ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Химический состав и экологический ущерб отходов цианирования Берикульского золотоизвлекательного завода (Кемеровская область)

Н.В.Юркевич[1,2,3]✉, **С.П.Мишенина**[4], **С.Б.Бортникова**[4], **И.В.Проворная**[4]
[1] *Институт экологии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия*
[2] *Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*
[3] *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*
[4] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*

Как цитировать эту статью: Юркевич Н.В., Мишенина С.П., Бортникова С.Б., Проворная И.В. Химический состав и экологический ущерб отходов цианирования Берикульского золотоизвлекательного завода (Кемеровская область) // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 23-35. EDN FWCXSO

Аннотация
В статье приведены результаты комплексного исследования складированных отходов Берикульского золотоизвлекательного завода (Кемеровская обл.) с применением геохимических, геофизических и эконометрических методов. С помощью метода электротомографии построены геоэлектрические разрезы (поперечные и по контуру дамбы) и 3D-модель хранилища, описывающие расположение зон с удельным электрическим сопротивлением, изменяющимся в диапазоне 3-800 Ом·м, что позволяет установить конфигурацию проводящих зон во внутренней структуре. От складированных отходов, мощность которых составляет 5-7 м, происходит фильтрация минерализованных вод в подземные горизонты, в результате чего формируется воронка, характеризующаяся удельным электрическим сопротивлением (УЭС) ~200 Ом·м, что существенно ниже УЭС вмещающих пород. Зона пониженного сопротивления уходит глубже 40 м, что однозначно указывает на вертикальное распространение дренажа, возможно, по ослабленной зоне в массиве гранодиоритов. Также формирование высокопроводящих участков отчетливо прослеживается на картах сопротивлений вплоть до 20-40 м. Проведен отбор проб твердого вещества и воды из образующихся небольших водоемов для определения их химического состава. Складированные отходы характеризуются контрастным составом в разных частях хранилища, соответственно и физико-химические параметры, и способность элементов к переходу в растворы варьируются в широком диапазоне. Бóльшая масса вещества отходов дает кислую реакцию в поровых водах и высокую минерализацию. Водные вытяжки из проб кеков свидетельствуют о значительной доле легкорастворимых соединений в веществе отходов. Содержание металлов и металлоидов в воде из прудков на поверхности (максимум Fe 7800, Al 590, Zn 160, As 1600, Be 0,022 мг/л) указывает на высокую экологическую опасность этих отходов и вместе с тем на возможную привлекательность объекта для доизвлечения полезных компонентов. Выполнена оценка ущерба, наносимого хранилищем водным объектам, находящимся в зоне его влияния, – 470 млн руб.

Ключевые слова
кеки цианирования; золотосодержащие руды; электротомография; геоэлектрическая зональность; металлы и металлоиды; подвижность; экологический ущерб

Финансирование
Работа выполнена по государственным заданиям ИГМ СО РАН FWZN-2026-0007 и ИНГГ СО РАН FWZZ-2026-0055.

Поступила: 02.04.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 14.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Отходы цианирования золотосодержащих руд, накапливаемые в хвостохранилищах и отвалах горно-обогатительных комбинатов, представляют собой один из наиболее сложных объектов воздействия на окружающую среду. По данным Федерального классификационного каталога отходов, осадки реагентной очистки сточных вод цианирования относятся к пятому классу опасности (Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242), однако их долговременное хранение в открытых

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

условиях сопряжено с трансформацией компонентов цианидсодержащих сточных вод и образованием высокотоксичных соединений [1-3]. Основную угрозу для экосистем представляют дренажные воды хвостохранилищ [4-6]. Многолетнее накопление отходов (объемы которых на отдельных предприятиях достигают миллионов тонн) формирует техногенные месторождения, содержащие как токсичные элементы, так и ценные компоненты, что обуславливает актуальность их комплексного изучения [7-9].

Результаты лабораторного моделирования показывают, что при взаимодействии атмосферных осадков с кеками цианидного выщелачивания формируются щелочные растворы (pH > 9,0), в которых накапливаются сульфат-, цианид-ионы, а также ионы тяжелых металлов (меди, цинка, кобальта, хрома, молибдена, вольфрама) за счет разрушения цианидных комплексов и окисления сульфидов [10-12]. Особую опасность представляет присутствие мышьяка, концентрации которого в дренажных водах превышают предельно допустимые для рыбохозяйственных водоемов, что обусловлено окислением арсенопирита, содержащегося в исходных рудах [11-13]. Реальность этой угрозы подтверждается аварийными ситуациями – прорывы пульпопроводов на золотодобывающих предприятиях приводят к попаданию циансодержащих стоков в речные системы, создавая угрозу массовой гибели гидробионтов и требуя экстренного вмешательства надзорных органов [14].

Помимо жидкого стока существенную опасность представляет газовая эмиссия из отвалов. Инструментальные исследования, проведенные в условиях резко континентального климата Западной Сибири с использованием газового анализатора и электротомографии, выявили активные зоны «дыхания» хвостохранилищ, в которых фиксируются серосодержащие газы (диметилсульфид, сероуглерод, диоксид серы) и азотсодержащие соединения [15]. Концентрации сероуглерода (CS_2) – токсичного соединения второго класса опасности – в приземном слое воздуха в 6-8 раз превышали среднесуточные нормы. Образование летучих соединений серы и селена связано с сезонной трансформацией отходов – процессами окисления в летний период и метилирования в зимний [15].

Вместе с тем отходы цианирования представляют собой ценный техногенный ресурс. Накопленные объемы лежалых хвостов содержат значительные количества золота, серебра и цветных металлов [16-18]. Исследования показывают, что содержание золота в твердой фазе хвостов может достигать 3,02 г/т, серебра – 10,8 г/т, а также промышленный интерес представляет содержание сурьмы и железа [19-21]. Вовлечение техногенного сырья в переработку позволяет восполнить минерально-сырьевую базу без затрат на поиски и разведку новых месторождений, при этом техногенные объекты расположены в обустроенных районах с развитой инфраструктурой [22-24]. Современные методы физико-химического воздействия (магнитно-импульсная и гидроакустическая обработки, ультразвуковая активация) позволяют повысить извлечение золота из упорных хвостов до 72-74 % за счет вскрытия тонкодисперсных форм металла [4, 25, 26]. Высокая степень удаления вредных веществ достигается за счет протекания комплекса процессов, таких как гидролиз цианидов до муравьиной кислоты и полимеров, испарение синильной кислоты, бактериальное разложение и окисление кислородом воздуха цианидов и тиацианатов, осаждение металлов в виде малорастворимых соединений [27-29].

