

ОБОБЩЕНИЕ МИРОВОЙ ПРАКТИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРНОЙ И ЛИТОЛОГО-ФАЗОВОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ИХ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ

К. Н. Залевская✉

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им.
академика Н. В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация
✉ zalevskaya.karolina@mail.ru*

Аннотация: На основе обобщения многолетней мировой практики исследований неоднородных техногенных образований с позиции комплексности и экологической безопасности освоения недр приведен анализ результатов комплексного подхода к изучению и геологической оценке лежалых отходов обогащения руд как в ходе бурения и отбора проб, так и на базе применения геофизических методов, геостатистических инструментов численного моделирования пространственного распределения содержаний основных и попутных элементов, физико-химических и физико-механических процессов, протекающих в техногенном массиве. Выполненным аналитическим исследованием определена необходимость выбора технологии разработки хранилищ лежалых отходов переработки руд на основе установленных закономерностей залегания ценных компонентов и локализации сильнообводненных зон, так как фазовое и структурное расслоение массива требует иных подходов к проведению геолого-оценочных работ на техногенном объекте.

Ключевые слова: хвостохранилища, геологическая неоднородность, методы исследования, опробование, добыча, экологические последствия

Благодарность: Исследования выполняются в рамках базового бюджетного финансирования ИПКОН РАН учредителем Минобрнауки России (тема FMMS-2024-0010).

Для цитирования: Залевская К. Н. Обобщение мировой практики исследований структурной и литолого-фазовой неоднородности техногенных образований для выбора технологий их комплексного освоения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(6):100- 109. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_100_109.

GENERALIZATION OF THE WORLD PRACTICE OF RESEARCH OF STRUCTURAL AND LITHOLOGICAL AND PHASE HETEROGENEITY OF TECHNOGENIC FORMATIONS FOR THE CHOICE OF TECHNOLOGIES OF THEIR COMPLEX DEVELOPMENT

K. N. Zalevskaya✉

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ zalevskaya.karolina@mail.ru*

Abstract: On the basis of generalization of long-term world practice of researches of heterogeneous technogenic formations from the position of comprehensiveness and ecological safety of subsoil development the analysis of results of the complex approach to study and geological estimation of the overlying waste of ore processing both during drilling and sampling, and on the basis of application of geophysical methods, geostatistical tools of numerical modeling of spatial distribution of contents of basic and associated elements, physical-chemical and physical-mechanical processes, etc. is given. The analytical research has determined the necessity of choosing the technology for the development of repositories of waste ore processing on the basis of the established patterns of occurrence of valuable components and localization of heavily watered zones, as the phase and structural stratification of the massif requires other approaches to geological-evaluation work at the technogenic object.

Keywords: tailings dumps, geologic heterogeneity, methods of study, sampling, mining, environmental effects

Acknowledgment: The research is carried out within the framework of the basic budget financing of IPKON RAS by the founder - the Ministry of Education and Science of Russia (tema FMMS-2024-0010).

For citation: Zalevskaya K. N. Generalization of the world practice of research of structural and lithological and phase heterogeneity of technogenic formations for the choice of technologies of their complex development. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(6):100-109. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_100_109.

Введение

Техногенные образования складываются в течение многих лет из руд разных горизонтов, участков, а нередко из руд разных месторождений в пределах одного шахтного поля. И помимо сложного вещественного состава с формированием зон вторичного гипергенеза и зон окисления отличаются уникальной и крайне неоднородной структурой, строением и фазовой изменчивостью массива лежалых отходов переработки руд [1–3]. Особенности строения, структуры техногенных образований и состава отходов переработки руд, преобразовавшихся под влиянием физико-химических, физических и механических процессов, требуют специфических подходов к их исследованию, учет которых в настоящее время не предусмотрен в существующих методических рекомендациях по вовлечению в эксплуатацию техногенных образований.

Выбор предпочтительной технологии разработки старогордных техногенных образований во многом определяется их строением хвостохранилища, связанным с перераспределением минерального вещества в теле массива лежалых отходов переработки руд с формированием зон с аномальными и/или низкими содержаниями ценных компонентов, а также присутствием скрытых обводненных зон ввиду преобладания в составе хвостов тонкодисперсных частиц, которые задерживают влагу и формируют фазовое и структурное расчленение техногенного массива [4].

Цель исследований

Обоснование подходов к выбору вариантов технологических решений комплексного освоения техногенных образований, сложенных отходами переработки руд на базе обобщения результатов исследований их структурной и литолого-фазовой неоднородности.

Методы исследований

Необходимость детального обследования старогордных хвостохранилищ с целью их освоения обусловлена крайней неоднородностью вещественного состава, свойств техногенного сырья, которые невозможно спрогнозировать.

Выделяются следующие признаки, влияющие на результаты обследования:

- длительное воздействие с различной интенсивностью природных факторов, таких как переменная температура воздуха, выветривание с поверхности, наличие талых, метеорных вод, микробиологическое воздействие и, как следствие, разрушение сульфидных минералов, что способствует их наилучшему вскрытию в процессе повторной переработки, и переотложение ценных металлов с концентрацией в локальной зоне хвостохранилища;

- изменчивость физико-механических характеристик техногенного сырья по глубине хвостохранилища: показателя влажности; текучести; коэффициента фильтрации; пористости; проницаемости материала, которые определяют наличие в теле техногенного образования скрытых обводненных зон.

В настоящее время методы численного, статистического моделирования физико-механических и физико-химических процессов, протекающих в динамично изменяющихся техногенных средах, являются необходимым инструментом для анализа и визуализации данных об исследуемом техногенном объекте [5, 6].

Интенсивность протекания окислительных процессов в хвостохранилище определяется такими химическими параметрами, как pH, $T^{\circ}C$, концентрация кислорода в водной фазе, скорости инфильтрации воды. Кислотный дренаж определяется как раствор с низким pH и повышенными концентрациями металлов и считается одной из самых серьезных экологических проблем, с которыми сталкивается горнодобывающая промышленность, из-за вредного воздействия на почву, а также ресурсы подземных вод. Возможность миграции токсичных металлов за пределы чаши хвостохранилища подтверждается их присутствием в грунтовых водах, преимущественно в сульфатной форме, что указывает на необходимость своевременного вовлечения в эксплуатацию техногенных образований с учетом условий неоднородной среды хранилищ переработки руд. В связи с актуальностью этой проблемы ряд исследований посвящен изучению условий протекания геохимических процессов на хвостохранилищах сульфидсодержащих руд.

Результаты исследований

Хвостохранилища, сформированные в зоне гипергенеза, подвергаются интенсивному окислению за счет выпавших осадков, насыщенных растворенными в них кислородом, азотом и т. д., которые приводят к образованию преимущественно серной кислоты и, таким образом, выступают в качестве основных агентов преобразования сульфидов [7–10]. Для изучения структуры и локализации окисленной зоны на крупнейших золотосодержащих хвостохранилищах месторождения Witwatersrand (ЮАР) были отобраны пробы с пяти его участков [11]. Зоны окисления на профилях достаточно хорошо картировались на основании их охристого (желто-оранжевого) цвета. Золоторудные хвостохранилища Witwatersrand содержат уран в виде уранинита, который является нестабильным в окислительной среде и будет подвергаться окислению до водно-подвижного U^{6+} . Растворение алюмосиликатных минералов, таких как мусковит и хлорит, приводит к высвобождению Al, Fe, K, Mg в хвостохранилище.

Физико-химические процессы, гидрологический режим, небольшая мощность хвостохранилища с доступом кислорода к техногенному сырью позволяют выделить три основные геохимические зоны:

- окисления,
- переходную,
- неокисленную.

