

Оптимизация техногенно-минеральных образований при разработке медно-порфировых руд Томинского рудного поля Урала

©2024 Н. В. Гончар¹, О. М. Гуман², И. И. Косинова³✉, В. А. Бударина³

¹АО «Русская медная компания», ул. Горького, 57,
620075, Екатеринбург, Российская Федерация

²ООО «Уралгеопроект», ул. Академика Бардина, д. 48-А,
620146, Екатеринбург, Российская Федерация

³Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Введение: В медно-колчеданных рудах Урала содержание меди составляет от 1.5 до 3.5 %, в медно-порфировой руде оно не превышает и половины процента. Отработка данных месторождений требует специальных технологий размельчения руды для дальнейшего обогащения. Утилизация отходов процесса обогащения горной массы производится частично путем закладки полученного материала в горные выработки в процессе рекультивации. Ландшафты рекультивированных горных выработок относятся к техногенному типу и представляют собой округлые понижения, заполненные отходами обогащения. Они представляют собой техногенно-минеральные образования, отличающиеся от природных гранулометрическим, минералогическим составами и физико-механическими свойствами. Актуальность проведенных исследований обусловлена тем, что размещение хвостов тонкого помола в хранилищах отходов с высотой дамб более 50 метров увеличивает риски аварийных ситуаций. Объектом исследований является закладочный материал, укладываемый в отработанную выработку действующих производств на Томинском и Михеевском горно-обогатительных комплексах.

Цель исследований: изучение физико-механических свойств техногенно минеральных образований, сформированных в результате трехстадийной схемы измельчения медно-колчеданных руд, в процессе их размещения в Коркинском разрезе.

Методика исследований: Включает комплекс методов определения гранулометрического и минералогического составов отходов обогащения, минеральный состав определен методом рентгеноспектрального микроанализа на электронном микроскопе Tescan Vega с энергодисперсной приставкой Oxford Instrument.

Полученные результаты: В процессе полевых исследований в разрезе были получены следующие средневзвешенные диаметры закладочного материала: у сброса – 0.017 мм, на расстоянии 500 м – 0.013 мм, на расстоянии 1000 м – 0.009 мм. Закладочный материал, отобранный из выпуска, имел средневзвешенный диаметр 0.026 мм. Значительное изменение фильтрационных свойств (до 10 раз) происходит в диапазоне нагрузок до 0.15 Мпа, дальнейшие изменения – незначительные. Порядок значений позволяет их рассматривать как противofильтрационные экраны с низкими фильтрационными показателями свойств. Выявлено, что основной процесс потери свободной воды в закладочном материале в процессе рекультивации происходит в результате консолидации под давлением.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Косинова Ирина Ивановна, e-mail: kosinova777@yandex.ru

Ключевые слова: медно-порфировые руды, технологии, обогащение, техногенно минеральные образования, отходы, утилизация, рекультивация.

Для цитирования: Гончар Н. В., Гуман О. М., Косинова И. И., Бударина В. А. Оптимизация техногенно-минеральных образований при разработке медно-порфировых руд Томинского рудного поля Урала // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 1. С. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/89-101>

Введение

Томинское рудное поле, включающее в себя Томинский и Калиновский участки, приурочено к одноименным массивам диоритов, кварцевых диоритов и их порфировых разностей Биргильдинско Томинского интрузивного комплекса (D_3-C_1bt), который является интрузивным аналогом вулканитов Березняковской толщи и составляет с ней единую вулcano-плутоническую ассоциацию. Массивы, как и месторождения, практически аналогичны по петрографическому составу, характеру метасоматических изменений и оруденения. По геофизическим данным оба массива представляют собой выходы на поверхность единого крупного массива. Томинское месторождение приурочено к одноименной тектонической зоне. Томинская тектоническая зона и массив ориентированы в северо-западном направлении и ограничены с запада и востока разрывными нарушениями того же направления. Калиновский участок расположен в Бергильдинской тектонической зоне и его оруденение локализовано в Калиновском интрузивном массиве. Биргильдинская зона и Калиновский массив ориентированы в северо-восточном направлении и ограничены разломами этого же направления. Вмещающие породы представлены вулканитами Саргазинской толщи (O_1-2sr) – афировыми и порфировыми базальтами, их кластолавами и туфами, ксенотуфами и в небольшом количестве риолитами. Как диориты, так и вмещающие их вулканиты инъецированы малыми телами Березняковских субвулканических андезитов (αD_3-C_1bz) и дайками гранодиорит-порфиров ($\gamma \delta \pi C_1-2p$), гранит-порфиров ($\gamma \delta \pi C_1-2p$), субщелочных габбро-долеритов ($suT_2\delta$).

Интрузивные образования широко развиты на исследуемой территории и объединены в ряд комплексов, представлены телами от даек мощностью 1–2 м до массивов площадью в несколько квадратных километров.

Формирование месторождения сопровождалось процессами интенсивной метасоматической проработки вмещающих пород, в результате чего были образованы комплексы метасоматитов двух сопряженных формаций – пропилитовой и кварц-серицитовый. Кроме того, отмечается комплекс метасоматитов смешанного типа. В пределах Томинского месторождения метасоматиты этих формационных типов распространены очень широко. Метасоматиты пропилитовой формации имеют различный минеральный состав и различное соотношение породообразующих минералов. Метасоматиты кварц-серицитовый формации имеют более широкое распространение, развиты в основном по диоритам.

Главной структурной особенностью площади является ее блоковое строение, создаваемое системами суб-

меридианальных разломов и парагенезисом сдвиговых нарушений северо-восточного, северо-западного и северо-северо-западного направлений. С крутыми разрывными дислокациями парагенетически связаны пологие тектонические структуры.

Томинское рудное поле, включающее в себя Томинский и Калиновский участки, является частью крупного Биргильдино-Томинского узла. Томинская и Биргильдинская тектонические зоны, имеющие северо-восточное и северо-западное простирание соответственно, ограничены системой разломов того же направления с востока и запада. В процессе формирования тектонических зон образовались деформационные структуры, возникновение которых объясняется появлением разломов при горизонтальном сдвиге. Томинская зона формировалась как правосторонний сдвиг, а Биргильдинская – как левосторонний.

Коркинский разрез, в котором размещают закладочный материал, приурочен к Коркинской мульде Коркинского угленосного района, который приурочен к западной синклинали структуры Челябинского грабена. Характерной особенностью Коркинского угленосного района является неравномерность распределения угля по площади и большая изменчивость мощности и строения угольных пластов на коротких расстояниях.

В комплекс пород, слагающих Коркинский разрез, входят континентальные четвертичные (глины, суглинки, глинистые опоки) и морские третичные отложения (кварцевые пески, опоковидные глины, кремнистые опоки). Продуктивная толща сформирована континентальными осадками верхнего триаса. В ее породном составе преобладают песчаники, аргиллиты и алевролиты, встречаются углистые аргиллиты, сидериты и конгломераты. В покровных породах основная масса частиц мельче 0.05 мм. Породы угленосной толщи относятся к сцементированным грунтам типа полускальных, цемент чаще глинисто-карбонатный, карбонатный, глинистый.

В последние годы чаще стали говорить об использовании пустой породы после обогащения в качестве закладочного материала при рекультивации горных выработок.

