/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Тютков О.В. Оценка влияния затопленных медноколчеданных рудников на водные объекты Среднего Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 6. – С. 77–91.
2. Yadav H.L., Jamal A. Treatment of acid mine drainage: a general review // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. – 2016. – V. 3. – Iss. 11. – P. 116–122.
3. Gammons C.H., Icopini G.A. Improvements to the water quality of the acidic Berkeley Pit Lake due to copper recovery and sludge disposal // Mine Water and the Environment. – 2020. – V. 39. – P. 427–439.
4. 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.
5. Паспорт гидротехнического сооружения закрытого Левихинского рудника. – Екатеринбург: ООО «ЭКОЛОГИЯ», ОАО «УНИПРОМЕДЬ», 2006. – 68 с.
6. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил // Проблемы недропользования. – 2019. – Т. 3 (22). – С. 155–161.
7. 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.
8. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Состав техногенных отходов отработанного Левихинского медноколчеданного рудника // Фундаментальные исследования и прикладные разработки

- процессов переработки и утилизации техногенных образований: Труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021». – Екатеринбург, 2021. – С. 79–81.
9. 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. (Утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 с изменениями на 10 марта 2020 года).
10. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: введен в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2.
11. ГОСТ Р 70281-2022. Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения (приказ Росстандарта от 05.10.2022 N 1074-ст). – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 5 с.
12. Критерии отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду утверждены приказом Минприроды России от 4 декабря 2014 года N 536.
13. Preliminary geotechnical assessment of the potential use of mixtures of soil and acid mine drainage neutralization sludge as materials for the moisture retention layer of covers with capillary barrier effects / M. Mbonimpa, M. Bouda, I. Demers, M. Benzaazoua, D. Bois, M. Gagnon // Canadian Geotechnical Journal. – 2016. – V. 53. – № 5. – P. 828–838.
14. Use of acid mine drainage treatment sludge by combination with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation: Laboratory column tests and intermediate scale field tests / I. Demers, M. Mbonimpa, M. Benzaazoua, M. Bouda, S. Awoh, S. Lortie, M. Gagnon // Minerals Engineering. – 2017. – № 107. – P. 43–52.
15. На Ново-Шемурском месторождении ввели новый способ очистки сточных вод // Свердловское областное телевидение. 2019. URL: <https://www.obltv.ru/news/society/na-novo-shemurskom-mestorozhdenii-vveli-novyy-sposob-ochistki-stochnykh-vod/> (дата обращения 01.02.2023).
16. Соколова Г. Три века горы Высокой // «Областная газета» (Екатеринбург, Свердловская область). 2021. URL: <https://www.oblgazeta.ru/economics/industry/124846/> (дата обращения 08.11.2022).
17. Reutilization of neutralization sludge formed during the processing of mining enterprises acidic industrial waters / N. Medyanik, I. Shadrinova, I. Varlamova, T. Chekushina, N. Churlyayeva // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 10. – P. 61–68.
18. Hwa T., Yeow S., Yunn H. Non-conventional building & construction materials from sludge. URL: <http://www.ntu.edu.sg/Centre/www.eerc/hsy.pdf> (дата обращения 08.11.2022).
19. Zinck J. Review of disposal, reprocessing and reuse options for acidic drainage treatment sludge // MEND Report 3.42.3. – Canada: Natural resources Canada, 2005. – 68 p.
20. Федеральный закон «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 13.07.2015 N 224-ФЗ.
21. Пахальчак Г.Ю. Совершенствование экономических механизмов ликвидации ранее накопленного экологического ущерба // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: труды V Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2017. – С. 151–158.
22. Способ переработки шламов нейтрализации кислых шахтных вод: пат. Рос. Федерации, № 2 482 198 C1, заявл. 17.01.2012; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14. – 16 с.
23. Душин А.В. Теоретико-методологические основы государственного регулирования воспроизводства минерально-сырьевой базы: автореферат дис. д-ра геол.-минерал. наук. – Екатеринбург, 2014. – 46 с.
24. Аджиенко В.Е. Технология и контейнеры GEOTUBE® – новый процесс обезвоживания с известными преимуществами // «Техника и технологии ЖКХ» приложение к журналу «ЖКХ: журнал для руководителя и главного бухгалтера». – 2009. – № 1. – 1 с.
25. Geotube dewatering technology used to alleviate acid runoff problem from mine tailings – case study. – 2007. URL: <https://www.environmental-expert.com/articles/geotube-dewatering-technology-used-to-alleviate-acid-runoff-problem-from-mine-tailings-case-study-392451> (дата обращения 19.09.2022).
26. TenCate Geotube. URL: <https://www.tencategeo.eu/en/products/tencate-geotube/Dewatering-Geotube> (дата обращения 19.09.2022).

Поступила: 17.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 28.03.2023 г.

Информация об авторах

Рыбникова Л.С., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, Институт горного дела УрО РАН.

Рыбников П.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН.

Наволокина В.Ю., научный сотрудник лаборатории геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН.