Такое распределение pH необходимо учитывать при выборе технологии разработки хвостохранилища, как минимум при выборе средств выемки (механических, гидравличе-

ских), которые в условиях высокоагрессивной среды нельзя применять.

Распределения содержаний сульфида серы и Co, Ni, Zn, Pb, Cu, Au по глубине скважины представлено на рисунке 1. Хорошая корреляция прослеживается между содержанием сульфидной серы в хвостах и содержаниями Ni, Cu и Au в зоне бледно-серого мелкозернистого материала. Аналогично второй пик концентраций сульфидов на глубине 7 м хорошо коррелирует с содержаниями Co, Ni, Zn и Pb. Это свидетельствует о том, что концентрация металлов на такой глубине может быть результатом разрушения сульфидных минералов. В рамках проведенного исследования показано, что сульфидная сера играет важную роль в миграции металлов, особенно тяжелых, таких как золото и свинец, которые при других физико-химических условиях считаются относительно устойчивыми к условиям агрессивной среды.

Механизмы, ответственные за накопление благородных металлов в техногенных средах, остаются малоизученными. Например, в исследованиях [13] установлено, что в торфе, контактирующем с сульфидно-цианидными отходами, может накапливаться до 155 г/т Au и 560 г/т Ag. Известно, что в результате различных физико-химических, биологических процессов (фильтрация, адсорбция, осаждение Au в нерастворимых соединениях, ионный обмен и т. д.) органическое вещество способно поглощать недоизвлеченные тяжелые металлы (Fe, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb). В работе предложена гипотеза целенаправленного формирования техногенных месторождений с переслаиванием слоев золотосодержащих отходов переработки руд и торфа, при этом по прошествии времени извлечению подлежит только обогащенный торфяной слой.

Объемное моделирование геохимических процессов, протекающих вблизи поверхности хвостохранилища, как одно из перспективных альтернатив более традиционному методу исследования техногенных отходов (отбору проб по всей его глубине) может быть реализовано на базе комбинации спектрометрического определения элементного состава сырья с различными интерполяторами для оценки вероятности превышения порогового уровня концентраций необходимых элементов.

В работе [14] предложена методика 3D-моделирования изменения содержания цианидов в хвостах золотых рудни-

ков и определяющих физико-химических параметров среды при помощи программного обеспечения MATLAB coding. В результате рассмотрения различных изменений физико-химических характеристик отходов (проницаемость, кислотность среды, количество кислорода на разных уровнях, концентрации цианидов и цианистых комплексов и т. д.) была создана общая концептуальная модель пространственного распределения цианидных комплексов в техногенном образовании (рис. 2). В разработанной модели учитывается влияние большинства внешних факторов: размыва хвостов тальми и дождевыми водами, ветровой дефляции, попадания прямых солнечных лучей, что делает численную модель максимально приближенной к реальным условиям остаточного содержания цианидов и цианистых комплексов в отходах гидрометаллургического передела.

Поскольку разрушенные цианистые комплексы могут играть каталитическую роль в распаде более прочных цианистых комплексов, механизм процесса подробно описан в [15], и ускорить миграцию остаточного содержания цианидов в почву, необходимо разрабатывать новые подходы к оценке и отработке техногенных объектов, базирующиеся на требованиях к локализации зон, насыщенных токсичными металлами и/или агрессивными химическими соединениями.

Качественные и количественные результаты численного моделирования эффективно применяются как для управления хвостохранилищами с целью предотвращения распространения загрязняющих веществ за его пределами [5, 16], так и для обнаружения зон повышенной концентрации металла в техногенном образовании [17].

Старогонние хвостохранилища штата Минас-Жерайс (Бразилия) вмещают отходы различных сортов и типов руд золотодобывающих предприятий в регионе Нова-Лима. По некоторым оценкам, хвосты после процесса гравитации, флотации и цианирования руд месторождений складировались на поверхности на протяжении последних 80 лет и могут содержать благородные металлы. На основе вариограммы изменчивости содержания золота для пяти техногенных объектов была построена блочная модель с учетом неоднородности каждого из них в отдельности, а подсчитанные запасы благородного металла в одном из них составили порядка 400 кг (рис. 3а) [18].

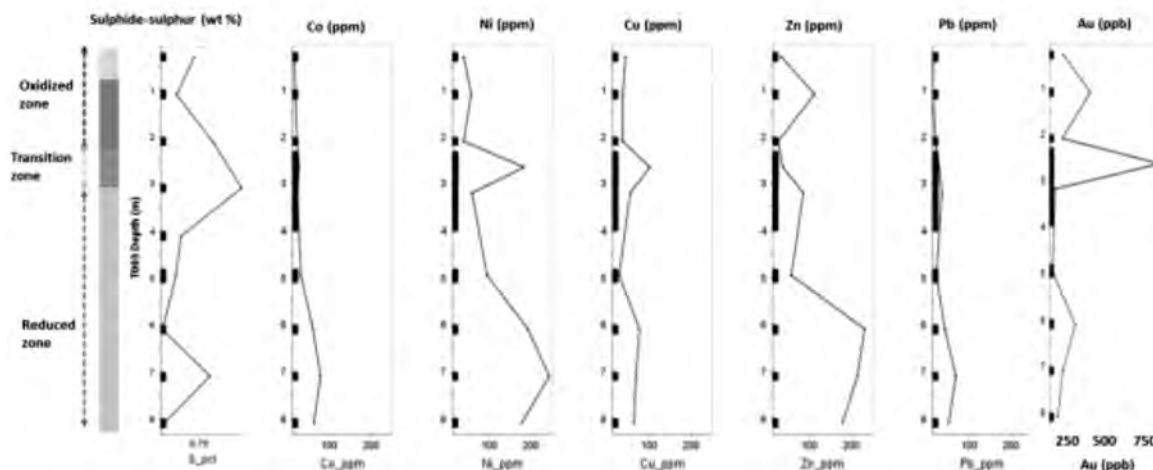


Рис. 1. Графики, отражающие корреляцию между содержаниями основных элементов и сульфидной серы в разрезе золотосодержащего хвостохранилища Witwatersrand [12] /

Fig. 1. Graphs showing the correlation between the content of major elements and sulfide sulfur in the section of the gold-bearing tailings dump Witwatersrand [12]

Для оценки общих ресурсов Co, Cu и Au в хвостохранилище Naveri (Финляндия) создана блочная модель перспективного для разработки техногенного объекта. Фрагмент блочной модели содержания благородного металла в лежах отходах золотодобычи показал, что 45 % блоков золота рентабельны для отработки при бортовом содержании отсечения 1 мг/кг и среднем – 1,4 мг/кг (рис. 3б). Согласно построенной модели, более высокие концентрации Au в более глубоких слоях обусловлены гравитационным осаждением более тяжелых минеральных частиц ценного элемента в массиве техногенного образования. Необходимо отметить, что приведенная ниже оценка промышленного потенциала минерально-техногенных ресурсов основана на геологиче-

ских данных, полученных еще в 2009 году при исследовании сульфидно-связанных металлов с серой для повторной переработки сырья. С тех пор хвостохранилище подверглось процессам выветривания, это требует проведения оценочных работ с бурением и опробованием отходов переработки комплексных золотосодержащих руд.