Техногенно-минеральные образования представляют собой разности, образовавшиеся в результате отделения от массива и складирования в виде отходов горного, обогатительного, металлургического и других производств [1, 2]. Значительные объемы образования таких материалов позволяют рассматривать их как источники ресурсов для восстановления территории, например, для ликвидации и рекультивации отработанных горных выработок. Хвосты обогащения руд являются техногенно-минеральными образованиями, основ-

ной объем которых размещается в хвостохранилищах.

Для увеличения эффективности извлечения руд существует тенденция уменьшения размеров частиц пород при их обогащении. Исследовательские работы, выполненные в условиях действующих производств на Томинском и Михеевском ГОКах, показали прямую зависимость извлечения меди от степени измельчения руды. По мнению авторов, прирост извлечения меди при увеличении степени измельчения для условий переработки руды Михеевского месторождения и на имеющемся парке флотационных машин и классифицирующего оборудования происходит за счет снижения в пульпе питания доли фракции 150 мкм с 15.3–18.6 до 0.6–2.9 % [3].

Специалистами АО «Михеевский ГОК» на основании опыта запуска обогатительного производства и выхода на качественные показатели переработки руд была предложена трехстадийная схема измельчения. В случае возможного повышения крепости руды с глубиной работ в карьере и снижения вкрапленности халькопирита это позволит без снижения производительности фабрики осуществлять тонкое измельчение до 80 % класса -0.071 мм. Достигнутые показатели извлечения меди, выпуска товарной продукции на действующих производствах указывают на то, что освоение и переработка бедных медных руд Михеевского и Томинского месторождений рентабельны и при снижении бортового содержания меди с 0.3–0.4 до 0.1–0.15 % [4]. Это

позволяет рекомендовать применяемые технологии при отработке месторождений - аналогов.

Размещение хвостов тонкого помола в хвостохранилищах с высотой дамб более 50 м (СП 58.13330.2019 "СНиП 33-01-2003 Гидротехнические сооружения. Основные положения") увеличивает риски аварийных ситуаций, что оказывает серьезное негативное влияние на окружающую среду, здоровье и жизнь людей, а иногда на экономику целых стран. Систематизация таких аварий крайне проблематична из-за недостатка полных данных, необходимых для анализа причин и моделирования сценария разрушения.

Цель исследований

Изучение физико-механических свойств техногенно-минеральных образований, сформированных в результате трехстадийной схемы измельчения медно-колчеданных руд, в процессе их размещения в Коркинском разрезе.

Причины аварий названы различные (рис. 1) [5], но не обозначена причина уменьшения размеров частиц закладочного материала, и как следствие – увеличение порового давления в нем. Как правило при проектировании предусматриваются решения, направленные на максимальную минимизацию фильтрации ограждающих дамб и оснований, что также является причиной увеличения порового давления в массиве закладочного материала.

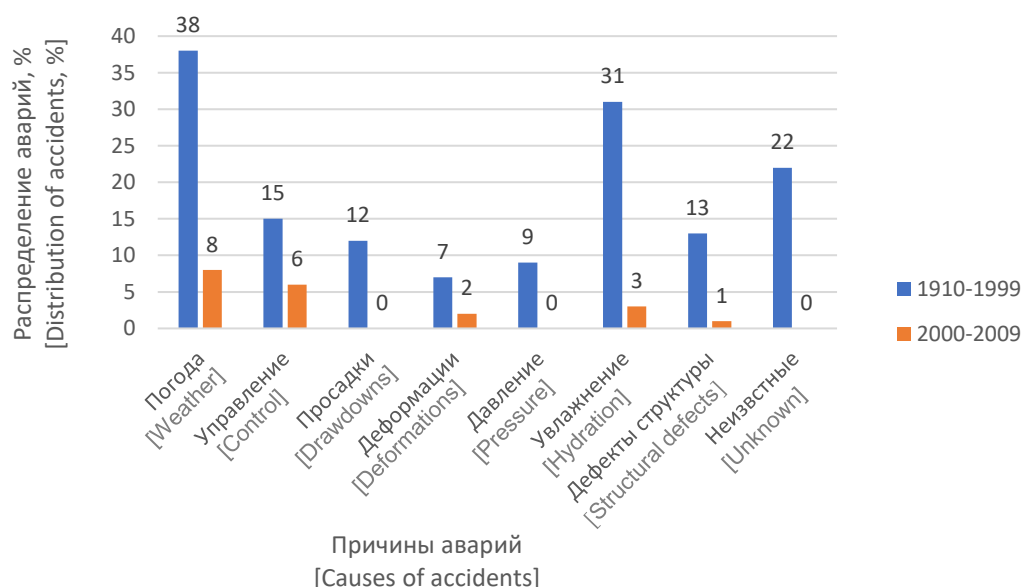


Рис. 1. Распределение случаев обрушений дамб хвостохранилищ по причинам (по материалам Shahid Azam, 2010).
[Fig. 1. Distribution of cases of tailing storage dam failure by cause (based on Shahid Azam, 2010).]

Намывные грунты являются полностью водонасыщенными, при увеличении высоты дамб добавочное давление будет воздействовать на воду, вызывая повышение порового давления в грунтах [6] и снижение эффективного давления, а следовательно уменьшение прочности и устойчивости дисперсной системы. Изменение прочностных свойств грунтов при различном

избыточном поровом давлении показано на рисунке 2. Очевидно, что при увеличении порового давления «ухудшаются» прочностные свойства техногенных намывных грунтов – сцепление и угол внутреннего трения, происходит снижение устойчивости дамб, намытых из хвостов при подъеме уровня хвостохранилища.

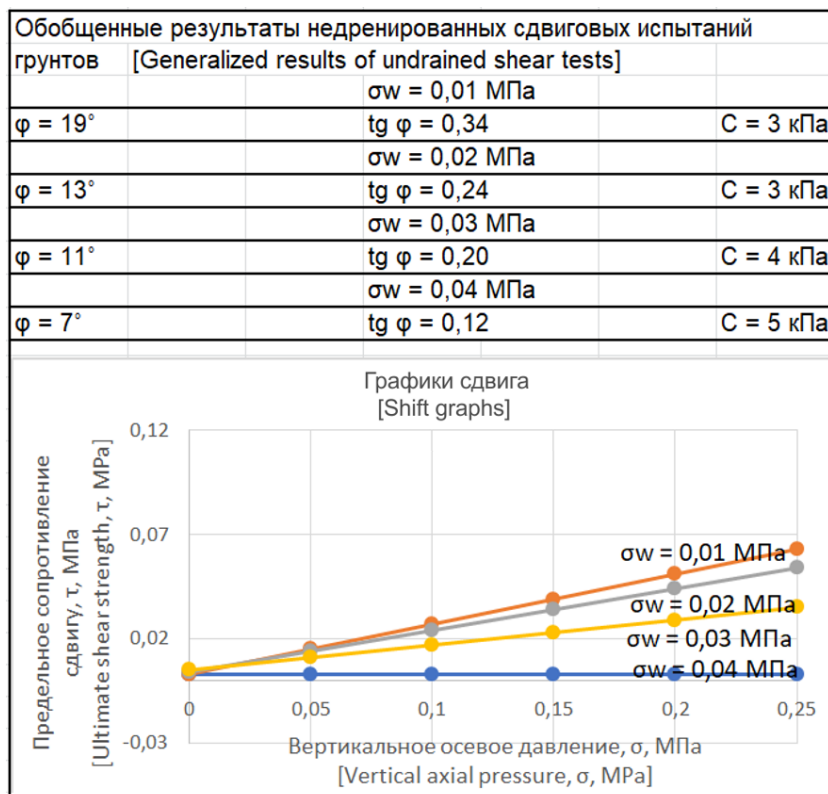


Рис. 2. Изменение прочностных свойств намывных грунтов при различном избыточном поровом давлении – σ_w , МПа [6].
[Fig. 2. Changes in the strength properties of alluvial soils with different excess pore pressure – σ_w , МПа [6].]