Эффективная оценка экологических рисков и ресурсного потенциала отходов цианирования требует применения комплекса взаимодополняющих методов. Геохимические методы (лабораторное моделирование, ICP-MS анализ) необходимы для определения состава твердой и жидкой фаз, прогноза формирования кислых и щелочных дренажей [11, 19, 30]. Геофизические методы (электротомография сопротивлений) позволяют картировать внутреннюю структуру отвалов и выявлять зоны активной газовой эмиссии [15, 28, 31]. Эконометрические методы востребованы для технико-экономического обоснования переработки техногенного сырья, оценки капитальных и эксплуатационных затрат при выборе технологии (кучное выщелачивание, сорбционные методы, биогидрометаллургия) и оптимизации производственных параметров с применением математического моделирования [11, 32].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, целью настоящей работы является комплексная оценка экологической опасности отходов цианирования золотосодержащих руд на примере дренажных вод, газовой эмиссии и миграции тяжелых металлов.

Объект и методы

Объектом исследования являются отходы цианирования (кеки) Берикульского золотоизвлекательного завода (БЗЗ), пос. Новый Берикуль, Тисульский район, Кемеровская обл. (рис.1), где перерабатывались главным образом руды Старо-Берикульского месторождения (табл.1). Это одно из наиболее значительных месторождений в Мариинской тайге, входящее в состав Берикульского рудного поля, которое находится на западном контакте Дудетского гранитоидного плутона.



Рис.1. Географическое положение и размещение отходов БЗЗ (кеков цианирования флотоконцентрата)

Завод начал свою работу в 1937-1940 гг. Извлечение золота производилось цианированием сульфидного флотоконцентрата, что обусловило высокие содержания типоморфных элементов в отходах [33]. Предприятие прекратило свою работу в 1999 г., а в 2004 г. накопленные отходы были перевезены на территорию Комсомольского хвостохранилища.

Таблица 1

Содержание оксидов силикатной группы в веществе кеков цианирования, %

Элемент	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
SiO_2	24,30	16,89	50,77	9,74
TiO_2	0,52	0,37	1,00	0,18
Al_2O_3	7,30	4,17	16,39	3,11
Fe_2O_3	26,91	11,53	37,06	6,96
MnO	0,085	0,033	0,28	0,070
MgO	2,24	1,21	2,96	0,54
CaO	5,94	4,34	9,77	1,39
Na_2O	0,67	0,47	2,77	0,66
K_2O	1,25	0,75	1,69	0,26
P_2O_5	0,11	0	0,21	0,048
BaO	0,067	0,034	0,33	0,087
$S_{общая}$	23,63	1,63	30,5	6,65
$S_{сульфатная}$	4,53	1,05	10,02	2,54
As	1,2	0,17	2,3	0,63

Примечание. Число анализов – 17.

Сегодня южнее пруда-отстойника Комсомольского золотоизвлекательного завода (КЗЗ) расположены кеки цианирования БЗЗ, на их поверхности образовались техногенные прудки, вода которых окрашена в рыжие цвета до черно-коричневого. Эти отходы ограничены с юго-восточной стороны естественным рельефом, а с северо-западной – насыпной дамбой. Между перемещенными кеками и отходами Комсомольского хвостохранилища также сооружена дамба для препятствования перемещению вещества кеков и воды из прудков на соседнюю территорию (рис.2).

Берикульские кеки цианирования являются примером самозарастающих объектов. Почва в этом случае формируется при взаимодействии горной породы, биоты, климата, рельефа и времени [34], а активизация достигается созданием сеяного фитоценоза, запускающего процессы формирования гумуса, закрепления почв и последующего воспроизводства фитоценоза. Отметим, что

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

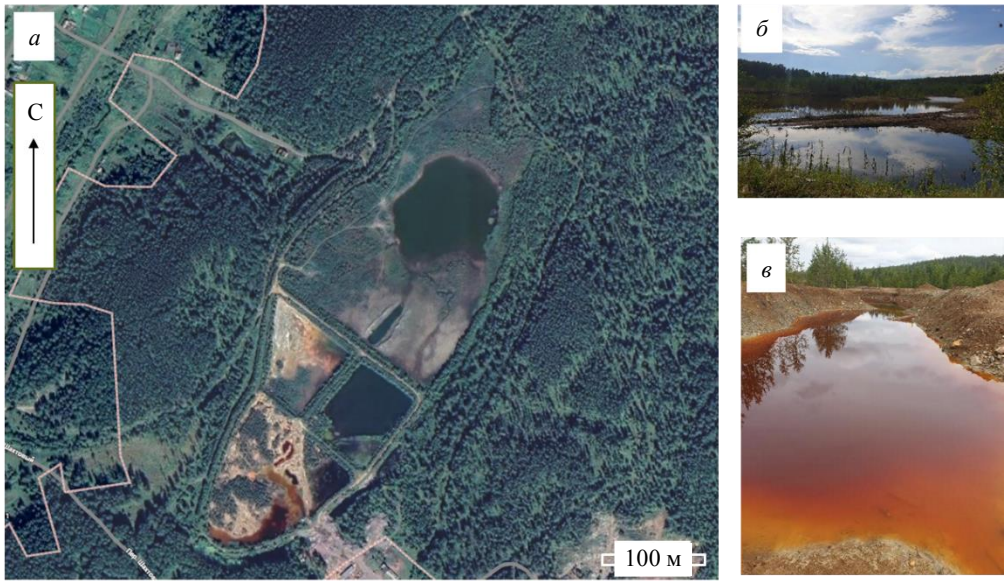


Рис.2. Спутниковый снимок хранилища отходов КЗЗ и БЗЗ (*а*), фотографии прудов на поверхности кеков БЗЗ (*б*, *в*)

растительность появляется не сплошным покровом, а на отдельных участках, вещество которых имеет близнейтральную среду. Кислая реакция полностью блокирует появление фитоценозов.