Трудности геологической оценки сырья старогодних техногенных образований связаны с ограничениями, возникающими при отборе проб из скважины, поскольку в большинстве своем лежае отходы переработки руд со временем консолидируются, образуя стратифицированную структуру с характерными зонами повышенной минерализации и изменчивостью фазового состояния техногенного сырья. От-

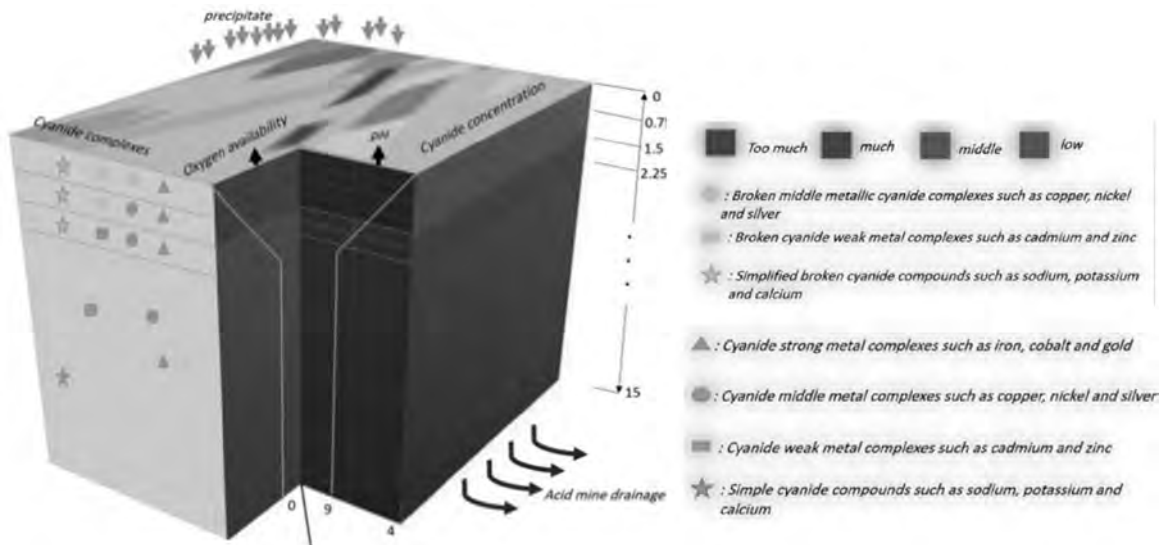


Рис. 2. Ситуационная концептуальная модель хвостохранилища распределения цианидов в золотосодержащих хвостах по полученным вариограммам в четырех различных направлениях с использованием алгоритма AdaBoost [14] /
Fig. 2. Situational conceptual model of cyanide distribution in gold-bearing tailings according to the obtained variograms in four different directions using the AdaBoost algorithm [14]

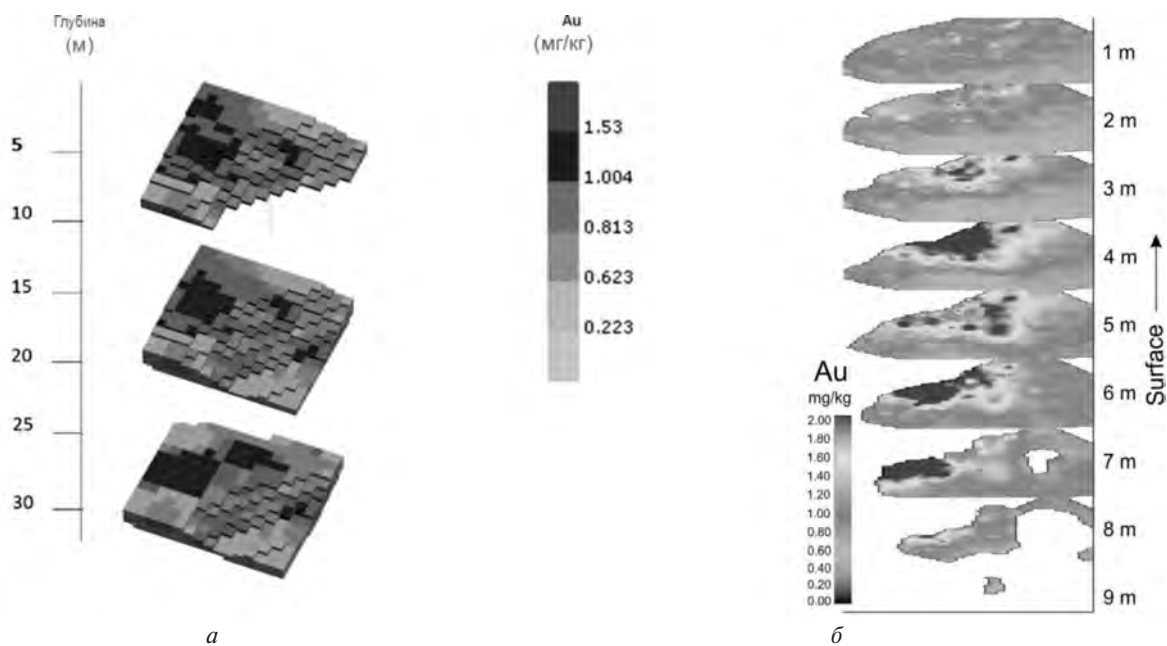


Рис. 3. Блочная модель содержания золота в лежах хвостах добычи золоторудных месторождений Бразилии (а) [18] и фрагмент пространственного распределения содержания Au на основании блочной модели в хвостохранилище Финляндии (б) [19] /
Fig. 3. Block model of gold content in the overlying tailings of Brazilian gold deposits (a) [18] and a fragment of spatial distribution of Au content based on the block model in the tailings dump in Finland (b) [19]

сюда, в случае преобладания в хвостохранилище обводненных и тонкоизмельченных до глинистого состояния отходов традиционные способы исследования состава и свойств техногенного сырья считаются мало результативными.

В рамках решения данной проблемы компанией Carbine Resources по государственному проекту по утилизации золоторудного хвостохранилища Mount Morgan (Австралия) был разработан оптимальный подход к опробованию рыхлого техногенного материала, представленного бурыми окисленными и сульфидными хвостами обогащения [20]. Пробы отбирались в ходе бурения с обратной циркуляцией воздуха. Отбор керна использовался в интервалах, где встречался неконсолидированный, мягкий и текучий материал, однако он показал приближенное представление о строении всего массива техногенного объекта.

Сведения о свойствах исходной руды, технологии переработки и способа и условий складирования хвостов считаются важным требованием для выбора подходящей для конкретного участка хвостохранилища схемы отбора проб [21, 22]. Тем не менее довольно часто необходимой информации о сырье, складированном в старогоднем хвостохранилище, либо недостаточно, либо она вовсе отсутствует. По этой причине чаще всего фактические точки бурения и интервалы опробования техногенных объектов определяются на основе визуальных различий в цвете и гранулометрического состава керна (рис. 4). Для оценочных участков использовалась ударная буровая установка Envix Nord AB с трубками из плексигласа (диаметром 40 мм и длиной 1,2 м каждая) для хранения образцов. Толщина наблюдаемого уплотненного слоя в скважине № 1_2 была отмечена приблизительно в связи с тем, что выход керна оказался неполный и метр интервала бурения был потерян, что дополнительно может быть следствием сильной обводненности отбуренного участка техногенного образования.