В работе [7] предложен критерий прочности для двухфазных сред:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2 \sqrt{(C + \operatorname{tg} \varphi (\lambda \sigma_2 + \sigma_1 - u))(C + \operatorname{tg} \varphi (\lambda \sigma_2 + k \sigma_3 - u))}, \text{ где}$$

u – поровое давление жидкости, МПа,

k – параметр упрочнения,

λ – коэффициент бокового распора.

В данной модели показано как может быть учтено поровое давление при решении задач на прочность, в частности, вопросов оценки устойчивости откосов. Это является еще одним из аргументов в пользу того, что карьерные выемки, заполненные намывными грунтами, будут более устойчивыми в процессе их заполнения более тонкой фракцией при обогащении. Но в этом случае анализ геологического строения их является обязательным условием. При наличии нескольких карьеров, например, как на Томинском ГОКе, или близ расположенных нерекультивированных карьеров других полезных ископаемых, например таких как Коркинский угольный разрез, в технологию добычи необходимо включать эти выработки для размещения хвостов обогащения, а извлечение руды вести не одновременно, а последовательно, что позволит одновременно проводить рекультивацию в сформированной зоне депрессионной воронки обрабатываемых карьеров.

Нормативная база для проведения изысканий на карьерах, которые планируется ликвидировать путем закладки в настоящее время отсутствует. Поэтому накопление опытного материала является актуальным для разработки методических и нормативных материалов с учетом современных тенденций.

Характеристика объекта исследования

Объектом исследований является закладочный материал, укладываемый в отработанную выработку Коркинского разреза.

Закладочный материал изучался в местах подачи его в разрез, а также в самом разрезе на разных глубинах и расстояниях от места выпуска.

Формирование закладочного материала происходит при добыче и обогащении медно-порфировых руд Томинского месторождения, расположенного в Сосновском районе Челябинской области.

Технологическая схема получения закладочного материала приведена на рисунке 3.

Транспортирование закладочного материала осуществляется по трем веткам пульпопроводов на расстояние более 10 км (рис. 4).

Отличительной особенностью медно-порфировых руд является низкое содержание полезных компонентов. Если в местных медно-колчеданных рудах содержание меди составляет от 1.5 до 3.5 %, то в медно-порфировой руде оно не превышает и половины процента. Это меньше, чем даже в отвальных шлаках большинства действующих медеплавильных производств при использовании традиционных пирометаллургических технологий и сопоставимо с содержанием металла в хвостах обогатительных фабрик. Кроме того, при разработке уральских медно-порфировых руд изначально трудно рассчитывать на приемлемое (для попутного

извлечения) содержание золота, серебра, молибдена и других ценных металлов. А извлечение сопутствующих металлов в перспективе может стать еще одним свидетельством эффективности проекта и внедряемых технологий. Среднее содержание молибдена в руде Михеевского месторождения составляет 30 г/т, золота 0.14 г/т, серебра 1.23 г/т, при таких низких концентрациях эти металлы в России (и в мире), как правило, не извлекают.

Медно-порфировые месторождения из-за своих больших размеров и бедных содержаний меди имеют

особенности при строительстве горно-обогатительных комбинатов. В частности, большие ежегодные объемы дробления и переработки горной массы требует серьёзного количества воды, значительные объёмы которой выводятся из оборота при складировании хвостов обогащения, так как вода заполняет поровое пространство. Высока интенсивность взаимодействия в системе вода/порода, как в технологических процессах обогащения, так и в бортах карьеров и теле отвалов, которые занимают большие площади, а ведь именно эти процессы формируют химический состав воды.

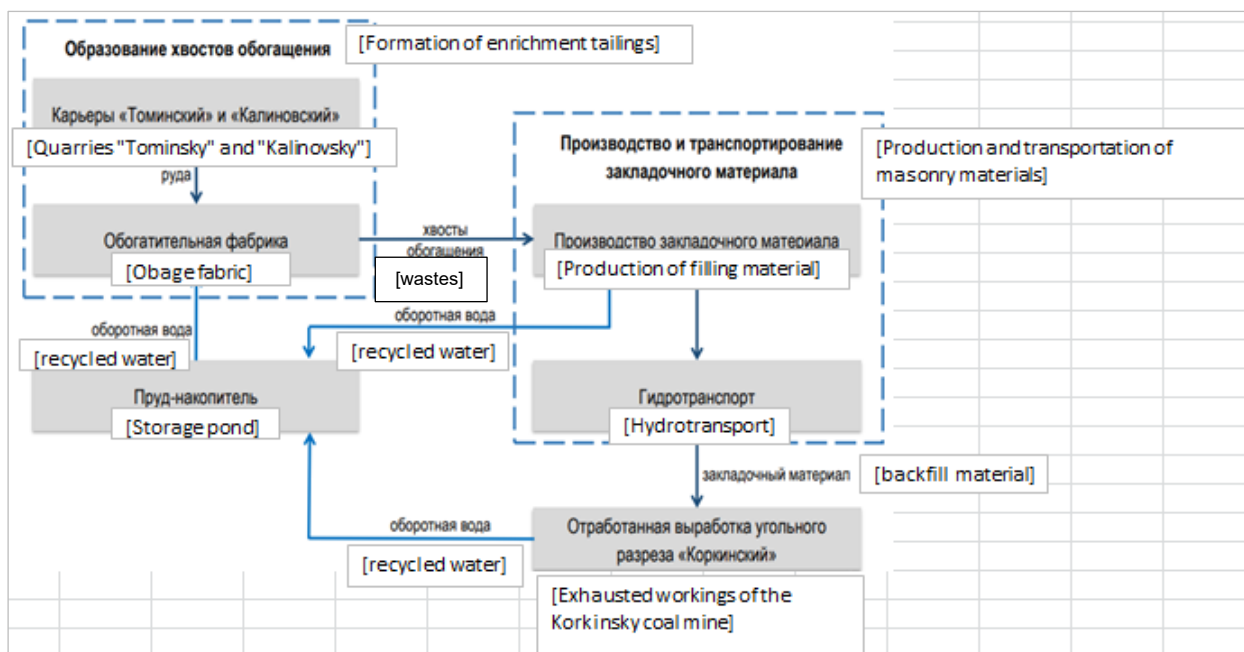


Рис. 3. Технологическая схема получения закладочного материала.
[Fig. 3. Technological scheme for obtaining of the filling material.]

