

ОПЫТ ПОЛЕВЫХ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ В ШТАБЕЛЕ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ РУД

М.А. Маринин¹, Г.Б. Поспехов¹, В.И. Сушкова¹, А.А. Поморцева², В.В. Мосейкин³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru

² ООО «Газпром-инвест», Санкт-Петербург, Россия

³ НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация: Коэффициент фильтрации является одним из ключевых параметров при проектировании штабелей кучного выщелачивания. Управление этим параметром и контроль способствуют грамотному поддержанию технологических характеристик процесса. Описан опыт проведения полевых опытно-фильтрационных исследований в условиях штабеля кучного выщелачивания песчано-глинистых руд, базирующийся на методе В.М. Насберга поинтервальных опытно-фильтрационных работ и адаптированный для условий штабеля. Предложенный метод позволяет оценить изменение коэффициента фильтрации как по глубине, так и в плане на промышленном участке кучного выщелачивания. Исследования показали, что технология укладки штабеля значительно влияет на формирование зон как с пониженными значениями коэффициента фильтрации (менее 0,1 м/сут), так и с повышенными (более 100 м/сут). Исследования подтверждают необходимость формирования штабеля по схемам, которые учитывают естественную сегрегацию материала. Распределение крупного класса по горизонтальным слоям штабеля незначительно увеличивает скорость фильтрации. Зоны с вертикальным распределением крупного класса способствуют увеличению скорости фильтрации, определяют направление потока растворов и сокращают время его контакта с окомкованной рудой, что приводит к неполному выщелачиванию полезного компонента. Контролируемая сегрегация и агломерация способствует эффективному извлечению металлов. Принятые схемы укладки материала должны обеспечивать равномерность фильтрационных характеристик при заданной плотности орошения и избегать появления зон с низкими и высокими значениями этих параметров.

Ключевые слова: кучное выщелачивание, опытно-фильтрационные работы, коэффициент фильтрации, фильтрация, просачивание, песчано-глинистая руда, окомкованная руда, штабель кучного выщелачивания.

Для цитирования: Маринин М. А., Поспехов Г. Б., Сушкова В. И., Поморцева А. А., Мосейкин В. В. Опыт полевых опытно-фильтрационных работ в штабеле кучного выщелачивания песчано-глинистых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 51–62. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_51.

Experience of trial percolation in heap leaching pile of sandy-clayey rocks

M.A. Marinin¹, G.B. Pospehov¹, V.I. Sushkova¹, A.A. Pomortseva², V.V. Moseykin³

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru

² Limited Liability Company «Gazprom invest», Saint-Petersburg, Russia

³ NUST MISIS, Moscow, Russia

Abstract: Permeability is one of the key parameters in the heap leaching pile design. Control and adjustment of this parameter contribute to expert maintenance of operational characteristics of the process. This article describes the practice of the field-scale trial percolation in the conditions of a heap leaching pile of sandy-clayey rocks based on the interval percolation method proposed by V. M. Nasber and adapted to the pile conditions. The method allows assessing the change in permeability in depth and in plan of a heap leaching site. The studies show that the piling technology has an influence on formation of zones with either decreased permeability (less than 0.1 m/day) or increased permeability (higher than 100 m/day). The research proves the requirement to carry out piling with regard to natural segregation of materials being piled. The distribution of the coarse size particles in horizontal layers of a pile increases the rate of percolation insignificantly. The vertical zoning of the coarse-size particles accelerates the rate of percolation, governs the flow direction of leach solution and reduces the contact time of the leach solution with ore agglomerates, which results in the incomplete leaching of a useful component. The controllable segregation and agglomeration promotes efficient recovery of metals. The adopted piling flow charts must ensure uniform percolation at the preset sprinkler density and without formation of zones of higher or lower permeability.

Key words: heap leaching, trial percolation, permeability, permeation, seepage, sandy-clayey ore, agglomerated ore, heap leaching pile.

For citation: Marinin M. A., Pospehov G. B., Sushkova V. I., Pomortseva A. A., Moseykin V. V. Experience of trial percolation in heap leaching pile of sandy-clayey rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(8):51-62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_51.