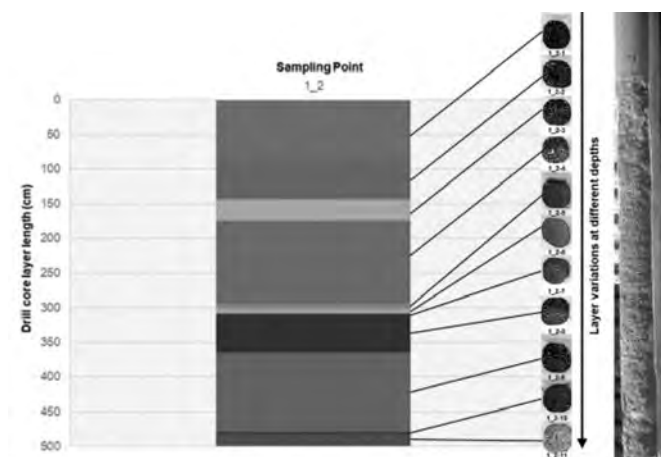


Рис. 4. Неоднородный вертикальный профиль отходов переработки вольфрамовых руд в скважине № 1_2 (справа – фрагмент керна в разрезанной трубке

из оргстекла до его разделения на пробы) [23] /

Fig. 4. Inhomogeneous vertical profile of tungsten ore processing waste in borehole No. 1_2 (on the right is a fragment of core in a cut Plexiglas tube before its separation into samples) [23]

Объем выполненных исследований по оценке сырья техногенных образований с подбором оптимальной сети опробования доказывает, что нет единого мнения о том, как лучше всего отбирать хвосты переработки руд для обеспечения репрезентативности выборки. Подходы к опробованию

техногенных объектов варьируются в следующих пределах: от отбора объемных проб, отбираемых по секторам [24], до опробования по глубине через определенный интервал или в соответствии с пространственной изменчивостью отходов переработки руд [25].

Опыт бурения старогодних хвостохранилищ показал, что не всегда возможно сформировать керн и тем более обеспечить привязку отобранных проб к определенной глубине. Горнорудный район Линарес-Ла-Каролина на юге Испании характеризуется наличием как минимум 32 старогодних техногенных объектов, которые в основном представлены сульфидными свинца, цинка и меди. Материал хвостохранилища Brunita и выбуренные образцы керна, представленные на рисунках 5а и 5б, были отобраны с использованием роторного бура TP-50/400, диаметром керна 100 мм, с постоянным вертикальным интервалом 1 м [26]. Ввиду повышенной обводненности хвостов скважины обсаживались, однако получить цельное представление о расслоении техногенного массива при выбранном подходе к проведению геологической оценки практически невозможно. Вещественный состав ряда хвостохранилищ горнорудного района Испании похож, при этом влажность и показатель текучести лежалых отходов хвостохранилища La Aquisgrana различаются в плане цельности керна и устойчивостью стенок скважины (рис. 5в и 5г).



Рис. 5. Внешний вид лежалых отходов переработки Pb-Ag и Cu-Fe руд из хвостохранилищ Испании Brunita (а, б) [26] и La Aquisgrana (в, г) [27] / Fig. 5. Appearance of Pb-Ag and Cu-Fe ore processing waste from Brunita tailings ponds in Spain (a, b) [26] and La Aquisgrana (v, g) [27]

Уникальные для каждого техногенного объекта особенности строения и структуры обуславливают создание новых способов детальной геологической оценки с целью получения актуальных сведений о структурной и фазовой неоднородности сырья в ходе освоения техногенного объекта. В этой связи при обосновании технологии разработки неоднородных техногенных образований, сложенных лежалыми отходами обогащения руд, необходимо ориентироваться на детальные способы оценки структуры и свойств отвала как основы для определения приоритетного направления добычи и выбора средств механизации отходов переработки руд.

Анализ геологических данных об участке хвостохранилища Марджанбулакской золотоизвлекательной фабрики показал необходимость получения детальных сведений о пространственном распределении ценного металла в твердой

фазе хранилища отходов золотодобычи. Установлено, что приповерхностный слой и участки недавнего складирования техногенного сырья обеднены золотом, его содержание не превышает 0,8 г/т. В толще хвостохранилища локализованы отдельные или сообщающиеся зоны с повышенным содержанием золота — более 1,6 г/т [28]. Показано, что при гидравлическом намыве и длительном хранении отходов переработки руд тонкое золото весьма равномерно распределено в хвостохранилище. Однако тенденция повышения содержания ценного компонента в хвостах с глубиной характерна не для всех оценочных участков, что говорит о возможной миграции металлов после заполнения хранилища. Кроме того, в основании хвостохранилища локализована водонасыщенная зона мощностью около 4 м несмотря на внешнюю осушенность хвостохранилища.

Похожие результаты получены при обследовании лежащих отходов обогащения комплексных оловянно-полиметаллических и свинцово-цинковых руд Краснореченской обогатительной фабрики Смирновского и Южного месторождений [29]. Оценка строения хвостохранилища показала его расслоение со сменой геохимических ассоциаций сырья с глубиной. Отмечено, что содержание ценных элементов значительно уменьшается в приплотиковой зоне, что, возможно, обусловлено инфильтрацией метеорных вод, создающих гидростатическую подушку. Наличие такой подушки определяет особые подходы к добыче сырья с приоритетного направления выемки и работы погрузочно-транспортных средств на поверхности отвала техногенного образования.

Большинство техногенных образований Кочкарского золотопромышленного региона сформированы столетие назад путем хаотичного складирования в кучи, расположенные рядом с горнодобывающими предприятиями без предварительной подготовки основания. Детальная геологическая оценка старогоднего хвостохранилища золото-мышьяковистых руд на Южном Урале обнаружила скрытые обводненные зоны в визуально осушенном массиве на глубинах более 10 м от поверхности, что позволило обосновать технологию его освоения на базе разработанных типовых технологических схем разработки отдельных участков с комбинацией способов добычи техногенного сырья [30–32]. Таким образом, разработанный способ оценки лежащих хвостов переработки руд для каждого уникального по своей сути техногенного объекта определяет выбор направления фронта ведения добычных работ, применяемого горного оборудования и этапов отработки техногенного образования.

Многочисленными зарубежными исследованиями доказано, что существует значительная разница в удельном сопротивлении между подстилающими породами основания хранилища отходов и его материалом. Это позволяет результативно применить геофизические методы обследования на основе различий удельного электрического сопротивления горной массы для определения глубины нижней границы и, соответственно, мощности самого техногенного объекта [33–35]. Основные области применения электротомографии включают в себя определение границ водоносного горизонта, пустот, обнаружение минерализованных зон, а также разведку песчаных и гравийных ресурсов.

В ИНГГ СО РАН по результатам геофизического моделирования выявлена неоднородность строения сульфидсодержащих Комсомольского из-за заметного резистентного между основанием хвостохранилища и его наполнением [36] хвостохранилищ, выраженная в наличии зоны просачивания

дренажных растворов под стенками дамбы с формированием в пределах складирования техногенного сырья протяженных обводненных высокоминерализованных горизонтов, сменяющихся водоупорами.

В работах [26, 37–39] представлены результаты совместного применения геофизических, минералогических и геохимических методов изучения хвостов флотации полиметаллических руд шахты Брунита (рис. 6).