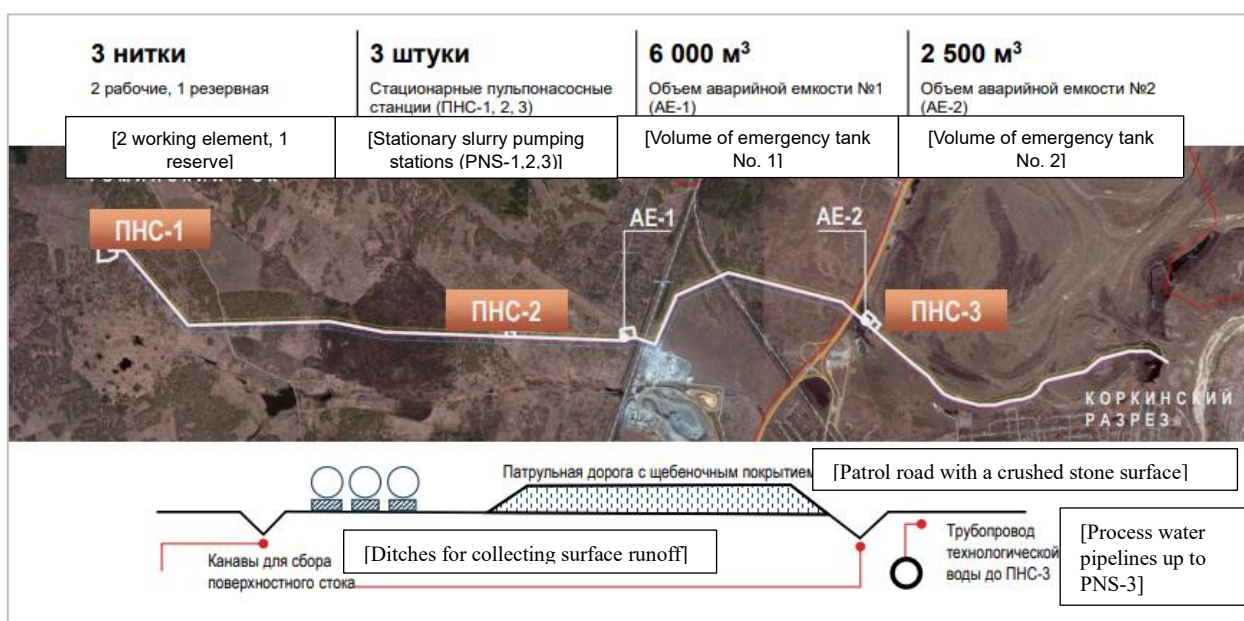


Рис. 4. Схема транспортирования закладочного материала.
[Fig. 4. Scheme of the transportation of the filling material.]

Методы исследования

Тонкодисперсные водонасыщенные грунты рассматривались нами как глинистые грунты текучей консистенции: влажность грунтов изучалась весовым методом с высушиванием при температуре 105° до постоянного веса, фильтрационные свойства определялись на образцах нарушенного сложения с заданной плотностью при заданных давлениях на грунт и переменном градиенте напора с пропуском воды сверху вниз в компрессионном приборе, грансостав – методом ареометра и ситовым анализом, поровое давление методом восстановления фазового состава при проведении трехосных испытаний водонасыщенных связных грунтов по схеме консолидированно недренированного испытания; минеральный состав определен методом рентгеноспектрального микроанализа на электронном микроскопе Tescan Vega с энергодисперсной приставкой Oxford Instrument.

Полученные результаты

Минеральный состав закладочного материала, уложенного в Коркинском разрезе: кварц (SiO_2) – 40 %, альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) – 32 %, клинохлор ($(\text{Mg}, \text{Al})_6[\text{Si}_{3.1-2}, \text{Al}]_{0.9-1.2}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) – 20 %, карбонат (CO_3^{-2}) – 3 %, биотит ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}][\text{OH}, \text{F}]_2$) – 3 %, пирит (FeS_2) менее 1 %, рутил (TiO_2) около 1 %. Он может меняться в зависимости от исходного сырья, но практически всегда – это аналог природных грунтов [8].

Гранулометрический состав закладочного материала зависит от степени и времени измельчения руды, а закладочного материала в разрезе – от места сброса в разрез, так как происходит его растекание на значительное расстояние (до 2 км на момент исследований). В гранулометрическом составе закладочного материала разделение по фракциям происходит следующим образом (табл. 1):

Табл. 1. Фракционный состав закладочного материала
[Table 1. Fractional composition of filling material]

Фракция [Fraction]	Центр разреза [The center of the cut], %	Место выпуска [Place of issue], %
песок (фракция 0.05–2 мм) [sand (0.05–2 mm fraction)]	4.8–13.0	26.3–35.1
пыль (0.05–0.002 мм) [dust (0.05–0.002 mm)]	50.9–76.2	51.1–59.4
глина (<0.002 мм) [clay (<0.002 mm)]	8.9–13.1	13.5–17.1

Необходимо учитывать фракционирование, которое имеет место при намыве закладочного материала в разрезе. Раскладка по крупности происходит по-разному, в зависимости от способа намыва, но во всех случаях самые крупные частицы откладываются вблизи выпусков и на глубине, а самые мелкие – в отстойном пруде.

Для оценки крупности закладочного материала рассчитан средневзвешенный диаметр $d_{\text{ср}}$, который определяется по формуле

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_1 q_1 + d_2 q_2 + \dots + d_n q_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} = \frac{\sum d_i q_i}{\sum q_i}, \quad [9]$$

где d_1, d_2, \dots, d_n – размер частиц соответствующих фракций, мм; q_1, q_2, \dots, q_n – весовое содержание хвостов данной фракций, %.

При опробовании закладочного материала в разрезе были получены следующие средневзвешенные диаметры закладочного материала: у сброса – 0.017 мм, на расстоянии 500 м от него – 0.013 мм, на расстоянии 1000 м – 0.009 мм. Закладочный материал, отобранный из выпуска, имел средневзвешенный диаметр 0.026 мм. По-видимому, в разрезе песчаная фракция присутствует в более глубоких слоях, а отбор проб был выполнен на границе жидкой и твердой составляющих. Согласно ГОСТ 25100 Грунты. Классификация, по гранулометрическому составу закладочный материал относится к глине тяжелой текучей и суглинку тяжелому пылеватому текучему.

Интегральная кривая гранулометрического состава

закладочного материала приведена на рисунке 5.

Физико-механические свойства техногенно-минеральных образований изучались с учетом процессов, которые возможны при размещении закладочного материала в разрезе: консолидация, испарение, промерзание.

Поведение закладочного материала под нагрузкой аналогично поведению илов [10] (табл. 2).

Поведение закладочного материала под нагрузкой выполнялось в компрессионных приборах после отделения отстоявшейся воды. Результаты исследований приведены на рисунке 6.

Из рисунка 6 видно, что характер изменения свойств закладочного материала не зависит от крупности частиц. Плотность выше для пробы с более тонкими фракциями, а пористость и коэффициент пористости – у пробы с более крупными частицами, что, по-видимому, можно объяснить толщиной пленки физически связанной воды вокруг частиц, у тонкой фракции она больше. Изменение влажности не зависит от крупности частиц, практически она одинаковая, т.к. свободная вода в данных грунтах имеет подчиненное значение.

Фильтрационные свойства, определенные в компрессионном приборе, меняются в зависимости от давления следующим образом (рис. 7).

Значительное изменение фильтрационных свойств происходит в диапазоне нагрузок до 0.15 МПа – практически они уменьшаются в 10 раз, дальнейшие изменения – незначительные. Порядок значений позволяет их рассматривать как противофильтрационные экраны с низкими фильтрационными показателями свойств.