UDC 504.06

REHABILITATION OF MAN-MADE FORMATION OF ABANDONED COPPER PYRITE DEPOSITS ON THE EXAMPLE OF LEVIKHINSKY MINE (MIDDLE URALS)

Liudmila S. Rybnikova¹,
luserib@mail.ru

Petr A. Rybnikov¹,
ribnikoff@yandex.ru

Vera Yu. Navolokina¹,
vunavolokina@gmail.com

¹ Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamin-Sibiryak street, Ekaterinburg, 620219, Russia.

The relevance of the research is related to the need to rehabilitate the abandoned copper pyrite deposits affected by acid mine waters and justify measures to clean up the existing clarification pond.

The main aim is to study the sludge composition and justify the measures to reduce the environmental load on the hydrosphere.

Objects: clarification pond and neutralization sludge of the Levikhinsky copper pyrite acid mine waters.

Methods. Laboratory studies of water and bottom sediments were carried out using atomic emission and mass spectral analysis; methods of flame emission spectrometry, flame atomic absorption, photometric method with Nessler's reagent, titrimetric, mercurimetric and potentiometric methods; mass spectrometry with ionization in inductively coupled plasma and gravimetric method.

Results. Sludge samples are dominated by sulfates (gypsum and bassanite), iron oxides and hydroxides (goethite), carbonates (calcite), clay minerals (mainly hydromica) and chlorine-containing salts (carnallite). The chemical composition of the sludge is dominated by oxides of iron, sulfur and calcium. The analysis of water and acid extracts showed that up to 24 elements belonging to hazard classes 2, 3 and 4 can be leached from the sludge in concentrations exceeding the maximum allowable values for fishery water bodies. Several options for the use of sludge from the clarification pond were analyzed: reclamation of waste rock dumps and substandard ores; backfilling of mined-out area of quarries; production of building materials; extraction of components; storage of sludge in geotubes (Geotube). The most rational is the disposal of sludge as the production of building materials on the basis of a public-private partnership, the implementation of which will allow the state and the private sector to derive mutual benefit.

Key words:

Hydrosphere, copper pyrite deposit, pollutants, acid mine waters, sludge, clarification pond.

The work was supported by the state task no. 075-00412-22 PR of the Institute of Mining Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Topic 2 (2022-2024) «Development of geoinformation technologies for assessing the protection of mining areas and predicting the development of negative processes in subsoil use» (FUWE-2022-0002) No. 1021062010532-7-1.5.1 and at the expense of the RSF grant no. 22-27-20140, <https://rscf.ru/project/22-27-20140/>.

REFERENCES

- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Tyutkov O.V. Otsenka vliyaniya zatoplennykh mednokolchedannykh rudnikov na vodnye obekty Srednego Urala [Assessing the impact of flooded copper pyrite mines on water bodies in the Middle Urals]. *Water management of Russia: problems, technologies, management*, 2014, vol. 6, pp. 77–91.
- Yadav H.L., Jamal A. Treatment of acid mine drainage: a general review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2016, vol. 3, Iss. 11, pp. 116–122.
- Gammons C.H., Icopini G.A. Improvements to the water quality of the acidic Berkeley Pit Lake due to copper recovery and sludge disposal. *Mine Water and the Environment*, 2020, vol. 39, pp. 427–439.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Y. Reducing negative impacts of Dormant pyrite copper ore mine on the geosphere in the Urals. *Journal of Mining Science*, 2022, 58 (3), pp. 519–525.
- Pasport gidrotekhnicheskogo sooruzheniya zakrytogo Levikhinskogo rudnika* [Passport of the hydraulic structure of the closed Levikhinsky mine]. Yekaterinburg, LLC «ECOLOGY». OAO UNIPROMED, 2006. 68 p.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Y. Otsenka vliyaniya zatoplennogo Levikhinskogo mednokolchedannogo rudnika na kachestvo poverkhnostnykh vod reki Tagil [Assessment of the impact of the flooded Levikhinsky copper pyrite mine on the quality of surface waters of the Tagil River]. *Problems of Subsoil Use*, 2019, vol. 3 (22), pp. 155–161.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Regularities in the evolution of groundwater quality at abandoned copper sulfide mines at the Levikha Ore Field, Central Urals, Russia. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 3, pp. 298–313.
- Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Sostav tekhnogennykh otkhodov otrabotannogo Levikhinskogo mednokolchedannogo rudnika [Composition of technogenic waste from the depleted Levikha copper pyrite mine]. *Fundamentalnye issledovaniya i prikladnye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy. Trudy V Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferentsii molodykh uchenykh «TEHNOGEN_2021»* [Fundamental research and applied development of the processes of processing and utilization of technogenic formations. Proceedings of the V Congress with international participation and the Conference of young scientists «TEHNOGEN-2021»]. Ekaterinburg, 2021. pp. 79–81.
- Normativy kachestva vody vodnykh obektov rybokhozyaystvennogo znacheniya v tom chisle normativy predelno dopustimyykh kontsentratsiy vrednykh veschestv v vodakh vodnykh obektov rybokhozyaystvennogo znacheniya*. Utverzhdeny prikazom Ministerstva selskogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13 dekabrya 2016 goda № 552 s izmeneniyami na 10 marta 2020 goda [Water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance. Approved by the order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 no. 552, as amended on March 10, 2020]. Moscow, VNIRO Pub. House, 2011. 257 p.

10. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti I (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Put into effect by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021, No. 2.
11. GOST R 70281-2022. *Okhrana okruzhayushchey sredy. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya* [SS 70281-2022. Environmental protection. Soils. Classification of chemicals for pollution control]. Moscow, Russian Institute for Standardization Publ., 2022. 5 p.
12. *Kriterii otneseniya otkhodov k I-V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu* [The criteria for assigning waste to hazard classes I–V in terms of the degree of negative impact on the environment were approved]. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 4, 2014 N 536.
13. Mbonimpa M., Bouda M., Demers I., Benzaazoua M., Bois D., Gagnon M. Preliminary geotechnical assessment of the potential use of mixtures of soil and acid mine drainage neutralization sludge as materials for the moisture retention layer of covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, vol. 53, no. 5, pp. 828–838.
14. Demers I., Mbonimpa M., Benzaazoua M., Bouda M., Awol S., Lortie S., Gagnon M. Use of acid mine drainage treatment sludge by combination with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation: laboratory column tests and intermediate scale field tests. *Minerals Engineering*, 2017, no. 107, pp. 43–52.
15. *Na Novo-Shemurskom mestorozhdenii vveli novy sposob ochistki stochnykh vod* [A new method of wastewater treatment was introduced at the Novo-Shemurskoye field]. Available at: <https://www.obltv.ru/news/society/na-novo-shemurskom-mestorozhdenii-vveli-novyy-sposob-ochistki-stochnykh-vod/> (accessed 2 January 2023).
16. *Tri veka gory Vysokoy* [Three centuries of High Mountain]. Available at: <https://www.oblgazeta.ru/economics/industry/124846/> (accessed 8 November 2022).
17. Medyanik N., Shadrinova I., Varlamova I., Cherkushina T., Churlyayeva N. Reutilization of neutralization sludge formed during the processing of mining enterprises acidic industrial waters. *Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 10, pp. 61–68. In Rus.
18. Hwa T., Yeow S., Yunn H. *Non-conventional building & construction materials from sludge*. Available at: <http://www.ntu.edu.sg/Centre/www/eerc/hsy.pdf> (accessed 8 November 2022).
19. Zinck J. Review of disposal, reprocessing and reuse options for acidic drainage treatment sludge. *MEND Report 3.42.3*. Canada, Natural resources, 2005. 68 p.
20. Federalny zakon № 224 ot 13.07.2015. *O gosudarstvenno-chastnom partnerstve, munitsipalno chastnom partnerstve v Rossiyskoy Federatsii i vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii* [Federal Law N 224 dated July 13, 2015. On Public-Private Partnership, Municipal-Private Partnership in the Russian Federation and Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation], 2015.
21. Pakhalchak G.Yu. Sovershenstvovanie ekonomicheskikh mekhanizmov likvidatsii ranee nakoplennoy ekologicheskoy ushcherba [Improving the economic mechanisms for eliminating previously accumulated environmental damage]. *Ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost gornopromyshlennykh regionov. Trudy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecological and technospheric safety of mining regions. Proc. of the V International Scientific and Practical Conference]. Ekaterinburg, 2017. pp. 151–158.
22. Cherny M.L., Mashkin A.E., Pastukhov A.M., Kirillov E.V. *Sposob pererabotki shlamov neutralizatsii kislykh shahitnykh vod* [Processing method for neutralizing acid mine water sludge]. Patent RF, no. 2 482 198 C1, 2013.
23. Dushin A.V. *Teoretiko-metodologicheskie osnovy gosudarstvennogo regulirovaniya vosproizvodstva mineralno-sirevoy bazy*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Theoretical and methodological foundations of state regulation of the reproduction of the mineral resource base. Dr. Diss. abstract]. Yekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin Publ., 2014. 46 p.
24. Adzhienko V.E. Tekhnologiya i konteynery GEOTUBE – novy protsess obezvozhivaniya s izvestnymi preimushchestvami [Technology and containers GEOTUBE – new dehydration process with well-known advantages]. *Technique and technologies of housing and communal services supplement to the journal Housing and communal services: a magazine for the head and chief accountant*, 2009, no. 1, 1 p.
25. *Geotube dewatering technology used to alleviate acid runoff problem from mine tailings – case study. 2007*. Available at: <https://www.environmental-expert.com/articles/geotube-dewatering-technology-used-to-alleviate-acid-runoff-problem-from-mine-tailings-case-study-392451> (accessed 19 September 2022).
26. *TenCate Geotube*. Available at: <https://www.tencategeo.eu/en/products/tencate-geotube/Dewatering-Geotube> (accessed 19 September 2022).

Received: 17 February 2023.

Reviewed: 28 March 2023.

Information about the authors

Liudmila S. Rybnikova, Dr. Sc., chief researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Petr A. Rybnikov, Cand. Sc., head of the laboratory of geoinformation and digital technologies in subsoil use, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Vera Y. Navolokina, researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.