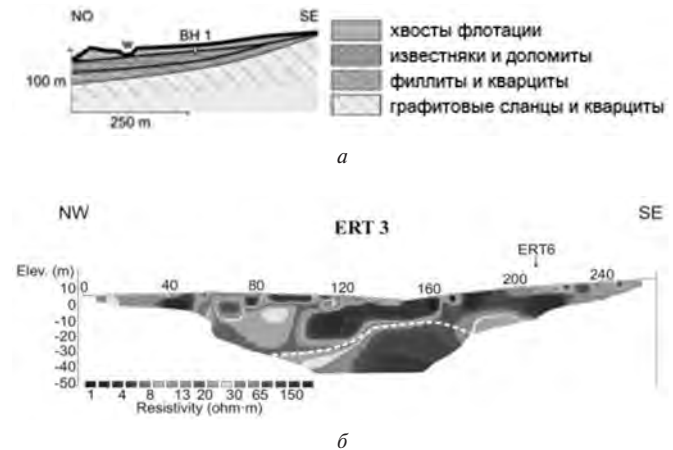


Рис. 6. Пример интерпретации результатов геофизической разведки участка хвостохранилища Брунита на базе изменения удельного электрического сопротивления пород. Граница между техногенными отходами и подстилающими метаморфическими породами (прерывистая линия) показывает изменение мощности техногенного образования [26] / Fig. 6. Example of interpretation of the results of geophysical survey of the Brunita tailings site based on the change in the specific electrical resistivity of rocks. The boundary between the technogenic waste and the underlying metamorphic rocks (dashed line) shows the change in the thickness of the technogenic formation [26]

В практике освоения техногенных образований актуальны вопросы оптимального механического уплотнения сырья в действующих хвостохранилищах [40, 41]. Концепция большинства исследователей направлена на понимание механического поведения техногенного сырья, влияющего на их сортировку обезвоживания и прочего с целью безопасного проектирования и управления в свете разработки более безопасных хвостохранилищ. При этом исследований физико-механических характеристик лежащих хвостов переработки руд с целью геомеханического обоснования конструктивных параметров технологии отработки старогодних хвостохранилищ крайне мало в российских и зарубежных источниках. Хотя учет рисков, связанных с потерей устойчивости отвалов лежащих хвостов неоднородной структуры и строения, позволит избежать негативных последствий и безопасно разрабатывать техногенный объект без потери эффективности работы горнотранспортного и выемочно-погрузочного комплексов.

В [42] разработана методика комплексного исследования хранилища лежащих отходов переработки железо-оксидных руд на базе детального отбора проб и создания геостатистической модели хвостохранилища, включающей пространственное геохимическое, минералогическое, гранулометрическое распределение состава техногенного сырья. Установлено, что доля песка и глинистой составляющей меняется с глубиной скважин и с их расположением по площади. Первые пять метров глубины, как правило, более

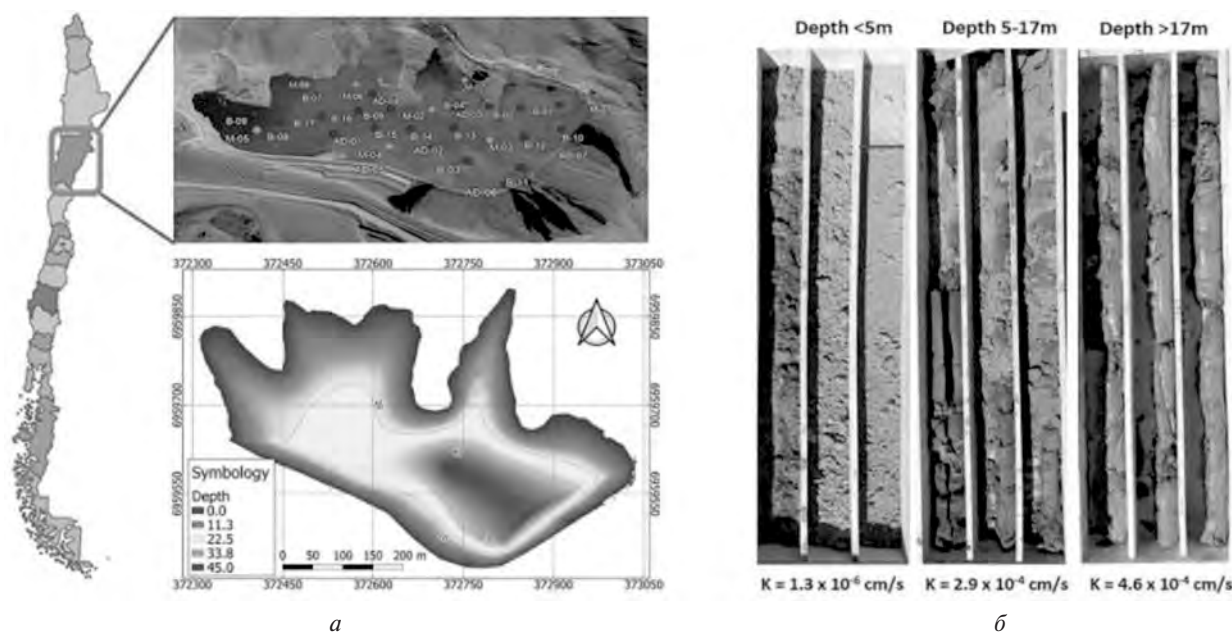


Рис. 7. План и пространственное изменение глубины хвостохранилища El Buitre (а)

и внешний вид ядра с коэффициентом проницаемости (б) отходов переработки руд для разных диапазонов глубин [42] /

Fig. 7. Plan and spatial variation of the depth of the El Buitre tailings dam (a) and appearance of the permeability coefficient core (b) of ore processing waste for different depth ranges [42]

песчаные, в то время как промежуточная зона представлена прослойками песчано-глинистого материала, а самая глубокая зона (>17 м) — в основном глинистая. Такой гранулометрический состав оказывает непосредственное влияние на проницаемость отходов, складированных в хранилище, где низкий показатель проводимости материала присущ глубоким слоям в строении техногенного массива (рис. 7).

Поскольку по глубине хвостохранилища обнаружены небольшие расслоения массива в виде чередующихся мелкозернистых песчаных и глинисто-илистых слоев, высказана гипотеза, что отходы обогатительной фабрики на начальном этапе сброса в хранилище подвергались процессам гравитационной сегрегации сульфидных минералов и оксидов железа с высоким удельным весом, создавая зоны, обогащенные ценными металлами. Гранулометрический анализ по скважине показал, что размеры зерен отходов переработки руд варьируются от 1 до 300 мкм, а средний размер составляет 40 мкм.

Проведенный анализ распределения частиц по размерам необходим для общего понимания состава техногенного сырья, однако он не дает детальной информации о распределении размеров зерен в конкретных слоях, наблюдаемых вдоль профиля хвостохранилища.

Заключение

1. Промышленное освоение техногенных образований по сравнению с природными источниками металлов отличается лучшими показателями извлечения вследствие достаточной

степени измельчения сырья для современных передовых методов обогащения, что делает лежащие отходы горно-перерабатывающих предприятий сопутствующим дополнительным минеральным ресурсом, привлекательным для недропользователя. Однако при выборе технологии и обосновании параметров эксплуатации старогодних хвостохранилищ следует учитывать не только преимущества, но и опасности, связанные с разработкой столь сложных и неоднородных техногенно-минеральных объектов. В большей мере мировым сообществом этот вопрос проработан для лежащих отходов золотодобычи.

2. Выполненный анализ показал, что лежащие хвосты переработки руд большинства геолого-промышленных типов месторождений отличаются неоднородной структурой, строением и изменчивостью фазового состояния сырья техногенных образований. Опыт мировой практики исследований хвостохранилищ с целью его вовлечения в разработку доказывает, что обоснование параметров рабочих площадок, приоритетного направления и способа выемки сырья, применяемого горнотранспортного и выемочно-погрузочного оборудования зависит от комплексного подхода к детальной оценке техногенных образований.