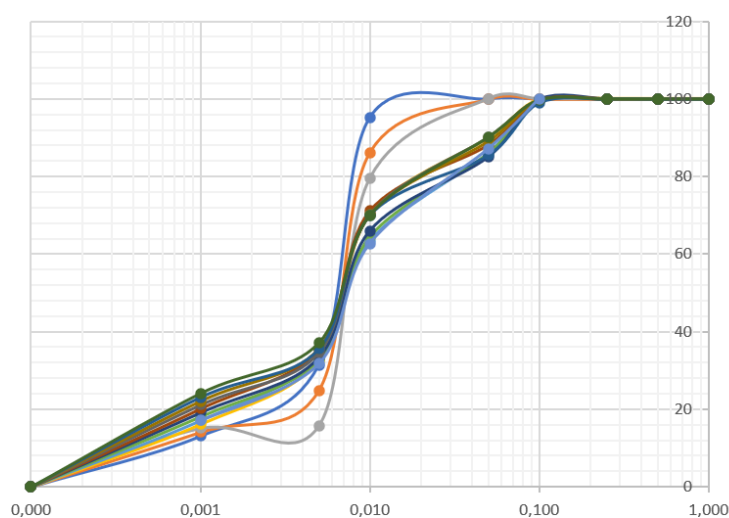


Рис. 5. Интегральная кривая гранулометрического состава ЗМ.
[Fig. 5. Integral curve of granulometric composition of the filling material.]

Табл. 2. Сравнение свойств природных илов и ЗМ
[Table 2. Comparison of properties of natural silts and CM]

Показатели свойств [Property indicators]	Глинистые илы [Clay silts]	Закладочный материал (исследования в течение года) [Background material (research during the year)]
Грансостав [Grant composition]	Пылеватые и глинистые частицы с примесью песчаных зерен [Dusty and clay particles with an admixture of sand grains]	Пылеватые и глинистые частицы с примесью песчаных зерен [Dusty and clay particles with an admixture of sand grains]
Плотность, г/см ³ [Density, g/cm ³]	1.17–2.02 (часто 1.4–1.6)	1.54–1.87
Плотность частиц грунта, г/см ³ [Density of soil particles, g/cm ³]	2.22–2.76	2.75–2.81 (за счет аксессуарных минералов) [(due to accessory minerals)]
Пористость [Porosity], %	40–90	69
Уплотнение до 9 м [Seal up to 9 m]	1.16 раз	1.12 раз
Нагрузки [Loads]	Большая часть осадки происходит в интервале до 0.1 МПа. По мере дальнейшего приложения нагрузки относительная деформация затухает, а изменение пористости уменьшается [Most of the precipitation occurs in the range up to 0.1 MPa. As the load is applied further, the relative deformation attenuates, and the change in porosity decreases]	
При уплотнении до 0.1 Мпа [When compacted to 0.1 MPa]	Коэффициент пористости уменьшается в 2–3 раза, а влажность в 3–4 раза. [The porosity coefficient decreases 2–3 times, and the humidity decreases 3–4 times.]	

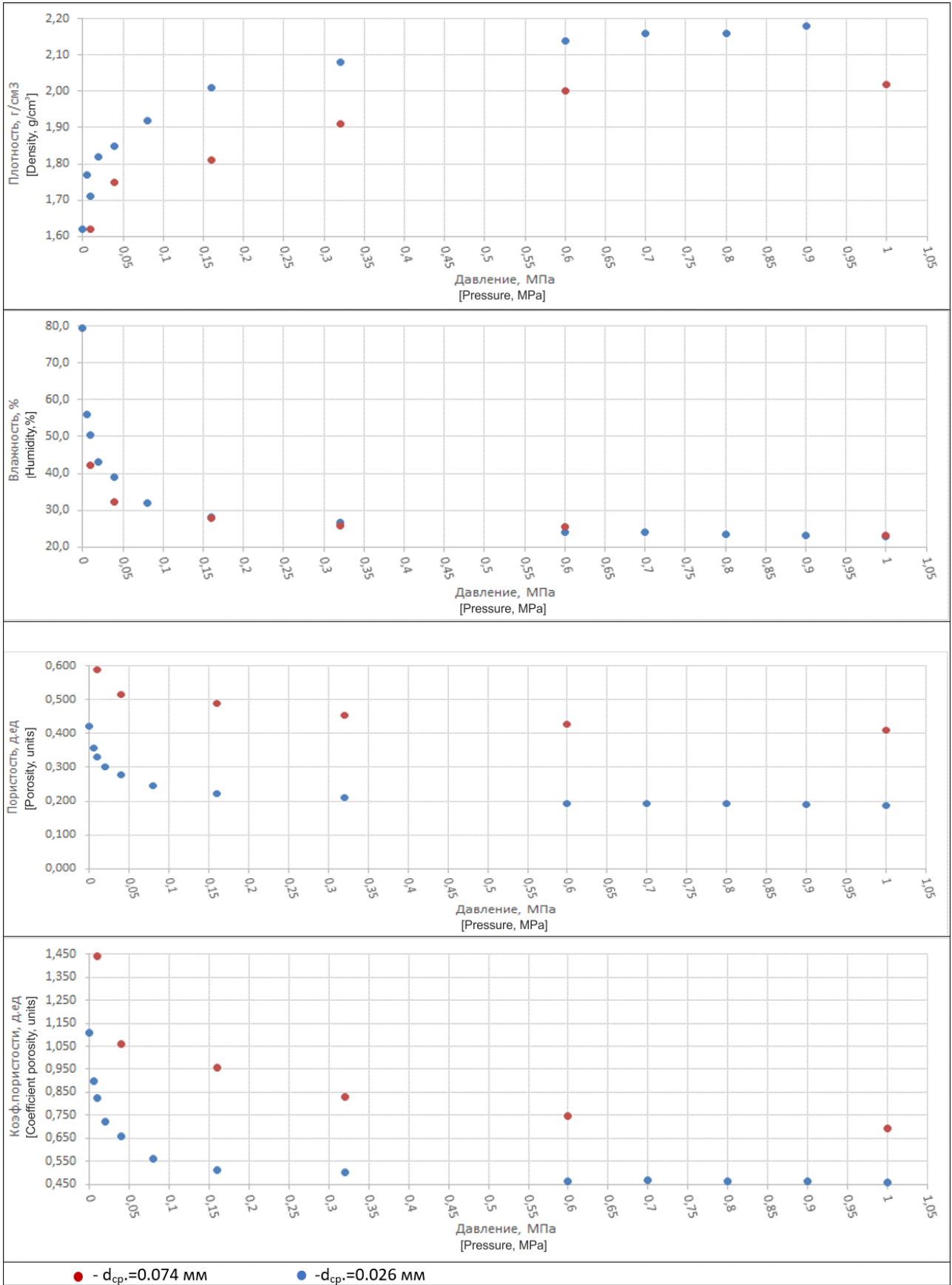


Рис. 6. Изменение физических показателей свойств ЗМ под нагрузкой
[Fig. 6. Changes in physical indicators of CM properties under load.]