Введение

В настоящее время использование некондиционного и техногенного сырья становится все более актуальным в различных отраслях промышленности [1 – 3]. В связи с этим наблюдается растущий спрос на обоснование и внедрение инновационных технологий для переработки такого сырья [4 – 6], а также последующего складирования отходов и их рекультивации [7 – 9].

Одним из перспективных подходов к переработке техногенного сырья является технология кучного выщелачивания (КВ), которая привлекает все больше вни-

мания благодаря своей экономической эффективности [10, 11]. Изначально данная технология была применена для извлечения меди и золота из бедных руд, в настоящее время успешно адаптируется и для работы с другими видами минерального сырья [12 – 14].

Значительным запасом сырья, которое пригодно для переработки с помощью технологии КВ, выделяется Куранахское рудное поле (КРП), расположенное на юге Якутии. Это поле представлено рядом месторождений руд одного технологического типа, содержащего золото, которое относительно легко поддается

цианированию. Первоочередными сырьевыми ресурсами для организации масштабного производства КВ являются забалансовые руды, добытые попутно с кондиционными (для Куранахской ЗИФ) и заскладированные в спецотвалы. За время отработки месторождений КРП в отвалах заскладированы многие миллионы тонн вскрышных пород. Прогнозное содержание золота в них находится на уровне 0,7 г/т. Первые опытно-промышленные кучи объемом 25 тыс. т каждая были введены в эксплуатацию на участке «Надежный» еще в 1996 г. [15].

Горнорудная масса, добываемая из Куранахских месторождений, состоит из песчано-глинистого материала, смешанного с обломками вмещающих пород и первичных руд. Глинистый материал на некоторых из месторождений может составлять до 30% и более [15].

Глинистые минералы, практически всегда присутствующие в окисленных рудах со свободным золотом, представляют существенные затруднения для технологии КВ. Присутствие глины в руде в количестве более 15% требует дополнительных процессов дробления и окомкования, так как это может привести к снижению скорости фильтрации растворов через рудную кучу в 10–50 раз [16–18]. Высокое содержание глины не только замедляет фильтрацию, но также обуславливает потери уже растворенного золота за счет сорбционной активности минералов глин.

Ухудшение фильтрации растворов происходит из-за изменения порового пространства вследствие набухания глины и механической коагуляции. Эксперименты показали, что при увеличении содержания глинистых минералов в Куранахских рудах с 15 до 60% скорость фильтрации растворов снижается с 25 до 0,4 см/сут, а продолжительность выщелачивания увеличивается с 15 до 120 сут [15].

Скорость фильтрации растворов через слой золотосодержащего материала также зависит от высоты штабеля и крупности исходного материала [19–21]. Исследования, проведенные Иргиредметом, показали, что кинетика растворения золота и вымывание растворенного металла из руды разного размера имеет следующие особенности: даже из крупной фракции (–120 +110 мм) через 5 дней выщелачивается 87% золота, а из более мелких фракций – до 95% за меньшее время. Вымывание растворенного золота ограничивается мелкими фракциями руды: для фракции –120 +110 мм требуется 8 дней, тогда как для фракции –0,3 мм процесс занимает не менее 16–18 дней, и именно этот класс определяет общую продолжительность процесса выщелачивания [15].

В практике используются два основных метода исследования минерального сырья на фильтрационные свойства и способность к выщелачиванию: опытная куча и колонные тесты [22, 23]. В фильтрационной колонне большого диаметра (не менее чем в 6–8 раз превышающего размер максимального куска) можно смоделировать гидродинамику процесса выщелачивания и схемы укладки рудного штабеля разными способами [15, 24].

Результаты, полученные непосредственно на опытной куче, могут дать более точное представление о фильтрационных свойствах рудного штабеля в реальных условиях эксплуатации.