Полевые работы. *Электротомография.* В ходе полевых работ в результате рекогносцировки, ориентированной на цвет и влажность отложений, была выбрана площадка для двух- и трехмерных исследований. Измерения проводились при помощи аппаратурно-программного комплекса Скала-48 (разработка ООО «КБ Электрометрии»).

Двумерные исследования выполнены по шести профилям вдоль дамбы (рис.3), следующим один за другим непрерывно. Такая последовательность обозначается термином «roll-along». Шаг измерений по профилю составлял 5 м, число электродов в профиле – 48, суммарная длина каждого профиля – 240 м, каждый профиль перекрывается следующим на длину одной косы – 24 электрода, 120 м. Трехмерные исследования выполнены внутри кольца roll-along и представляют собой площадку с пятью параллельными профилями с межэлектродным шагом 5 м, длиной 120 м и расстоянием между профилями 25 м, объединенными в процессе обработки в единый массив.

Первичная фильтрация данных осуществлялась в программе Siber Tools (разработка ИНГГ СО РАН, ООО «КБ Электрометрии», Новосибирск). Обнаружение границ смены удельного электрического сопротивления (УЭС) проводилось методом robust при помощи инверсии, минимизирующей эффект влияния блоков данных друг на друга (ПО Res2DInv, GeoTomo, Малайзия). Для всех профилей ошибка решения обратной задачи на пятой итерации составляла 1,5-2 %, что подтверждает правильность выбранного метода. В техногенных отвалах такого типа так или иначе предполагается горизонтальное залегание слоев разной минерализации, соответственно – латеральное распределение аномалий. В таком случае, в связи с априорной геологической информацией, оптимальной расстановкой исследований является четырехэлектродная Шлюмберже с инверсией данных методом robust. Визуализация результатов электротомографических измерений осуществлялась при помощи ПО Surfer, Voxler (Golden Software, США) для двух- и трехмерной визуализации соответственно, в результате чего строились геоэлектрические разрезы, по которым можно судить о распределении электрического сопротивления. Результаты инверсии приведены к единой шкале. Схема расположения профилей электротомографии приведена на рис.3.

Отбор проб. Для определения состава вещества отобраны пробы из трех шурфов в северной, центральной и южной частях Берикульских кеков (рис.3). Глубина шурфов – 200 см, образцы брались из каждого визуально отличного слоя толщиной 15-20 см. Всего с помощью пластикового совка отобрано 56 проб по 200 г, каждая из них упакована в двойные полиэтиленовые пакеты для транспортировки в лабораторию.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис.3. Схема обследования (*а*) и фотография шурфа (*б*)

На месте из части каждой пробы изготавливалась суспензия (паста), для этого к твердому веществу добавлялась дистиллированная вода в соотношении 2:1. Метод хорошо известен в зарубежной литературе [35] и дает первичную информацию о параметрах жидкой фазы, формирующейся при контакте вещества отходов с атмосферной водой. Другая часть пробы запаковывалась в герметичные полиэтиленовые пакеты для транспортировки. Величина удельной электропроводности (УЭП) в пастах и растворах определялась прямым кондуктометрическим методом прибором Cond315i (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten, Германия). Определение проводилось в диапазоне 0-500 мСм/см с относительной погрешностью ±0,5 %. Значения pH измерены прямым потенциометрическим методом при помощи портативного прибора Эксперт-001 («Эконикс-Эксперт», Москва) или pH/T-метром HI 9025 C (HANNA Instruments, США). Перед измерением pH проведена калибровка прибора по стандартным растворам с известными значениями pH (3,56; 4,01; 6,86; 9,18). Точность методики составляла ±0,05 pH.

Гидрохимическое опробование. Прудки на поверхности кеков, а также обводная канава, окаймляющая хранилище отходов с восточной, юго-восточной и южной сторон, опробованы в общей сложности в шести точках (рис.4). Пробы отбирались в предварительно ополаскиваемые отбираемой пробой пластиковые бутыли по 200 мл на основной ионный состав и пробирки по 50 мл на концентрации микроэлементов. На месте измерялись значения pH и УЭП приборами, описанными выше.

Лабораторные анализы, эксперименты и расчеты. Пробы отходов в лабораторных условиях высушены при комнатной температуре, разделены на две части. Одна часть предназначалась для получения водных вытяжек, вторая истерта до –200 меш для аналитических определений. Водные вытяжки получали путем добавления дистиллированной воды к сухому веществу проб в соотношении 1:10 (твердое/вода), приготовленная суспензия ставилась на магнитную мешалку и оставлялась на сутки. Затем раствор фильтровался через мембранный фильтр < 0,45 мкм, в одной части измерены значения pH и УЭП, вторая часть отправлена в лабораторию для определения основного ионного состава и микроэлементов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Н.В.Юркевич, С.П.Мишенина, С.Б.Бортникова, И.В.Проворная, 2026