3. Узким местом в свете перспектив комплексного освоения хранилищ лежащих отходов переработки руд является то, что выбору и обоснованию параметров технологии разработки техногенных образований с учетом неоднородности состава и свойств сырья в мировой практике исследований по-прежнему уделено недостаточно внимания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Physical chemical characterization of historical mining waste and ARD prediction tests / A. Filcenso-Olteanu, L. Alakangas, A. Fiuza [et. al.] // Mineral Engineering Conference. — 2017. — Vol. 18. — P. 01031. — DOI: 10.1051/e3sconf/201712301031.
2. Geochemical and mineralogical investigation of cemented crusts in the tailings cover at Long Lake Gold Mine. Sudbury, Canada / B. Sapkota, B. Verbuyst, J. G. Bain [et. al.] // Journal of Hazardous Materials. — 2023 — Vol. 451. — P. 131–192. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131192.
3. Tavakoli, S. Geophysical tools to study the near-surface distribution of the tailings in the Smaltjärnen repository, south-central Sweden; a feasibility study / S. Tavakoli, T. M. Rasmussen // Acta Geophysica. — 2022. — Vol. 70, № 1. — P. 141–159. — DOI:10.1007/s11600-021-00697-0.

4. Залевская, К. Н. Оценка устойчивости откосов старогодних отвалов золотосодержащего сырья для выбора технологии их приоритетной эксплуатации / К. Н. Залевская, А. Е. Кирков // Золото. Полиметаллы. XXI век: Устойчивое развитие в условиях внешних и внутренних вызовов. — 2012. — С. 144–147.
5. Spatial Distribution and Associated Spatial Uncertainty of Potential Toxic Elements – The Lake Kalimanci Case Study (Republic of Macedonia) / M. T. D. Albuquerque, I. M. H. R. Antunes, T. Serafimovski [et. al.] // Procedia Earth and Planetary Science. — 2017. — Vol. 17. — P. 960–963. — DOI: 10.1016/j.proeps.2017.01.037.
6. Spatial modelling of hazardous elements at waste dumps using geostatistical approach: a case study Sarcheshmeh copper mine / S. Hasani, O. Asghari, F. D. Ardejani [et. al.] // Environ. Earth. Sci. — 2017. — Vol. 76 (15). — P. 13. — DOI: 10.1007/s12665-017-6852-x.
7. Assawincharoenkij, T. Mineralogy and geochemistry of tailings from a gold mine in northeastern Thailand / T. Assawincharoenkij, C. Hauzenberger, C. Sutthirath // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. — 2017. — Vol. 23 (2). — P. 364–387. — DOI: 10.1080/10807039.2016.1248894.
8. Christenson, H. Characterisation of arsenic geochemistry in mine tailings from a mesothermal gold deposit / H. Christenson, J. Pope, D. Craw // 11th Conference «Risk to Opportunity», 2018 [Elektronic resource]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/358358083_Characterisation_of_arsenic_geochemistry_in_mine_tailings_from_a_mesothermal_gold_deposit (date of access: 10.12.2024).
9. Methodological approach for mineralogical characterization of tailings from a Cu (Au, Ag) skarn type deposit using QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) / K. Guanira, T. M. Valente, C. A. Ríos [et. al.] // Journal of Geochemical Exploration. — 2019. — Vol. 209. — P. 106439. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.106439.
10. Robert, N. Inter-comparison geochemical modelling approaches and implications for environmental risk assessments: A Witwatersrand gold tailings source term characterisation study / N. Robert // Applied Geochemistry. — 2018. — Vol. 95. — P. 71–84. — DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.05.017.
11. Mhlango, S. E. Development and application of a methodological tool for prioritization of rehabilitation of abandoned tailings dumps in the Giyani and Musina areas of South Africa / S. E. Mhlango, F. Amponsah-Dacosta, A. Kadyamatimba // Cogent Engineering. — 2019. — Vol. 6 (1). — P. 24. — DOI: 10.1080/23311916.2019.1619894.
12. Distribution patterns of contaminants in the Mogale Gold tailing dam: a case study from South Africa / O. A. Abegunde, C. D. Okujeni, C. Wu [et. al.] // Environmental Earth Sciences. — 2016. — Vol. 75. — P. 1365. — DOI: 10.1007/s12665-016-6125-0.
13. Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings: Part I. Geochemistry and mineralogy / B. Y. Saryg-ool, I. Myagkaya, I. Kirichenko [et. al.] // Science of The Total Environment. — 2017. — Vol. 581. — P. 460–471. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.154.
14. Abedi-Orang, B. Mathematical modeling of fate and transport of cyanide pollutant in the gold mine tailings: with emphasis on physico-chemical process / B. Abedi-Orang, K. Seifpanahi-Shabani, R. Kakaie // Environmental Earth Sciences. — 2020. — Vol. 79. — P. 189. — DOI: 10.1007/s12665-020-08927-2.
15. Саламатов, В. И. Формирование, переработка и обезвреживание техногенного и рудного золотосодержащего сырья: монография / В. И. Саламатов, О. А. Пунишко, О. В. Саламатов. — Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. — 222 с.
16. Heavy Metal and Metalloid Contamination Assessments of Soil around an Abandoned Uranium Tailings Pond and the Contaminations Spatial Distribution and Variability / W. Wei-hong, L. Xue-gang, W. Zhe [et. al.] // Int. J. Environ. Res. Public Health. — 2018. — Vol. 15. — P. 2401. — DOI: 10.3390/ijerph15112401.
17. 3D geostatistical modelling of a tailings storage facility: Resource potential and environmental implications / R. Blannin, M. Frenzel, R. Tolosana-Delgado [et. al.] // Ore Geology Reviews. — 2023. — Vol. 154. — P. 105337. — DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105337.
18. Geochemistry and mineralogy of auriferous tailings deposits and their potential for reuse in Nova Lima Region, Brazil / M. Lemos, T. Valente, P. M. Reis [et al.] // Scientific Reports. — 2023. — Vol. 13. — P. 4339. — DOI: 10.1038/s41598-023-31133-6.
19. Parviainen, A. Revalorization of Haveri Au-Cu mine tailings (SW Finland) for potential reprocessing / A. Parviainen, F. Soto, M. A. Caraballo // Journal of Geochemical Exploration. — 2020. — Vol. 218. — P. 106614. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106614.
20. Abzalov, M. Sampling of the mineralised tailings dumps – case study of the Mount Morgan project, central Queensland / M. Abzalov, C. Newman // Applied Earth Science. — 2017. — Vol. 126. — P. 124–128. — DOI: 10.1080/03717453.2017.1343927.
21. Blannin, R. Towards a sampling protocol for the resource assessment of critical raw materials in tailings storage facilities / R. Blannin, M. Frenzel, R. Tolosana-Delgado // Journal of Geochemical Exploration. — 2022. — Vol. 236. — P. 6375–6742. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106974.
22. Juutinen, M. Geochemical and mineralogical characterization of mine tailings at the Rautuvaara mine site and aspects to environmental conditions and resource potential / M. Juutinen, M. Seitsaari, P. Sarala // Bulletin of the Geological Society of Finland. — 2023. — Vol. 95. — P. 59–78. — DOI: 10.17741/bgsf/95.1.005.
23. Characterization and Beneficiation Options for Tungsten Recovery from Yxsjöberg Historical Ore Tailings / J. Mulenshi, P. Khavari, S. Chehreh Chelgani [et. al.] // Processes. — 2019. — Vol. 7 (12). — P. 895. — DOI: 10.3390/pr7120895.
24. Hällström, L. P. B. Geochemical Characterization of Historical W, Cu and F Skarn Tailings at Yxsjöberg, Sweden / L. P. B. Hällström, L. Alkanagas, O. Martinsson // J. Geochem. Explor. — 2018. — Vol. 194. — P. 266–276. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2018.09.001.
25. Systematic characterization of historical tailings for possible remediation and recovery of critical metals and minerals – The Yxsjöberg case / J. Mulenshi, S. Gilbricht, S. C. Chelgani [et. al.] // Journal of Geochemical Exploration. — 2021. — Vol. 226. — P. 106777. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2021.106777.
26. Martín-Crespo, T. Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Unión district, Spain) / T. Martín-Crespo, D. Gómez-Ortiz, S. Martín-Velázquez // Engineering Geology. — 2018. — P. 135–146. — DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.11.018.
27. Martínez, J. A multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain / J. Martinez, M. C. Hidalgo, J. Rey // Journal of Geochemical Exploration. — 2016. — Vol. 162. — P. 62–71. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.12.013.
28. Михин, О. А. К вопросу извлечения золота из вторичного сырья Марджанбулакского золотоизвлекательного участка НГМК / О. А. Михин, Г. А. Саттаров // Горный вестник Узбекистана. — 2007. — № 1. — С. 77–81.
29. Тарасенко, И. А. Отходы Краснореченской обогатительной фабрики (Приморский край, Россия): геохимия и минералогия / И. А. Тарасенко // Вестник Московского университета. — 2017. — № 2. — С. 35–41.
30. Залевская, К. Н. Классификация технологий открытой разработки неоднородных по составу и структуре ранее сформированных техногенных образований золотодобычи / К. Н. Залевская // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы 6-й конференции международной научной школы академика РАН К. Н. Трубецкого. — М., 2024. — С. 261–264.
31. Радченко, Д. Н. Обоснование технологии добычи и переработки техногенного сырья Новотроицкого хвостохранилища / Д. Н. Радченко, И. В. Хайдаров, К. Н. Залевская // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 277–289.