Объект исследования

В качестве объекта исследования выступает рудный материал, уложенный в штабель КВ посредством конвейерной отсыпки стakerом. Технология формирования штабеля предусматривает предварительное дробление рудного материала до крупности –125+0 мм с последующим барабанным окомкованием

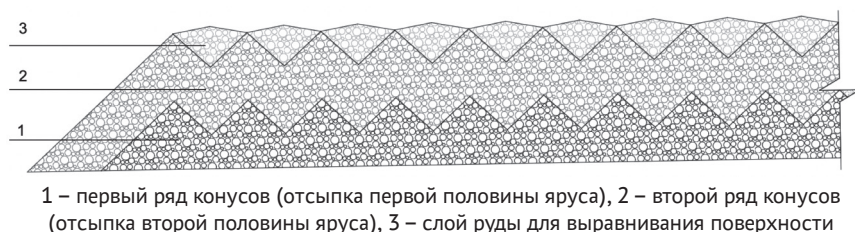


Рис. 1. Структура уложенного штабеля

Fig. 1. Structure of the stacked heap

песчано-глинистой фракции с добавкой портландцемента.

Технология укладки руды характеризует образование слоев с разными гидравлическими характеристиками за счет естественной сегрегации [25 – 27]. Сегрегация агломерированного песчано-глинистого материала и крупной обломочной фракции происходит как по горизонтали, так и по вертикали рудного штабеля под естественным углом откоса.

Укладка материала начинается с отсыпания двух рядов рудных конусов по всей ширине формируемой панели с высотой, равной половине планируемой высоты яруса (рис. 1, 1). Затем угол подъема стакера изменяется и поверх укладываются еще два ряда конусов до проектной высоты (рис. 1, 2). Основание конусов второй половины яруса располагается между конусами первой половины яруса. Поверхности сформированных конусов выравнивается с помощью досыпки руды, движением стрелы стакера взад и вперед (рис. 1, 3) [15]. Фронтальный вид штабеля КВ представлен на рис. 1.

На момент исследования штабель КВ сформирован в два яруса в среднем по 10 м каждый. Орошение осуществляется вобблерным методом. Установка работает сезонно, продолжительность выщелачивания руды в панели составляет до 60 сут с плотностью орошения 300 л/(м²·сут).

В основании первого яруса предусмотрена подушка выщелачивания, со-

стоящая из щебня фракции 25 – 70 мм, системы сбора растворов из полиэтиленовых перфорированных труб и геоматериала, который предотвращает проникновение растворов в грунт. Между ярусами штабеля предусмотрен противодиффузионный экран, сформированный посредством укатки, затем, аналогично основанию первого слоя, подушка из щебня и система сбора растворов.

Технология КВ предполагает, что массив находится в состоянии неполного водонасыщения, что в гидрогеологическом смысле представляет собой зону аэрации. При орошении и инфильтрации атмосферных осадков на участке промышленного комплекса КВ при наращивании высоты изменяются параметры физико-механических свойств материала, в том числе плотность сложения и коэффициент фильтрации [28 – 30].

Методы

Для определения водопроницаемости различных типов пород в зоне аэрации используются опытные наливки воды в подготовленные шурфы. Два наиболее эффективных метода – это методы А.К. Болдырева и Н.С. Нестерова. Метод Болдырева заключается в создании шурфа с небольшой камерой (зумпфом) на дне для наблюдения за инфильтрацией воды. Этот метод подходит для крупнозернистых пород, где вода может распространяться в стороны. В методе Нестерова используется двойной кольцевой контур для измерения вертикальной ин-

фильтрации воды. Он уменьшает влияние капиллярных сил и бокового распространения воды, что делает его более подходящим для менее проницаемых грунтов [31].

Несмотря на наличие методик и моделей для определения коэффициента фильтрации в различных областях геологии и строительства [32 – 34], специализированные подходы к полевым испытаниям для условий промышленного комплекса КВ не описаны в литературе.

Далее представлен апробированный метод поинтервальных опытно-фильтрационных работ (ОФР) для условий штабеля КВ, который позволяет напрямую установить изменение коэффициента фильтрации с глубиной и по площади.

Для проведения ОФР на выведенных из орошения участках были пробурены четыре скважины. В рамках этих работ в теплый период года было выполнено до 6 опытных наливов воды в каждую скважину. Наливы проводились через

определенные интервалы по глубине скважины, не превышающие длину интервала опробования. Максимальная глубина скважин составляла 18 м, а интервалы между наливами составляли 2 м. Общий вид штабеля и расположение опытных скважин показаны на рис. 2.