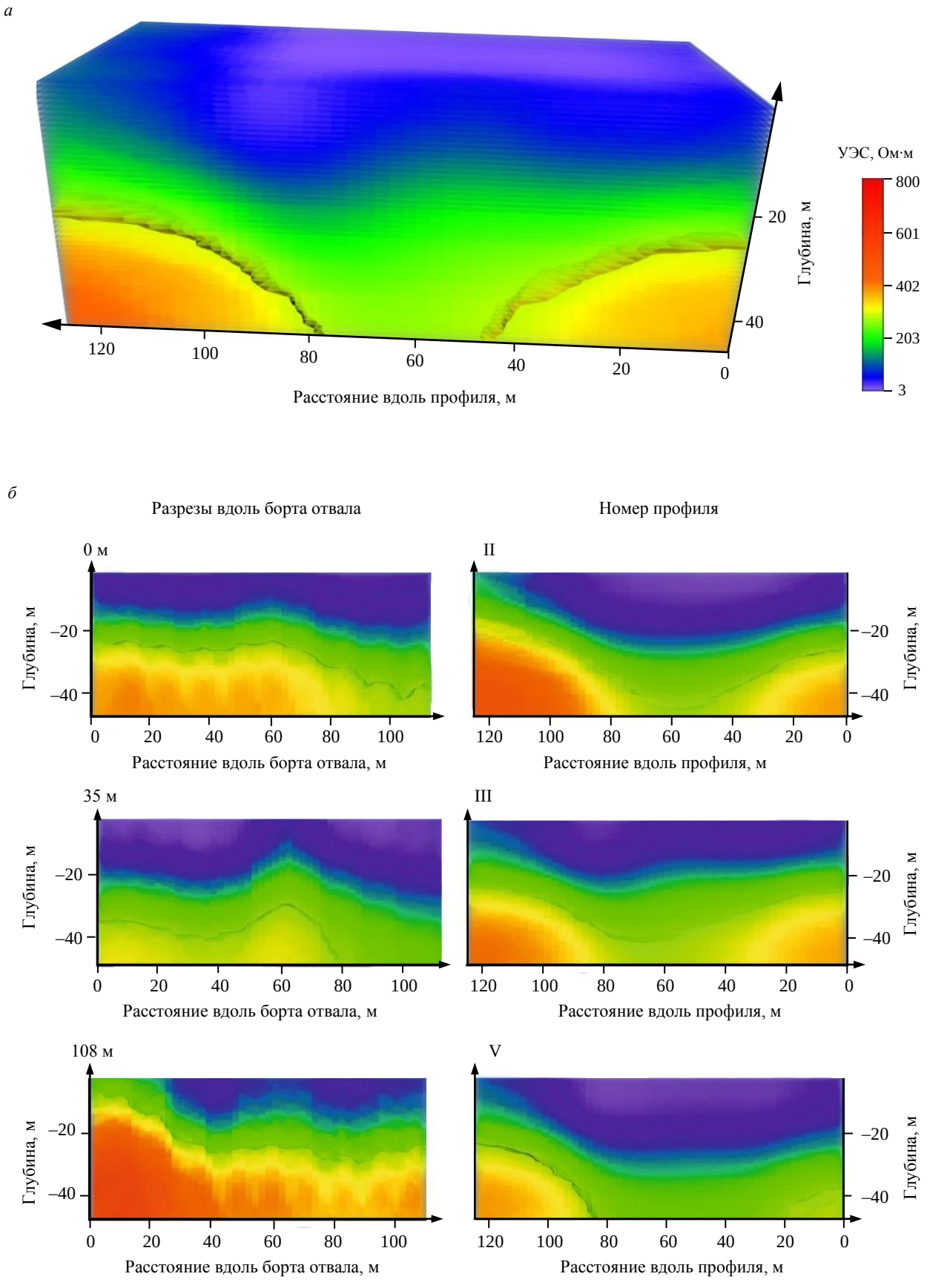


Рис.4. Геоэлектрическая 3D-модель хранилища кеков, построенная по шести поперечным профилям (*а*), и карты сопротивлений на глубинах 0, 35 и 108 м (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В пробах твердого вещества содержание оксидов силикатной группы определено методом РФА (Аналитический центр ИГМ СО РАН) на спектрометре ARL-9900XP (Thermo Fisher Scientific, США) (аналитик Н.Г.Карманова) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Элементный состав твердых проб определялся масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в химико-аналитическом центре «Плазма» (Томск, аналитик Н.В.Федюнина) на содержание Cu, Zn, Cd, Pb, Sn, Ni, Co, Mo, Ag, Au, As, Sb, Bi, Ga, In, Tl, Be и др.

Определение состава водных проб (водных вытяжек, воды из прудков) проводилось методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) с ячейкой устранения фона UCT (Проблемная научно-исследовательская лаборатория гидрогеохимии «Вода» Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического института, аналитик А.А.Хващевская). Все измерения проводились в трех параллелях для каждого элемента. Стандартное отклонение не превышало 13 %.

Эконометрические расчеты. Рассчитана оценка ущерба, возникающего при сбросе загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты[1] на основе удельного экономического ущерба от сбросов сточных вод в водоемы и приведенной массы сброса вредных веществ источником в водоемы водохозяйственного участка за год.

Корректность применения методики [31] обусловлена уникальным статусом объекта как законсервированного источника потенциальной, но не реализованной экологической опасности. Методика позволяет рассчитать гипотетический ущерб, который был бы нанесен водным объектам в случае прорыва дамбы или отсутствия консервации, тем самым количественно обосновать эколого-экономическую эффективность существующей системы сдерживания и превентивную ценность мониторинга объекта. Это делает методику единственно возможным инструментом для комплексной научной оценки рисков и ресурсного потенциала лежалых отходов цианирования в условиях правового вакуума постпроизводственной стадии.

Обсуждение результатов

Геоэлектрическая зональность. По данным электротомографии определена геоэлектрическая зональность хранилища Берикульских кеков по контуру и шести профилям (см. рис.3). Шесть поперечных профилей собраны в геоэлектрическую 3D-модель, наглядно демонстрирующую объемное строение хранилища (рис.4). Материнским породам (подстилающим гранодиоритам) соответствуют УЭС > 400 Ом·м, отходы являются высокопроводящей средой, их УЭС составляет 0,1-10 Ом·м, что является следствием состава твердого вещества – высокого содержания сульфидов (цианированию на БЗЗ подвергался сульфидный флотоконцентрат); высокой влажности отходов, поскольку при складировании не было проведено уравнивание поверхности, и ее рельеф представляет собой чередование холмиков и понижений, в которых образуются и сохраняются водоемы; а также минерализации поверхностных и поровых вод.