32. Рыльникова, М. В. Энергоэффективные и безопасные технологии разведки и разработки техногенных образований. Принципы проектирования технологических схем / М. В. Рыльникова, Д. Н. Радченко // Горная промышленность. — 2018. — № 3. — С. 86–90.
33. Martín-Crespo, T. Monitoring study of the mine pond reclamation of Mina Concepción, Iberian Pyrite Belt (Spain) / T. Martín-Crespo, C. Ignacio, D. Gómez-Ortiz // Environmental Earth Sciences. — 2010. — Vol. 59. — P. 1275–1284.
34. Gómez-Ortiz, D. Application of electrical resistivity tomography to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) / D. Gómez-Ortiz, S. Martín-Velázquez, T. Martín-Crespo // Near Surface Geophysics. — 2010. — Vol. 8. — P. 65–74.
35. Olenchenko, V. V. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data / V. V. Olenchenko, D. O. Kucher, S. V. Bortnikova // Russian Geology and Geophysics. — 2016. — Vol. 57. — P. 617–628.
36. Кучер, Д. О. Модель распространения дренажных растворов в геологической среде по данным электроразведки / Д. О. Кучер, В. В. Оленченко // Интерэкспо Гео-Сибирь. — Новосибирск, 2016. — С. 212–216.
37. Geoenvironmental characterization of riverbeds affected by mine tailings in the Mazarrón district (Spain) / T. Martín-Crespo, D. Gómez-Ortiz, P. Martínez-Pagan [et. al.] // Journal of Geochemical Exploration. — 2012. — Vol. 119–120. — P. 6–16. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.06.004.
38. Gómez-Ortiz, D. Geoenvironmental characterization of the san quintín mine tailings, ciudad real (Spain) / D. Gómez-Ortiz, T. Martín-Crespo, M. E. Jose // Dyna. — 2010. — Vol. 77. — P. 131–140.
39. Abandoned Mine Tailings Affecting Riverbed Sediments in the Cartagena – La Unión District, Mediterranean Coastal Area (Spain) / T. Martín-Crespo, D. Gómez-Ortiz, S. Martín-Velázquez [et. al.] // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12, № 12. — P. 2042. — DOI: 10.3390/rs12122042.
40. The mechanics of a silt-sized gold tailing / W. Li, M. R. Coop, K. Senetakis [et. al.] // Engineering Geology. — 2018. — Vol. 241. — P. 97–108. — DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.05.
41. Okewale, I. Investigations into Grading Characteristics of Tailings / I Okewale, H. Grobler // Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure. — 2022. — P. 1121–1127. — DOI: 10.1007/978-981-16-7160-9_114.
42. Geochemical, mineralogical and geostatistical modelling of an IOCG tailings deposit (El Buitre, Chile): Implications for environmental safety and economic potential / E. González-Díaz, S. García, F. Soto [et. al.] // Journal of Geochemical Exploration. — 2022. — Vol. 239. — P. 106997. — DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106997.

REFERENCES

1. Filcenso-Olteanu A, Alakangas L, Fiuza A, et. al. Physical chemical characterization of historical mining waste and ARD prediction tests. *Mineral Engineering Conference*. 2017;18:01031. DOI: 10.1051/e3sconf/201712301031.
2. Sapkota B, Verbuyst B, Bain JG, et. al. Geochemical and mineralogical investigation of cemented crusts in the tailings cover at Long Lake Gold Mine, Sudbury, Canada. *Journal of Hazardous Materials*. 2023;451:131–92. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.131192.
3. Tavakoli S, Rasmussen TM. Geophysical tools to study the near-surface distribution of the tailings in the Smaltjärnen repository, south-central Sweden; a feasibility study. *Acta Geophysica*. 2022;70(1):141–59. DOI: 10.1007/s11600-021-00697-0.
4. Zalevskaya KN, Kirkov AE. Estimation of stability of slopes of old year gold-containing raw material dumps for the choice of technology of their priority exploitation. *Gold. Polymetals. XXI century: Sustainable development in the conditions of external and internal challenges*. 2012:144–47 (In Russ.).
5. Albuquerque MTD, Antunes IMHR, Serafimovski T, et. al. Spatial Distribution and Associated Spatial Uncertainty of Potential Toxic Elements – The Lake Kalimanci Case Study (Republic of Macedonia). *Procedia Earth and Planetary Science*. 2017;17:960–63. DOI: 10.1016/j.proeps.2017.01.037.
6. Hasani S, Asghari O, Ardejani FD, et. al. Spatial modelling of hazardous elements at waste dumps using geostatistical approach: a case study Sarcheshmeh copper mine. *Environ. Earth. Sci*. 2017;76(15):13. DOI: 10.1007/s12665-017-6852-x.
7. Assawincharoenkij T, Hauzenberger C, Sutthirath C. Mineralogy and geochemistry of tailings from a gold mine in northeastern Thailand. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2017;23(2):364–87. DOI: 10.1080/10807039.2016.1248894.
8. Christenson H, Pope J, Craw D. Characterisation of arsenic geochemistry in mine tailings from a mesothermal gold deposit. *11th Conference «Risk to Opportunity»*. 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/358358083_Characterisation_of_arsenic_geochemistry_in_mine_tailings_from_a_mesothermal_gold_deposit.
9. Guanira K, Valente TM, Ríos CA, et. al. Methodological approach for mineralogical characterization of tailings from a Cu (Au, Ag) skarn type deposit using QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy). *Journal of Geochemical Exploration*. 2019; 209:106439. DOI:10.1016/j.gexplo.2019.106439.
10. Robert N. Inter-comparison geochemical modelling approaches and implications for environmental risk assessments: A Witwatersrand gold tailings source term characterisation study. *Applied Geochemistry*. 2018;95:71–84. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.05.017.
11. Mhlongo SE, Amponsah-Dacosta F, Kadyamatimba A. Development and application of a methodological tool for prioritization of rehabilitation of abandoned tailings dumps in the Giyani and Musina areas of South Africa. *Cogent Engineering*. 2019;6(1):24. DOI: 10.1080/23311916.2019.1619894.
12. Abegunde OA, Okujeni CD, Wu C, et. al. Distribution patterns of contaminants in the Mogale Gold tailing dam: a case study from South Africa. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75:1365. DOI: 10.1007/s12665-016-6125-0.
13. Saryg-ool BY, Myagkaya I, Kirichenko I, et. al. Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings: Part I. Geochemistry and mineralogy. *Science of The Total Environment*. 2017;581:460–71. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.154.
14. Abedi-Orang B, Seifpanahi-Shabani K, Kakaie R. Mathematical modeling of fate and transport of cyanide pollutant in the gold mine tailings: with emphasis on physico-chemical process. *Environmental Earth Sciences*. 2020;79:189. DOI: 10.1007/s12665-020-08927-2.
15. Salamatov VI, Punishko OA, Salamatov OV. Formation, processing and dewatering of technogenic and ore gold-containing raw materials: a monograph. Irkutsk, 2019 (In Russ.).
16. Wei-hong W, Xue-gang L, Zhe W, et. al. Heavy Metal and Metalloid Contamination Assessments of Soil around an Abandoned Uranium Tailings Pond and the Contaminations Spatial Distribution and Variability. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15:2401. DOI: 10.3390/ijerph15112401.
17. Blannin R, Frenzel M., Tolosana-Delgado R, et. al. 3D geostatistical modelling of a tailings storage facility: Resource potential and environmental implications. *Ore Geology Reviews*. 2023;154:105337. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105337.
18. Lemos M, Valente T, Reis PM, et al. Geochemistry and mineralogy of auriferous tailings deposits and their potential for reuse in Nova Lima Region, Brazil. *Scientific Reports*. 2023;13:4339. DOI: 10.1038/s41598-023-31133-6.
19. Parviainen A, Soto F, Caraballo MA. Revalorization of Haveri Au-Cu mine tailings (SW Finland) for potential reprocessing. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020;218:106614. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106614.
20. Abzalov M, Newman C. Sampling of the mineralised tailings dumps – case study of the Mount Morgan project, central Queensland. *Applied Earth Science*. 2017;126:124–28. DOI: 10.1080/03717453.2017.1343927.
21. Blannin R, Frenzel M, Tolosana-Delgado R. Towards a sampling protocol for the resource assessment of critical raw materials in tailings storage facilities. *Journal of Geochemical Exploration*. 2022;236:6375–742. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106974.