С помощью колонкового бура диаметром 146 мм разбуривается скважина до первого интервала опробования сверху. Затем скважина промывается и устанавливается фильтр с отверстиями 30% площади, диаметром 146 мм и длиной 2 м. Налив воды выполняется сверху вниз до тех пор, пока столб воды не достигнет высоты 2 м. Подача воды осуществляется через шланг, конец которого находится примерно по середине фильтра. Расход воды контролируется расходомером.

Напор воды регулируется так, чтобы количество поступающей сверху воды было равно количеству воды, уходящей через фильтр. Установившийся расход

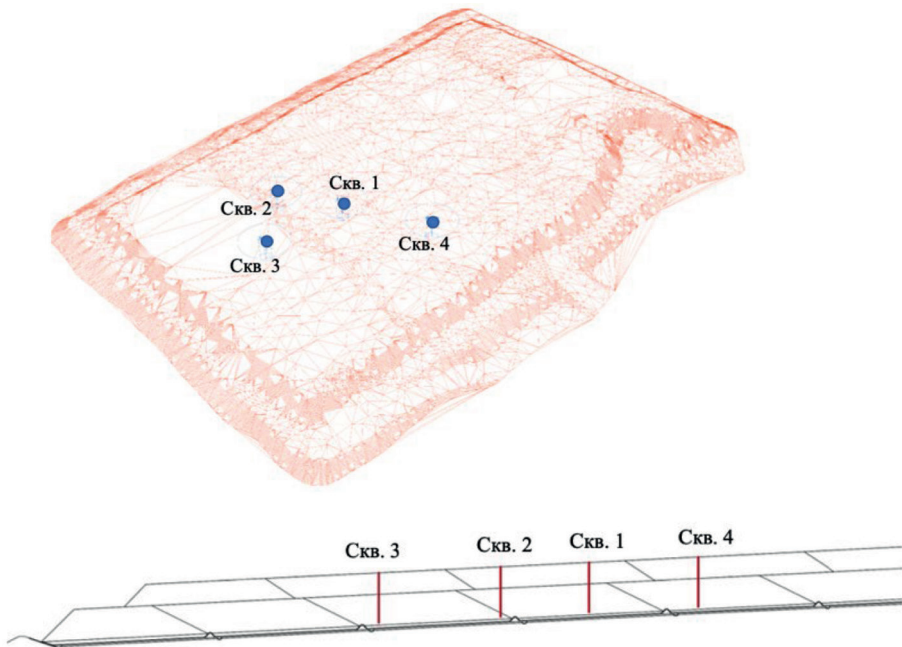


Рис. 2. Схема расположения опытно-фильтрационных скважин

Fig. 2. Location plan of field pilot infiltration boreholes

фиксируется в течение 2–5 мин. Для определения уровня воды в фильтре используется уровнемер, который устанавливается в пьезометре. Пьезометр представляет собой полую трубку требуемой длины. Уровень воды в фильтрационной колонне также может быть определен с помощью датчика гидростатического давления или другого аналогового устройства измерения.

Разбуривание до следующего интервала опробования осуществляется колонком меньшего диаметра без извлечения фильтра из скважины. После керн извлекается и фильтр задавливается на требуемую глубину. Вскрытый участок промывается, и производится следующий налив и т.д. Данный способ позволяет избежать затирания стенок скважины при бурении. На рис. 3 показаны конструктивные особенности проведе-

ния ОФР. При глубине исследования на два яруса потребовались обсадные трубы длиной 18 м, фильтр длиной 2 м, уровнемер, расходомер, емкость с водой объемом более 1 м³, а также шланг для подачи воды.

Определение коэффициента фильтрации выполняется по формуле В.М. Насберга [36]:

$$k = 0,423 \cdot \frac{Q}{l_0^2} \cdot \lg \frac{2 \cdot l_0}{r_w} \quad (1)$$

где Q – установившийся расход, м³; l_0 – высота столба в скважине: измеряется от дна скважины, м; r_w – радиус фильтра, м.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 отражены коэффициенты фильтрации по глубине штабеля. Резкое увеличение скорости фильтрации на глу-