От складированных отходов, мощность которых составляет 10-16 м, идет фильтрация минерализованных вод в подземные горизонты, в результате сформировалась своеобразная воронка, характеризующаяся УЭС ~200 Ом·м, что существенно ниже УЭС вмещающих пород. Зона пониженного сопротивления уходит глубже 40 м, что однозначно указывает на вертикальное распространение дренажа, возможно, по ослабленной зоне в массиве гранодиоритов. Также отчетливо прослеживается формирование высокопроводящих участков на картах сопротивлений вплоть до 20-40 м (рис.4).

На профиле roll-along отражен высокий контраст сопротивлений. Очевидны верхние низкоомные отложения (не превышающие 300 Ом·м), уходящие корнями вглубь на отметках от начала профиля до 200 м и от 660 до 700 м (рис.5). Дамба с северо-западной и северо-восточной стороны складированных отходов, судя по геоэлектрическим разрезам, надежно ограничивает окружающие территории от просачивания дренажных растворов. Но так же, как и на поперечных профилях, с юго-запада высокопроводящая аномалия продолжается ниже глубины зондирования, что подтверждает наличие каналов протечки – источников высоких концентраций мышьяка в питьевых водах поселка.

[1] Методика определения предотвращенного экологического ущерба. Утверждена Председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды В.И.Даниловым-Данильяном 30 ноября 1999 г. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200035561 (дата обращения 02.04.2026).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

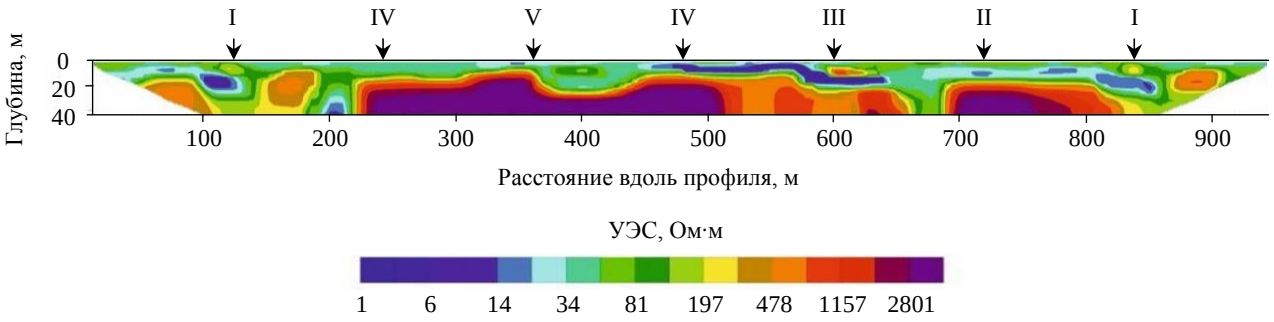


Рис.5. Геоэлектрический разрез по профилю roll-along (по дамбе хвостохранилища). Стрелками отмечены середины каждой из расстановок. Профиль roll-along расположен по бортам отвала вкруг и замыкается при обработке (профиль начинается и заканчивается первой расстановкой)

Состав твердого вещества. Складированные отходы характеризуются контрастным составом в разных частях хранилища, соответственно и физико-химические параметры, и способность элементов к переходу в растворы варьируются в широком диапазоне. Значения pH паст проб изменяются от 2,69 до 4,95, т.е. от ультра- до слабокислых, удельная электропроводность – от 340 до 6900 мкСм/см, что указывает на меняющиеся параметры. Все же бóльшая масса вещества отходов дает в поровых водах кислую реакцию и высокую минерализацию.

Вещество кеков довольно контрастно по составу, что отражает как неоднородность при складировании, так и результаты гипергенных процессов перераспределения элементов (табл.1, 2). Содержание общей серы, которое определяется главным образом количеством пирита и продуктами его окисления, колеблется от 1,6 до 30,5 %. При этом сульфатная форма серы в большинстве проб составляет ~50 % от общего содержания, а в приповерхностных пробах, где формируются обильные выцветы, доходит до 99 %, что приводит к легкому растворению сульфатов сезонными осадками и появлению кислой среды.

Содержание породообразующих компонентов достигает высокого уровня для сульфидного флотоконцентрата (до ~70 % SiO_2 + Al_2O_3), указывающего на упорный состав руд Берикульского месторождения, не поддающихся эффективной флотации (см. табл.1).

Таблица 2

Микроэлементный состав проб вещества кеков цианирования, г/т

Элемент	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Cu	780	42	1300	370
Zn	2700	69	17000	4700
Pb	530	130	4300	1200
Co	19	14	28	4,1
Ni	24	16	32	5,4
Cr	52	34	92	19
Ag	28	3,8	42	13
Cd	39	0,45	133	42
Sb	72	29	143	37
Mo	6,1	2,6	11	3,3
Sr	310	170	470	120
Rb	48	30	68	13
Hg	8,7	1,5	20	6,9
Au	2,2	0,26	3,6	1,2
Se	8,7	7,7	9,7	0,75
Tl	0,27	0,12	0,52	0,15
Be	0,58	0,09	1,4	0,58
Bi	39	12	110	30

Примечание. Число анализов – 17.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Отмечаются высокие концентрации рудообразующих элементов, достигающие, г/т: As 23000, Pb 4300, Cu 1300, Zn 17000; а также элементов первого класса опасности, г/т: Hg 20, Be 1,4, Tl 0,52 (табл.2). Отдельно следует остановиться на содержании остаточного золота в веществе кеков. По нашим определениям, оно доходит до 3,6 г/т, что является весьма привлекательным фактором для разработки технологии вторичного извлечения благородных металлов. Следует принять во внимание, что золото, вероятно, заключено в сульфидах в виде либо изморфной примеси, либо тонкорассеянной вкрапленности, поскольку при цианировании флотоконцентрата на заводе его извлечь не удалось. Это указывает на необходимость дополнительного измельчения кеков для получения товарной продукции, что ведет к существенному удорожанию технологического процесса и ставит под сомнение достижение рентабельности при переработке сырья.