22. Juutinen M, Seitsaari M, Sarala P. Geochemical and mineralogical characterization of mine tailings at the Rautuvaara mine site and aspects to environmental conditions and resource potential. *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 2023;95:59-78. DOI: 10.17741/bgsg/95.1.005.
23. Mulenshi J, Khavari P, Chehreh Chelgani S. Characterization and Beneficiation Options for Tungsten Recovery from Yxsjöberg Historical Ore Tailings. *Processes*. 2019;7(12):895. DOI: 10.3390/pr7120895.
24. Hällström LPB, Alakangas L, Martinsson O. Geochemical Characterization of Historical W, Cu and F Skarn Tailings at Yxsjöberg, Sweden. *J. Geochem. Explor.* 2018;194:266-76. DOI: 10.1016/j.gexplo.2018.09.001.
25. Mulenshi J, Gilbricht S, Chelgani SC, et. al. Systematic characterization of historical tailings for possible remediation and recovery of critical metals and minerals – The Yxsjöberg case. *Journal of Geochemical Exploration*. 2021;226:106777. DOI: 10.1016/j.gexplo.2021.106777.
26. Martín-Crespo T, Gómez-Ortiz D, Martín-Velázquez S. Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain). *Engineering Geology*. 2018;135-46. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.11.018.
27. Martínez J, Hidalgo MC, Rey JA multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016;162:62-71. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.12.013.
28. Mikhin OA, Sattarov GS. To the question of gold extraction from secondary raw materials of Marjanbulak gold extraction site of NGMK. *Mining Bulletin of Uzbekistan*. 2007;1:77-81 (In Russ.).
29. Tarasenko IA. Waste Krasnorechenskaya concentrator (Primorsky Krai, Russia): geochemistry and mineralogy. *Bulletin of Moscow University*. 2017;2:35-41 (In Russ.).
30. Zalevskaya KN. Classification of technologies for open pit mining of heterogeneous in composition and structure early formed technogenic formations of gold mining. Proceedings of the 6th Conference of the International Scientific School of Academician RAS K. N. Trubetskoy. Problems and prospects of complex development and preservation of earth subsoil. Moscow, 2024:261-4 (In Russ.).
31. Radchenko DN, Khaidarov IV, Zalevskaya KN. Justification of extraction and processing technology of technogenic raw materials of Novotroitsk tailings dump. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2020;1:277-89 (In Russ.).
32. Rylnikova MV, Radchenko DN. Energy-efficient and safe technologies of exploration and development of technogenic formations. Design principles of technological schemes. *Mining Industry*. 2018;3:86-90 (In Russ.).
33. Martín-Crespo T, Ignacio C, Gómezortiz D. Monitoring study of the mine pond reclamation of Mina Concepción, Iberian Pyrite Belt (Spain). *Environmental Earth Sciences*. 2010;59:1275-84.
34. Gómez-Ortiz D, Martín-Velázquez S, Martín-Crespo T. Application of electrical resistivity tomography to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). *Near Surface Geophysics*. 2010;8:65-74.
35. Olenchenko VV, Kucher DO, Bortnikova SV. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data. *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57:617-28.
36. Kucher DO, Olenchenko VV. Model of drainage solutions distribution in the geological environment based on electrical exploration data. *Interexpo Geo-Siberia*. Novosibirsk, 2016:212-16 (In Russ.).
37. Martín-Crespo T, Gómez-Ortiz D, Martínez-Pagan P, et. al. Geoenvironmental characterization of riverbeds affected by mine tailings in the Mazarrón district (Spain). *Journal of Geochemical Exploration*. 2012;119120:6-16. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.06.004.
38. Gómez-Ortiz D, Martín-Crespo T, José ME. Geoenvironmental characterization of the san quintín mine tailings, ciudad real (Spain). *Dyna*. 2010;77:131-40.
39. Martín-Crespo T, Gómez-Ortiz D, Martín-Velázquez S, et. al. Abandoned Mine Tailings Affecting Riverbed Sediments in the Cartagena – La Union District, Mediterranean Coastal Area (Spain). *Remote Sensing*. 2020;12(12):2042. DOI: 10.3390/rs12122042.
40. Li W, Coop MR, Senetakis K. The mechanics of a silt-sized gold tailing. *Engineering Geology*. 2018;241:97-108. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.05.
41. Okewale I, Grobler H. Investigations into Grading Characteristics of Tailings. CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure. 2022:1121-7. DOI: 10.1007/978-981-16-7160-9_114.
42. González-Díaz E, García S, Soto F., et. al. Geochemical, mineralogical and geostatistical modelling of an IOCG tailings deposit (El Buitre, Chile): Implications for environmental safety and economic potential. *Journal of Geochemical Exploration*. 2022;239:106997. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.106997.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Каролина Николаевна Залевская –
канд. техн. наук, младший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
комплексного освоения недр им. академика
Н. В. Мельникова Российской академии наук,
111020, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: zalevskaya.karolina@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Karolina N. Zalevskaya –
Ph. D. in Engineering, junior researcher, Institute of
Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow,
Russian Federation, e-mail: zalevskaya.karolina@
mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.11.2024.

Поступила после рецензирования: 30.11.2024.

Принята к публикации: 07.12.2024.

Article info

Received: 16.11.2024.

Revised: 30.11.2024.

Accepted: 07.12.2024.