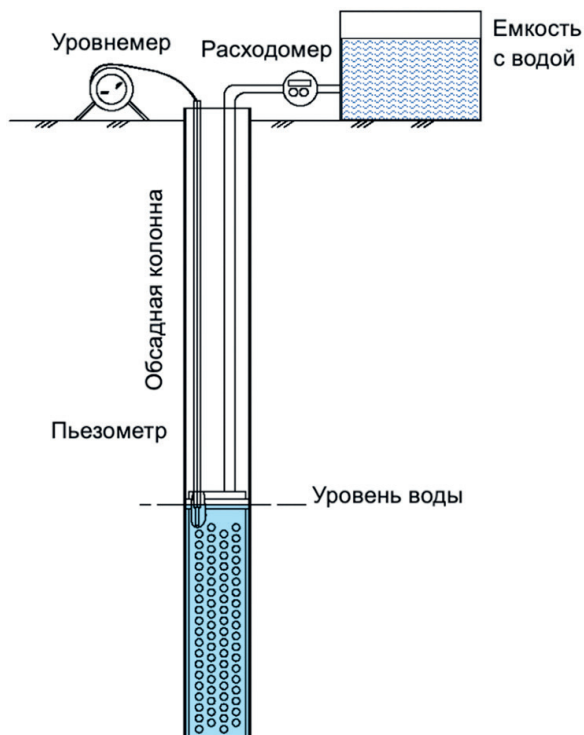


Рис. 3. Конструктивные особенности скважины
Fig. 3. Structural features of the borehole

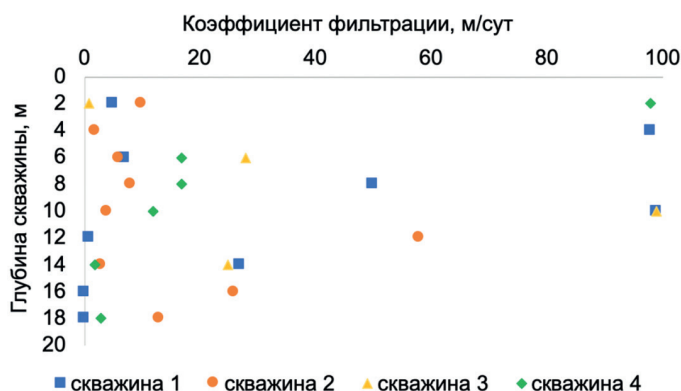


Рис. 4. Изменение коэффициента фильтрации по глубине штабеля

Fig. 4. Changing of filtration coefficient by heap depth

бине 10–12 м для скважин № 1 и № 2 указывает на подсечение скважинами ОФР межъярусного дренажного слоя. Данные значения не принимались для последующего анализа.

Падение фильтрационных характеристик на отдельных участках штабеля в большей степени обусловлено спецификой формирования штабеля, а не общим уплотнением в течение времени [35]. Медианное значение коэффициента фильтрации по штабелю составило 14 м в сутки.

В ходе исследований на глубине 16–17 м в скважине № 1 установлена зона со значениями коэффициента фильтрации, характерными для суглинков и глины. Это, скорее всего, связано с поднятием уровня раствора выше дренажного слоя и последующим размоканием окатышей или несоблюдением технологии окомкования. Также обнаружены зоны с высокой степенью фильтрации (более 100 м в сутки). Это может быть объяснено естественной сегрегацией при укладке руды в штабеле.

Заключение

В ходе выполнения полевых опытно-фильтрационных исследований по глубине и в плане установлены зоны как пониженных значений коэффициента

фильтрации (менее 0,1 м/сут), так и повышенных (более 100 м/сут).

При формировании рудного штабеля важно избегать скопления руды крупного класса. Однако распределение крупного класса по горизонтальным слоям штабеля незначительно увеличивает скорость фильтрации. Напротив, зоны с вертикальным расположением крупного класса значительно увеличивают скорость фильтрации. Они также определяют направление потока растворов и сокращают время контакта цианистых растворов с окомкованной рудой в ближней зоне сегрегации. В результате образуются зоны окомкованной руды, которым требуется больше времени для инфильтрации растворов. Что может приводить к неполному выщелачиванию полезного компонента.