Возвращаясь к экологическим аспектам проблемы складированных кеков, суммируем полученные результаты. Учитывая кислотность вещества, можно сразу сделать предположение о высокой подвижности металлов и металлоидов, а также возможности миграции за пределы хранилища. И действительно, водные вытяжки из проб кеков свидетельствуют о значительной доле легкорастворимых соединений в веществе отходов (табл.3). Содержание металлов в растворе соответствует составу твердого вещества – в пробе Бер-3 с наиболее высокой долей сульфидной составляющей концентрации металлов и металлоидов в водных вытяжках намного выше, чем в пробе Бер-1. Поступление растворов подобного состава в природные компоненты может привести к их радикальному загрязнению. Наиболее токсичные элементы – Tl и Be – находятся в сравнительно более низких концентрациях, чем большинство металлов, но, учитывая их опасность для живых организмов, становится ясен масштаб возможных последствий для окружающих территорий.

Таблица 3

Состав водных вытяжек из проб отходов

Параметр	Бер-1	Бер-3	Параметр	Бер-1	Бер-3
pH	4,76	4,51	Ni, мг/л	0,013	0,89
УЭП, мкСм/см	334	3660	Cr, мг/л	0,0017	0,37
SO_4^{2-}, мг/л	110	4600	Cd, мкг/л	6,1	192
Cl, мг/л	0,59	2,04	Ba, мкг/л	30	11
PO_4^{3-}, мг/л	0,01	11	Sb, мкг/л	1,5	12
Ca, мг/л	6,12	150	Se, мкг/л	0,11	5,1
Mg, мг/л	4,30	49	Bi, мкг/л	н/о	1,2
Na, мг/л	0,92	0,38	Mo, мкг/л	н/о	19
K, мг/л	0,10	н/о	Pb, мкг/л	2,4	0,90
Fe, мг/л	11	1500	Ag, мкг/л	н/о	0,15
Mn, мг/л	0,20	2,19	Au, мкг/л	0,004	0,018
Al, мг/л	0,92	140	Hg, мкг/л	н/о	0,17
Si, мг/л	5,7	9,0	Sr, мкг/л	48	216
As, мг/л	0,050	87	Rb, мкг/л	0,31	0,55
Cu, мг/л	0,17	8,7	Tl, мкг/л	0,0034	0,023
Zn, мг/л	0,25	10	Li, мкг/л	22	68
Co, мг/л	0,012	0,65	Be, мкг/л	0,23	1,3

Гидрохимический состав. Растворы из прудков на поверхности хранилища характеризуются кислой реакцией среды (pH 2-2,45, табл.4), высокими концентрациями сульфат-иона (2700-15000 мг/л), металлов Fe, Mn, Al, Cu, Zn, Cr, Co, Ni, Cd, Pb. Примечательны экстремальные концентрации мышьяка и бериллия, элементов первого класса опасности (110-1600 мг/л и 4,5-22 мкг/л соответственно).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 4

Состав растворов в прудках на поверхности кеков, мг/л

Параметр	Бер-1В	Бер-2В	Бер-3В	Бер-4В	Бер-5В	Бер-6В
pH	2,15	2,23	2,23	2,25	2,00	2,45
SO_4^{2-}	15000	3000	9000	3500	18000	2700
Fe	5400	2100	3600	1400	7800	780
Mn	13	8,3	14	5,8	24	4,5
Al	350	150	360	170	590	64
Cu	22	11	23	8,4	35	2,7
Zn	134	54	79	46	160	25
Cr	2,6	0,79	2,0	1,1	2,4	0,13
Co	2,7	1,1	2,5	0,88	4,3	0,57
Ni	4,9	2,1	4,4	1,7	8,3	1,0
Cd	3,3	1,2	2,0	1,1	5,6	0,61
Pb	13	2,8	5,3	1,3	7,2	0,70
As	1300	340	810	110	1600	63
Be	0,008	0,0045	0,011	0,0058	0,022	0,0002

Складирование кеков в хранилище отходов Комсомольского завода сделано таким образом, что южная часть, куда были помещены кеки, отделяется от средней и северной специальной насыпной дамбой. На протяжении нескольких лет, когда велись наблюдения и изучались складированные кеки, поверхность хранилища морфологически представляла собой холмистую местность, в пониженных частях которой формировались водоемы с черно-коричневой водой, содержащей экстремально высокие количества опасных элементов. В жаркую сухую погоду их уровень понижался, в период дождей они наполнялись. В 2022 г. во время очень дождливого лета водоемы переполнились, и вода из них начала перетекать через разрушенную дамбу в северную часть хранилища и за его пределы (рис.6). Наблюдаемые ситуации подчеркивают необходимость учета нестандартных условий, под действием которых возможно наступление экологических катастроф.

Экологический ущерб от загрязнения водных ресурсов. С учетом предоставленных данных о том, что уровень воды, как и концентрация веществ в озере, остаются постоянными на протяжении проведения измерений, а фильтрационные потери озера для местности, по данным геологов, принимаются равными 40 % от объема озера, можно заключить, что условная скорость поступления



Рис.6. Фотография пути поступления высокоминерализованных растворов из водоемов на Берикульских кеках (рыжая вода) за пределы хранилища (фото С.С.Волынкина)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

веществ в озеро может быть рассмотрена как скорость этих фильтрационных потерь. Так как суммарная площадь прудков составляет около 10000 м^2, глубина – 3 м, то объем озера, вычисляемый как их произведение, равен 30000 м^3. Тогда скорость поступления веществ вычисляется как произведение объема озера на процент фильрационнных потерь, что составляет величину, равную 30000·0,4 = 12000 м^3/год.

Исходя из данных о скорости поступления загрязняющих веществ и гигиенических нормативов, определены показатели относительной опасности A_i веществ и рассчитана приведенная масса M_i (табл.5).