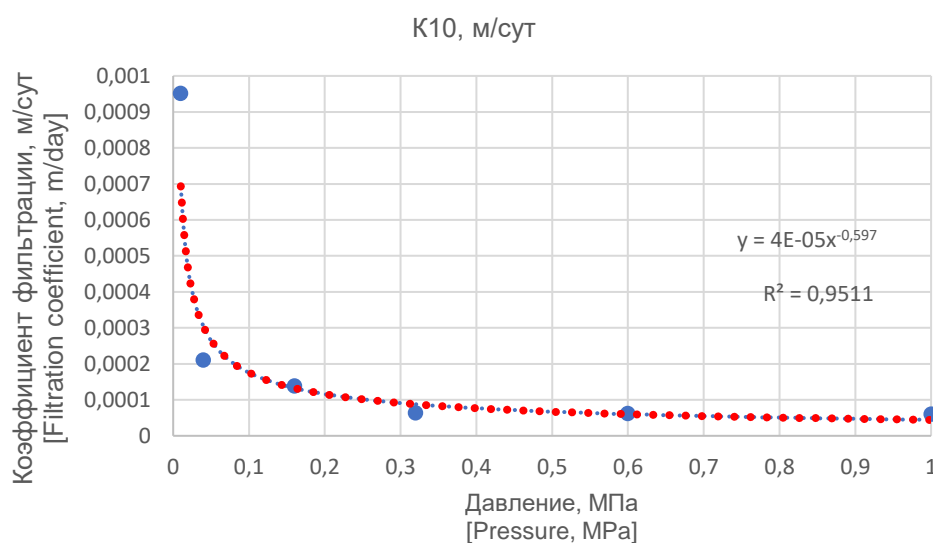


Рис. 7. Изменение фильтрационных свойств закладочного материала под нагрузкой до 1 Мпа.
[Fig. 7. Change in filtration properties of backfill material under load up to 1 MPa.]

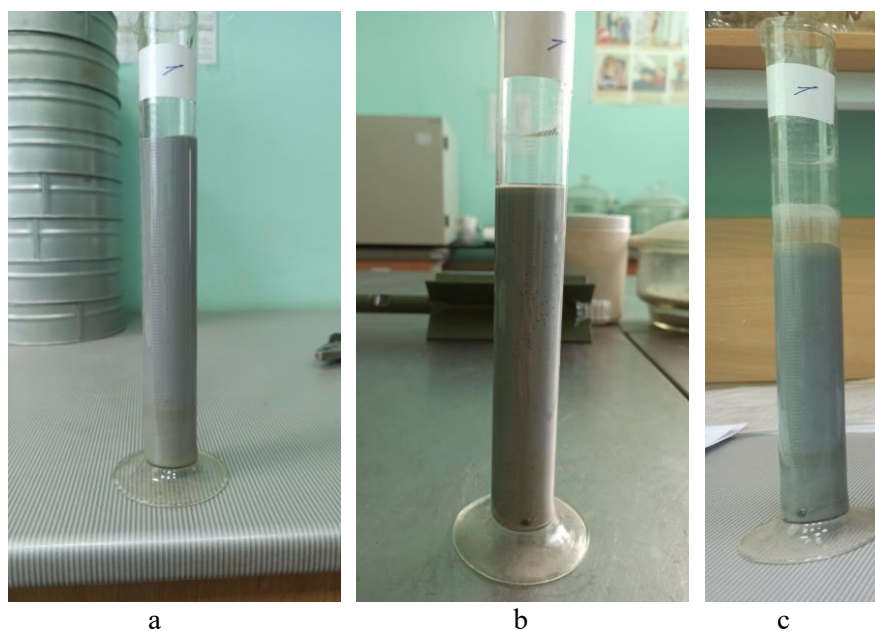


Рис. 8. Изучение влияния процесса испаряемости на свойства ЗМ: *a* – исходная проба, *b* – проба с отстоявшейся свободной водой, которую удалили фильтровальной бумагой, *c* – проба, в которой изучались физические свойства после испарения в течение 70 суток.
[Fig. 8. Study of the influence of the evaporation process on the properties of CM: (*a*) – initial sample, (*b*) – sample with settled free water, which was removed with filter paper, (*c*) – sample in which the physical properties were studied after evaporation for 70 days.]

Влияние испаряемости на физические свойства закладочного материала выполнено в лабораторных условиях в летнее время при температуре воздуха не более 22° С в течение 70 суток (рис. 8).

Изменение влажности и плотности закладочного материала в процессе испарения приведено на рисунке 9.

По результатам исследований установлено, что наибольшая испаряемость жидкой составляющей закладочного материала происходит в первые 5 суток (20 %), в последующие интервалы времени испаряе-

мость составляет от 4.0 % до 8.0 %.

Лабораторные исследования потери жидкой фазы закладочного материала в процессе промораживания проводились в течение 48 часов. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

По результатам лабораторных исследований установлено, что после промораживания закладочный материал теряет 2–3 % свободной воды (рис. 10).

Поровое давление техногенно-минеральных образований, определенное в приборах трехосного сжатия, составило 0.04 МПа.

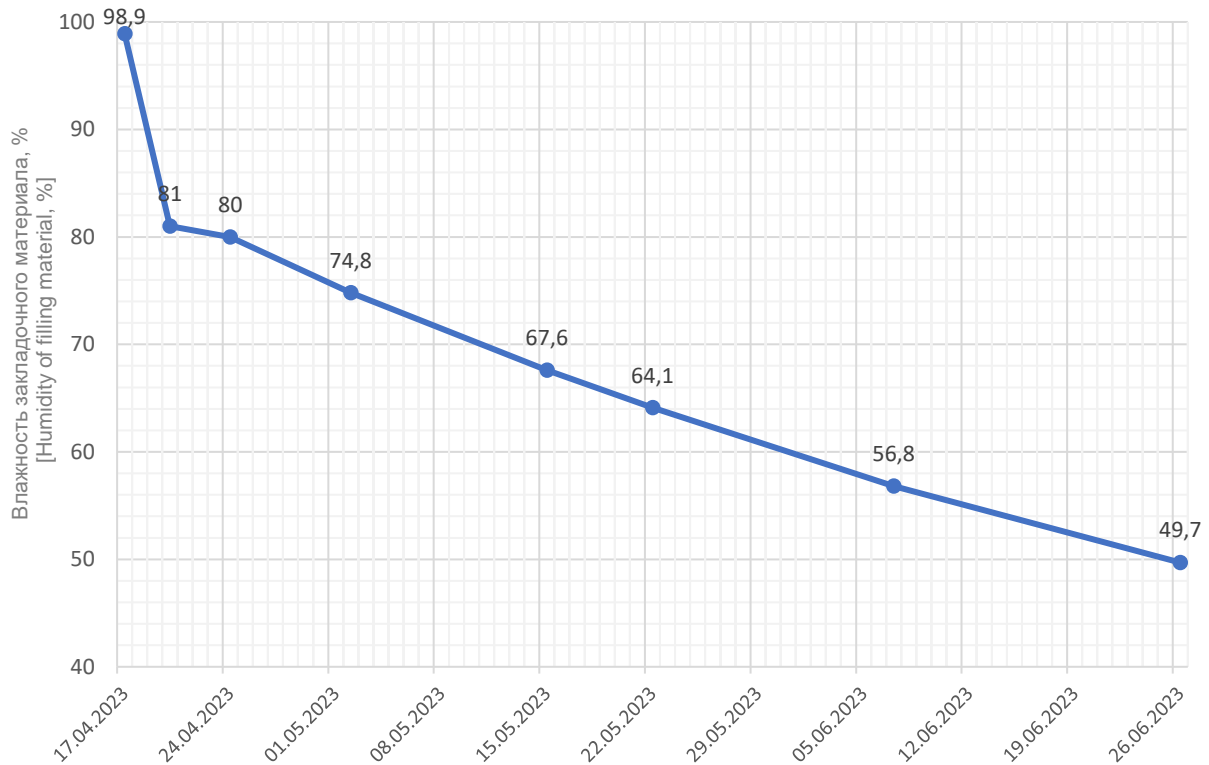


Рис. 9. Изменение влажности (W,%) в процессе испарения с поверхности закладочного материала
[Fig. 9. Change in humidity (W,%) during evaporation from the surface of the filling material.]