Формирование штабеля должно осуществляться по схемам, которые учитывают естественную сегрегацию материала. Контролируемая сегрегация и агломерация способствует эффективному извлечению металлов. Принятые схемы укладки материала должны обеспечивать равномерность фильтрационных характеристик при заданной плотности орошения и избегать появления зон с низкими и высокими значениями этих параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванков С. И., Троицкий А. В., Скобелев К. Д. Современные тенденции создания технологии переработки и утилизации отходов обогащения горно-обогатительной отрасли // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2021. – № 2. – С. 2–39. DOI: 10.36535/0869-1002-2021-02-1.
2. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaya M. A. Circular economy models in industry: developing a conceptual framework // *Energies*. 2022, vol. 24, no. 15, pp. 9376–9386. DOI: 10.3390/en15249376.
3. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Тюляева Ю. С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. – № 3(49). – С. 406–415. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.
4. Чантурия В. А., Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В. Развитие технологических инноваций глубокой и комплексной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 159–171. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-159-171.
5. Alexandrova T., Nikolaeva N., Afanasyova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation // *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 1, pp. 84–112. DOI: 10.3390/min13010084.
6. Litvinova T., Kashurin R., Zhadovskiy I., Gerasev S. The kinetic aspects of the dissolution of slightly soluble lanthanoid carbonates // *Metals*. 2021, vol. 11, no. 11, article 1793. DOI: 10.3390/met11111793.
7. Пашкевич М. А., Алексеенко А. В., Нуреев Р. Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 155–167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
8. Рудзиш Э. Р., Петрова Т. А. Перспективы использования нетрадиционных мелиорантов для формирования растительного покрова на рекультивируемых территориях // Горный журнал. – 2023. – № 9. – С. 75–82. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11.
9. Якубовский М. А., Павличенко М. В., Логинов Е. В. Опыт проведения работ технической рекультивации земель, нарушаемых в процессе разработки месторождения песчано-гравийного материала // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 3(65). – С. 66–74. DOI: 10.26121/RON.2022.38.25.007.
10. Thenepalli T., Chilakala R., Habte L., Tuan L., Kim C. S. A brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals // *Sustainability*. 2019, vol. 11, no. 12, article 3347. DOI: 10.390/SU1112334730.
11. Jia L., Huang J., Ma Z., Liu X., Chen X., Li J., He L., Zhao Z. Research and development trends of hydrometallurgy: An overview based on Hydrometallurgy literature from 1975 to 2019 // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020, vol. 30, no. 11, pp. 3147–3160. DOI: 10.1016/S1003-6326(20)65450-4.
12. Козырев Б. А., Сизяков В. М. Кучное выщелачивание красного шлама формиатным методом // Обогащение руд. – 2021. – № 4. – С. 40–45. DOI: 10.17580/or.2021.04.07.
13. Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Абрамкин Н. И., Камболов Д. А. Практика применения выщелачивания металлов из некондиционного сырья и отходов обогащения руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 17–30. DOI: 10.25018/0236_14_93_2023_121_0_17.
14. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching technology – current state, innovations, and future directions: A review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016, vol. 377, pp. 73–119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.
15. Дементьев В. Е., Дружинина Г. Е., Гудков С. С. Кучное выщелачивание золота и серебра. – Иркутск: Иргиредмет, 2004. – 352 с.
16. Toro N., Ghorbani Y., Turan M. D., Robles P., Gálvez E. Gangues and clays minerals as rate-limiting factors in copper heap leaching: A review // *Metals*. 2021, vol. 11, no. 10, pp. 1539–1554. DOI: 10.3390/met11101539.
17. Leiming W., Shenghua Y., Aixiang W. Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 279, article 123705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123705.