Таблица 5

Приведенная масса загрязняющих веществ в техногенном озере хвостохранилища

Вещество	ПДК*, мг/л	Класс опасности	Показатель относительной опасности *i*-го вещества A_i, т/т	Общая масса сброса M_i, т/год
Fe	0,3	3	3,33	103,2
Pb	0,01	2	100	0,077
Al	0,2	3	5	6,24
As	0,01	1	100	15,6
Ca				7,56
Cd	0,001	2	1000	0,041
Co	0,1	2	10	0,05
Cr	0,05	2	20	0,38
Cu	1	3	1	0,38
Mg	50	3		5,04
Mn	0,1	3	10	0,22
Ni	0,02	2	50	0,058
K	Не регламентируется			0,074
Na	200	2	0,005	0,26
Si	20	2	0,1	0,29
Zn	5	3	1	1,68
Итого				1999

* Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения; воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования; воде плавательных бассейнов, аквапарков, согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

В численном выражении удельный ущерб $U_{\text{уд.вод}}$ для водных ресурсов Кемеровской обл., относящихся к водному бассейну р. Обь, определялся на основе значения показателя, указанного в Методике определения предотвращенного экологического ущерба от 30 ноября 1999 г. В 1999 г., исходя из данных нормативных документов, удельный ущерб оценивался в 10616,5 руб./усл.т. Для получения значения оценки удельного ущерба на 2025 г. использовался метод приведения к текущей стоимости. На основе динамики инфляции за 1999-2025 гг., удельный ущерб для водных ресурсов области $U_{\text{уд.вод}}$ = 202645 руб./усл.т.

Значение коэффициента экологической значимости для водных объектов Кемеровской обл. на уровне осуществления расчетов G = 1,16. Результаты расчетов ежегодного экологического ущерба от загрязнения водных ресурсов дали оценку в 470 млн руб.

Заключение

Определена геоэлектрическая зональность хранилища Берикульских кеков по данным электротомографии. Отходы являются высокопроводящей средой, их УЭС составляет 0,1-10 Ом·м, что является следствием состава твердого вещества – высокого содержания сульфидов; высокой влажности отходов, поскольку при складировании не было проведено уравнивание поверхности, и ее рельеф представляет собой чередование холмиков и понижений, в которых образуются и сохраняются водоемы; минерализации поверхностных и поровых вод.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Складированные отходы характеризуются контрастным составом в разных частях хранилища, следовательно и физико-химические параметры, и способность элементов к переходу в растворы варьируются в широком диапазоне. Наибольшая масса вещества отходов дает кислую реакцию в поровых водах и приводит к высокой минерализации. Водные вытяжки из проб кеков свидетельствуют о высокой доле легкорастворимых соединений в веществе отходов. Поступление растворов подобного состава может привести к радикальному загрязнению компонентов окружающей среды. Особо токсичные элементы – Tl и Be – находятся в более низких концентрациях, чем большинство металлов. Учитывая их опасность для живых организмов, становится явным масштаб возможных последствий для окружающих территорий.

Таким образом, геофизические исследования позволили корректно выбрать места отбора проб вещества отходов и воды, результаты геохимических исследований в свою очередь послужили основой для расчета экологического ущерба. Результаты расчетов ежегодного экологического ущерба от загрязнения водных ресурсов дали оценку в 470 млн руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pengyi Wang, Acong Chen, Huihuan Lian et al*. A review of cyanide-containing wastewater: Sources, hazard and treatment methods // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Iss. 2. № 121344. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121344

2. *Welman-Purchase M.D., Hansen R.N.* Cyanide within gold mine waste of the free state goldfields: A geochemical modelling approach // Environmental Pollution. 2023. Vol. 318. № 120825. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120825

3. *Adoko C.G., Madani N., Maleki M., Parviainen A.* Mapping hidden risks in mine tailings: A multi-variable geostatistical framework for environmental management // Science of The Total Environment. 2026. Vol. 1013. № 181245. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.181245

4. *Arranz-González J.C., Adánez-Sanjuán P., Rosario-Beltré A.J. et al*. A global review of sulfide tailings storage facilities to assess the representativeness of surface vs. depth sampling // Applied Geochemistry. 2026. Vol. 202. № 106777. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2026.106777

5. *Hyunjin Na, Yuik Eom, Kyoungkeun Yoo, Alorro R.D.* A review on the reprocessing of sulfide tailings for resource recovery and AMD prevention using mineral processing methods // Minerals Engineering. 2024. Vol. 218. № 109025. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.109025

6. *Maali A., Mohamedelhassan E., Bediwy A.* Utilization of mine tailings in concrete production: A bibliometric and technical review of challenges, potential, and innovation pathways // Materials Today Sustainability. 2026. Vol. 34. № 101325. DOI: 10.1016/j.mtsust.2026.101325

7. *Hicks A., Harper C.O., Amos R.T.* Sulfide mineral weathering in century-old waste rock // Applied Geochemistry. 2026. Vol. 198. № 106697. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2026.106697

8. *Jun Tang, Wen Zhang, Kai-hua Bai et al.* Recent advances in iron sulfides for heavy metal remediation and their environmental behaviors // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Iss. 6. № 119370. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119370

9. *Пашкевич М.А., Патокин Д.А.* Направления использования нитроцеллюлозосодержащих отходов химической промышленности на объектах минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 215-230. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_215

10. *Ait-khouia Y., Benzaazoua M., Elghali A. et al.* Feasibility of reprocessing gold tailings: Integrated management approach for the control of contaminated neutral mine drainage // Minerals Engineering. 2022. Vol. 187. № 107821. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107821

11. *Белова Т.П.* Лабораторное моделирование состава дренажных вод при хранении отходов цианидного выщелачивания золота // Успехи современного естествознания. 2023. № 4. С. 96-101. DOI: 10.17513/use.38030

12. *Faybishenko B., Bakhtavar E., Hewage K., Sadiq R.* Chemical composition of arsenic-based acid mine drainage in the downstream of a gold mine: Fuzzy regression and clustering analysis // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 465. № 133250. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133250