Табл. 3. Изменение влажности закладочного материала в процессе промораживания
[Table 3. Changes in the humidity of the filling material during the freezing process]

Лаб. № пробы [Lab. sample number]	Влажность закладочного материала до промораживания, % [Humidity of the filling material before freezing, %]	Масса закладочного материала до промораживания, гр. [The mass of the filling material before freezing, gr.]	Время промораживания, сут. [Freezing time, day.]	Масса закладочного материала после промораживания, гр. [The mass of the filling material after freezing, gr.]	Время оттаивания, сут. [Thawing time, day.]	Масса закладочного материала до после оттаивания, гр [The mass of the laying material before after thawing, soil]	Влажность закладочного материала после промораживания и оттаивания, % [Humidity of the filling material after freezing and thawing, %]	Потеря воды при оттаивании, % [Water loss during thawing, %]
178	47.4	146.15	2	145.69	1	140.50	44.7	2.7
179	45.3	242.33	2	242.18	1	242.18	43.1	2.2

Выводы

1. Для руд с низким содержанием полезной компоненты при их обогащении эффективной является технология уменьшения размеров частиц пород. Исследовательские работы, выполненные в условиях действующих производств на Томинском и Михеевском ГОКах, показали прямую зависимость извлечения меди от степени измельчения руды. Прирост извлечения меди при увеличении степени измельчения для условий переработки руды Михеевского месторожде-

ния происходит за счет снижения в пульпе питания доли фракции 150 мкм с 15.3–18.6 до 0.6–2.9 %.

2. Предложена трехстадийная схема измельчения. В случае возможного повышения крепости руды с глубиной работ в карьере и снижения вкрапленности халькопирита это позволит без снижения производительности фабрики осуществлять тонкое измельчение до 80 % класса -0.071 мм. Достигнутые показатели извлечения меди, выпуска товарной продукции на действующих производствах указывают на то, что освоение и пере-



Рис. 10. Структура закладочного материала после промораживания.

[Fig. 10. Structure of the filling material after freezing.]

работка бедных медных руд Михеевского и Томинского месторождений рентабельны и при снижении бортового содержания меди с 0.3–0.4 до 0.1–0.15 %.

3. Размещение хвостов тонкого помола в хвостохранилищах с высотой дамб более 50 метров увеличивает риски аварийных ситуаций, что связано с увеличением порового давления в образовавшихся техногенно-минеральных образованиях, что приводит к уменьшению прочности и устойчивости дисперсной системы. Были получены следующие средневзвешенные диаметры закладочного материала: у сброса – 0.017 мм, на расстоянии 500 м – 0.013 мм, на расстоянии 1000 м – 0.009 мм.

4. Определен минеральный состав закладочного материала, уложенного в Коркинском разрезе, отличающегося следующим составом: кварц (SiO_2) – 40 %, альбит ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) – 32 %, клинохлор $((\text{Mg}, \text{Al})_6 [\text{Si}_{3.1-2}, \text{Al}]_{0.9-1.2}\text{O}_{10} (\text{OH})_8)$ – 20 %, карбонат (CO_3^{-2}) – 3 %, биотит $(\text{K} (\text{Mg}, \text{Fe})_3 [\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] (\text{OH}, \text{F})_2)$ – 3 %, пирит (FeS_2) менее 1 %, рутил (TiO_2) около 1 %. Он может меняться в зависимости от исходного сырья, но практически всегда – это аналог исходных горных пород.

5. Физико-механические свойства техногенно-минеральных образований изучались с учетом процессов, которые возможны при размещении закладочного материала в разрезе: консолидация, испарение, промерзание. Выявлено, что основной процесс потери свобод-

ной воды в закладочном материале в процессе рекультивации происходит в результате консолидации под давлением. Значительное изменение фильтрационных свойств происходило в диапазоне нагрузок до 0.15 Мпа. Выявленные фильтрационные характеристики позволяет рассматривать данные техногенно-минеральные образования как противофильтрационные экраны, что является благоприятным фактором рекультивации горных выработок.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косинова И. И., Бударина В. А., Базарский О. В., Игнатенко И. М., Кочетова Ж. Ю. Эколого-геохимические исследования: проблемы и совершенствование // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 3. С. 124–132
2. Shahid Azam Qiren Li Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years // *Waste GEO Technics*. 2010. P. 50–54
3. Огородникова Е. Н., Николаева С. К., Нагорная М. А. Инженерно-геологические особенности аллювиальных техногенных грунтов // *Инженерная геология*. 2013. № 1. С. 16–26
4. Алтушкин И. А., Левин В. В., Сизиков А. В., Король Ю. А. Опыт освоения месторождений медно-порфирового типа на Урале // *Записки Горного института*. 2017. Т. 228. С. 641–648. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.641
5. Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности. ВНИИ ВОДГЕО ГОССТРОЯ СССР. М.: Стройиздат, 1986. С. 19
6. Карпенко Ф. С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Москва. 2009. 36 с.
7. Жабко А. В. Единый критерий пластичности, прочности и разрушения горных пород для условий трехосного сжатия. *Разрушение горных пород и минералов: материалы конференции и школы молодых ученых и студентов* (Екатеринбург, УГГУ, 4 апреля 2023 г.). Екатеринбург: УГГУ, 2023. С. 52–55
8. Гуман О. М., Антонова И. А., Макаров А. Б., Гончар Н. В. Роль техногенных минеральных образований при рекультивации нарушенных земель в Уральском регионе. *Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование: материалы конференции*. М.: ООО «Геомаркетинг». 2023. С. 75–83.
9. Алтушкин И. А., Левин В. В., Гордеев А. И., Пикалов В. А. Особенности освоения Томинского и Михеевского меднорудных месторождений Южного Урала // *Цветные металлы*. 2019. № 7. С. 21–28
10. Васильчук Ю. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Зиянгиров Р. С., Королев В. А., Трофимов В. Т. *Грунтоведение*. Под ред. В. Т. Трофимова. 6-е изд.-е. М.: МГУ, 2005. С. 644–650.