13. *Ngerem E.C., Sanusi I.A., Dalu T., Suinyuy T.N.* Sustainable acid mine drainage wastewater remediation: a comprehensive review and bibliometric analysis // Environmental Science: Advances. 2026. Vol. 5. Iss. 3. P. 681-710. DOI: 10.1039/d5va00266d

14. *Ossai I.C., Hamid F.S., Redzwan G. et al.* Progress in wastewater treatment, separation and purification technologies: mechanisms, benefits, challenges, efficiencies, and sustainability perspectives // Journal of Environmental Management. 2026. Vol. 399. № 128591. DOI: 10.1016/j.jenvman.2026.128591

15. *Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N. et al.* Sulfur and Nitrogen Gases in the Vapor Streams from Ore Cyanidation Wastes at a Sharply Continental Climate, Western Siberia, Russia // Water, Air, & Soil Pollution. 2019. Vol. 230. Iss. 12. № 307. DOI: 10.1007/s11270-019-4363-y

16. *Cotrina-Teatino M.A., Marquina-Araujo J.J., Mamani-Quispe J.N. et al.* Geochemical and mineralogical characterization of critical elements in gold tailings from the La Cienega, Peru, and assessment of their reuse potential // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Iss. 5. № 118497. DOI: 10.1016/j.jece.2025.118497

17. *Gong-hao Li, Fen Jiao, Chen Li et al.* Recovery of polymetallic elements from cyanide tailings via reduction smelting // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2025. Vol. 35. Iss. 3. P. 975-989. DOI: 10.1016/S1003-6326(24)66728-2

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

18. *Povedano-Priego C., Jroundi F., Lopez-Fernandez M. et al.* From waste to resource: A review on biological and physico-chemical metal remediation and recovery in the light of the circular economy // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 498. № 139991. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139991

19. *Сидоров И.А.* Разработка технологии извлечения золота из упорных сульфидных концентратов на основе процесса сверхтонкого помола: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Иркутск: Иргиридмет, 2018. 20 с.

20. *Tapfuma A., Mutimutema P., Bazhko O. et al.* Gold tailing metal extraction and sustainable end-use: a closed-loop review // Minerals Engineering. 2026. Vol. 239. № 110075. DOI: 10.1016/j.mineng.2026.110075

21. *Nakhaei F., Corchado-Albelo J., Alagha L. et al.* Progress, challenges, and perspectives of critical elements recovery from sulfide tailings // Separation and Purification Technology. 2025. Vol. 354. Part 4. № 128973. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.128973

22. *Kinnunen P., Karhu M., Yli-Rantala E. et al.* A review of circular economy strategies for mine tailings // Cleaner Engineering and Technology. 2022. Vol. 8. № 100499. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100499

23. *Karacan C.Ö., Erten O., Martín-Fernández J.A.* Assessment of resource potential from mine tailings using geostatistical modeling for compositions: A methodology and application to Katherine Mine site, Arizona, USA // Journal of Geochemical Exploration. 2023. Vol. 245. № 107142. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.107142

24. *Tianhua Wu, Yongtao Gao, Maowei Ji et al.* Recycling gold mine tailings into eco-friendly backfill material for a coal mine goaf: Performance insights, hydration mechanism, and engineering applications // Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 193. P. 95-114. DOI: 10.1016/j.psep.2024.11.045

25. *Padin J.M.B., Balayo K.L.P., Rapanot E.M.S., Logrosa G.T.* Material reusability in mine waste: A review on utilization of gold ore tailings in concrete production // Sustainable Chemistry One World. 2026. Vol. 9. № 100159. DOI: 10.1016/j.scowo.2025.100159

26. *Whitworth A.J., Vaughan J., Southam G. et al.* Review on metal extraction technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes // Minerals Engineering. 2022. Vol. 182. № 107537. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107537

27. *Петров С.В., Петров В.Ф.* Патент № 2316400 РФ. Способ очистки твердых цианидсодержащих отходов. Опубл. 10.02.2008. Бюл. № 4.

28. *Dimech A., Bussière B., LiZhen Cheng et al.* Monitoring moisture dynamics in multi-layer cover systems for mine tailings reclamation using autonomous and remote time-lapse electrical resistivity tomography // Canadian Geotechnical Journal. 2024. Vol. 61. № 11. P. 2505-2522. DOI: 10.1139/cgj-2023-0112

29. *Kaiwei Dong, Feng Xie, Wei Wang et al.* The detoxification and utilization of cyanide tailings: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 302. № 126946. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126946

30. *Kusi J.K., Foli G., Peasah M.Y., Akoto O.* Geochemical characterization of waste rock dump and its potential to predict acid mine drainage // Scientific African. 2024. Vol. 26. № e02350. DOI: 10.1016/j.sciaf.2024.e02350

31. *Diallo M.C., Li Zhen Cheng, Chouteau M. et al.* Abandoned old mine excavation detection by Electrical Resistivity Tomography // Engineering Geology. 2023. Vol. 320. № 107123. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107123

32. *Wickramasinghe M., Sainsbury B.A., Costa S.* Sustainable circular co-disposal of mining waste for cost efficiency // Cleaner Waste Systems. 2025. Vol. 11. № 100321. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100321

33. *Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П.* Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Гео, 2006. 169 с.

34. *Еделев А.В., Юркевич Н.В., Гуреев В.Н., Мазов Н.А.* Проблемы рекультивации складированных отходов горнорудной промышленности в Российской Федерации // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 168-186. DOI: 10.15372/FTPRPI20220618

35. *Elghali A., Benzaazoua M., Taha Y. et al.* Prediction of acid mine drainage: Where we are // Earth-Science Reviews. 2023. Vol. 241. № 104421. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104421

***Авторы*: Наталия Викторовна Юркевич,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор* (*Институт экологии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия*), *старший научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *доцент* (*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*), *yurkevich-nv@rudn.ru*, *https://orcid.org/0000-0001-8337-9148*, **София Павловна Мишенина,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0009-0001-7735-5913*, **Светлана Борисовна Бортникова,** *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-2395-7406*, **Ирина Викторовна Проворная,** *канд. экон. наук, старший научный сотрудник* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-6581-2921*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0