**Optimization of technogenic mineral formations in the development
of porphyry copper ores of the Tominsk ore field of the Urals**

©2024 N. V. Gonchar¹, O. M. Guman², I. I. Kosinova³✉, V. A. Budarina³

¹*AO Russian Copper Company, 57 Gorkogo ul., Yekaterinburg, 620075, Russian Federation*

²*OOO Uralgeoproekt, 48-A Akademika Bardina ul., Yekaterinburg, 620146, Russian Federation*

³*Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394018, Voronezh. Russian Federation*

Abstract

Introduction: In the copper-pyrite ores of the Urals, the copper content ranges from 1.5 to 3.5 %, in porphyry copper ore it does not exceed half a percent. The development of these deposits requires special technologies for crushing ore for further enrichment. The disposal of waste from the process of enrichment of the rock mass is carried out partially by laying the resulting material in the mine workings during the reclamation process. The landscapes of reclaimed mine workings belong to the technogenic type and represent rounded depressions filled with enrichment waste. They are technogenic mineral formations that differ from natural ones in granulometric, mineralogical compositions and physico-mechanical properties. The relevance of the research is due to the fact that the placement of fine milled tailings in waste storages with dam heights of more than 50 meters increases the risks of emergency situations. The object of research is the laying material placed in the spent production of existing production facilities at the Tominsky and Mikhnevsky mining and processing complexes.

Purpose: The research is to study the physical and mechanical properties of technogenic mineral formations formed as a result of a three-stage grinding scheme of copper-pyrite ores in the process of their placement in the Korkinsky section.

Methodology: Includes a set of methods for determining the granulometric and mineralogical compositions of enrichment waste, the mineral composition was determined by X-ray spectral microanalysis on a Tescan Vega electron microscope with an energy-dispersed Oxford Instrument prefix.

Results: In the course of field research, the following weighted average diameters of the laying material were obtained in the section: at the discharge – 0.017 mm, at a distance of 500 m – 0.013 mm, at a distance of 1000 m – 0.009 mm. The filling material selected from the release had a weighted average diameter of 0.026 mm. A significant change in filtration properties (up to 10 times) occurs in the load range up to 0.15 Mpa, further changes are insignificant. The order of values allows them to be considered as anti-filtration screens with low filtration properties. It is revealed that the main process of loss of free water in the filling material during reclamation occurs as a result of consolidation under pressure.

Keywords: porphyry copper ores, technologies, beneficiation, technogenic mineral formations, waste, utilization, reclamation.

For citation: Gonchar N. V., Guman O. M., Kosinova I. I., Budarina V. A. Optimization of technogenic mineral formations in the development of porphyry copper ores of the Tominsk ore field of the Urals // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/89–101>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Irina I. Kosinova, e-mail: kosinova777@yandex.ru

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Kosinova I. I., Budarina V. A., Bazarskij O. V., Ignatenko I. M., Kochetova Zh. Ju. Jekologo-geohimicheskie issledovaniya: problemy i sovershenstvovanie [Ecological and geochemical research: problems and improvement] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 124–132 (In Russ.)
2. Shahid Azam Qiren Li Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Waste GEO Techniques*, 2010, pp. 50–54
3. Ogorodnikova E. N., Nikolaeva S. K., Nagornaja M. A. Inzhenerno-geologicheskie osobennosti alljuvial'nyh tehnogennyh gruntov [Engineering and geological features of alluvial technogenic soils]. *Inzhenernaja geologija – Engineering Geology*, 2013, no. 1, pp.16–26 (In Russ.)
4. Altushkin I. A., Levin V. V., Sizikov A. V., Korol' Ju. A. Opyt osvoenija mestorozhdenij medno-porfirovogo tipa na Urale [Experience in the development of copper-porphyry deposits in the Urals]. *Zapiski Gornogo instituta – Notes of the Mining Institute*, 2017, vol. 228, pp. 641–648. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.641
5. Recommendations for the design and construction of sludge accumulators and tailings dumps in the metallurgical industry. *VNI VODGEO GOSSTROY OF THE USSR*. Moscow, Stroyizdat publ., 1986, 19 p. (In Russ.)
6. Karpenko F. S. *Usloviya nakopleniya saponitsoderzhashhih osadkov i tehnologija ih sgushheniya v hvostohranilishhe mestorozhdeniya almazov im. M. V. Lomonosova*: avtoref. diss. ... kand. geol.-min. nauk. [Conditions of accumulation of saponite-

containing sediments and technology of their condensation in the tailings storage of the Lomonosov diamond deposit. Abstract of PhD diss.]. Moscow, 2009, 36 p. (In Russ.)

7. Zhabko A. V. Edinyj kriterij plastichnosti, prochnosti i razrusheniya gornyh porod dlja uslovij trehsnogo szhatija [A single criterion of plasticity, strength and fracture of rocks for conditions of triaxial compression]. *Razrushenie gornyh porod i mineralov: materialy konferencii i shkoly molodyh uchenyh i studentov* [Destruction of rocks and minerals: A collection of materials from the conference and school of young scientists and students]. Yekaterinburg, April 4, 2023, UGSU publ., 2023, pp. 52–55 (In Russ.)
8. Guman O. M., Antonova I. A., Makarov A. B., Gonchar N. V. Rol' tehnogennyh mineral'nyh obrazovanij pri rekul'tivacii narushennyh zemel' v Ural'skom regione [The role of man-made mineral formations in the reclamation of disturbed lands in the Ural region]. *Inzhenerno-geologicheskie izyskanija – normative-no-pravovaja baza, sovremennye metody i oborudovanie: materialy konferencii* [Engineering and environmental surveys – regulatory framework, modern methods and equipment: materials of the All-Russian scientific and practical conference]. Moscow, Geomarketing LLC publ., 2023, pp.75–83 (In Russ.)
9. Altushkin I. A., Levin V. V., Gordeev A. I., Pikalov V. A. Osobennosti osvoenija Tominskogo i Miheevskogo mednorudnyh mestorozhdenij Juzhnogo Urala [Features of the development of the Tominsky and Mikheevsky copper ore deposits of the Southern Urals]. *Cvetnye metally – Non-ferrous metals*, 2019, no. 7, pp. 21–28 (In Russ.)
10. Vasil'chuk Ju. A., Voznesenskij E. A., Golodkovskaja G. A., Ziangirov R. S., Korolev V. A., Trofimov V. T. *Gruntovedenie* [Soil science]. Ed. V. T. Trofimova. 6-e ed.. Moscow, MSU publ., 2005, pp. 644–650 (In Russ.)

Гончар Наталья Валерьевна, к.т.н., вице-президент по экологической и промышленной безопасности АО «Русская медная компания», Заслуженный эколог Российской Федерации; Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail:info@rcc-group.ru; ORCID 0009-0002-0180-9592

Гуман Ольга Михайловна, д.г.-м.н., профессор, директор ООО «Уралгеопроект»; Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail:guman2007@mail.ru; ORCID 0000-0001-7078-6916

Косинова Ирина Ивановна, д.г.-м.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kosinova777@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5439-5197

Бударина Виктория Александровна, к.ю.н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: budarinav@yandex.ru; ORCID 0000-0001-8091-0730

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Natalya V. Gonchar, PhD in Technical, Vice President for Environmental and Industrial Safety Copper Company JSC, Honored Ecologist of the Russian Federation; Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail:info@rcc-group.ru; ORCID 0009-0002-0180-9592

Olga M. Guman, Dr. habil in Geol.-Min., Professor, Director of Uralgeoproekt LLC; Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail:guman2007@mail.ru; ORCID 0000-0001-7078-6916

Irina I. Kosinova, Dr. habil in Geol.-Min., Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: kosinova777@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5439-5197

Victory A. Budarina, PhD in Law, Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: budarinav@yandex.ru; ORCID 0000-0001-8091-0730

Authors have read and approved the final manuscript.