18. Петраков Д. Г., Пеньков Г. М., Золотухин А. Б. Экспериментальное исследование влияния горного давления на проницаемость песчаника // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 244 — 251. DOI: 10.31897/PMI.2022.24.
19. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Комащенко В. И., Бурдзиева О. Г. Экспериментальное исследование качества дробления руд для подземного выщелачивания // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 6. — С. 160 — 166. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3246.
20. Татауров С. Б. Обоснование геотехнологических процессов кучного выщелачивания золота с криогенными преобразованиями минерального сырья: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. СПб.: СПбГУ, 2011. — 41 с.
21. Тчаро Х., Тчаро Я. А., Мирсамиев Н. А. Новые подходы к повышению фильтрационных свойств штабелей кучного выщелачивания // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 6. <https://esj.today/PDF/32NZVN623.pdf>.
22. Wang L., Zhang X., Yin S., Zhang X., Liu P., Ilankoon I. M. S. K. Three-dimensional characterization of pore networks and fluid flow in segregated heaps in the presence of crushed ore and agglomerates // Hydrometallurgy. 2023, vol. 219, article 106082. DOI: 10.1016/J.Hydromet.2023.106082.
23. Apelt T., Forrester K., Short M., Stefan L. Determination of optimum heap height from column leach tests: 1. Model development and initial results // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2017, vol. 126, no. 3, pp. 146 — 156. DOI: 10.1080/03719553.2016.1196520.
24. McBride D., Gebhardt J., Croft N., Cross M. Heap leaching: modeling and forecasting using CFD technology // Minerals. 2018, vol. 8, no. 1, article 9. DOI: 10.3390/MIN8010009.
25. van Staden P. J., Petersen J. The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 1: Segregation // Minerals Engineering. 2018, vol. 128, pp. 202 — 214. DOI: 10.1016/J.Mineng.2018.08.045.
26. Русанов И. Ф., Русанова Н. И. Влияние условий формирования откоса на сегрегацию материалов по крупности на его поверхности // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — 2019. — № 13(56). — С. 27 — 33.
27. Пчелкин Г. Д., Кустов В. В., Кустов А. В. Экспериментальные исследования влияния свойств рыхлых пород на характеристику откоса насыпного техногенного формирования // Горный вестник. — 2012. — № 95. — С. 219 — 223.
28. Лушников Я. В., Багазеев В. К. Определение физико-механических свойств окатышей при формировании штабеля кучного выщелачивания // Известия вузов. Горный журнал. — 2013. — № 8. — С. 124 — 127.
29. Воробьев А. Е., Тчаро Х. Основные факторы, определяющие эффективность орошения штабеля КВ // Вестник евразийской науки. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 59.
30. Кутепов Ю. Ю., Карасев М. А. Изучение и прогноз уплотнения фосфогипса в отвалах для обоснования их вместимости // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 61 — 67. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09.
31. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. — М.: Госстройиздат, 1962. — 180 с.
32. Saldaña M., Gálvez E., Robles P., Castillo J., Toro N. Copper mineral leaching mathematical models — A review // Materials. 2022, vol. 15, no. 5, article 1757. DOI: 10.3390/ma15051757.
33. Морозов К. В., Демёхин Д. Н., Котлов С. Н., Абашин В. И. Шахтные экспериментальные исследования фильтрационных свойств горных пород на глубоких горизонтах месторождений калийных солей для создания водозащитных перемычек // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 25 — 31. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04.
34. Iovlev G. A., Protosenya A. G., Petrov N. E. Determination of parameters of soil constitutive models based on field test data // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2024, vol. 60, pp. 528 — 534. DOI: 10.1007/s11204-024-09925-3.
35. Маринин М. А., Карасев М. А., Поспехов Г. Б., Поморцева А. А., Кондакова В. Н., Сушкова В. И. Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов фильтрации в штабеле кучного выщелачивания // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 30 — 40. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.
36. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 2. — М.-Л.: Недра, 1967. — 360 с. **ГЛАВ**

REFERENCES

1. Ivankov S. I., Troitsky A. V., Skobelev K. D. Modern trends in the creation of technology for processing and disposal of enrichment waste in the mining and processing industry. *Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection*. 2021, no. 2, pp. 2–39. [In Russ]. DOI: 10.36535/0869-1002-2021-02-1.
2. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaya M. A. Circular economy models in industry: developing a conceptual framework. *Energies*. 2022, vol. 24, no. 15, pp. 9376–9386. DOI: 10.3390/en15249376.
3. Rybak Ya., Khayrutdinov M. M., Kongar-Syuryun Ch. B., Tyulyayeva Yu. S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 3(49), pp. 406–415. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.
4. Chanturiya V. A., Shadrinova I. V., Gorlova O. E., Kolodezhnaya E. V. Development of technological innovations of deep and complex processing of technogenic raw materials in the context of new economic challenges. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 1, pp. 159–171. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-159-171.
5. Alexandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation. *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 1, pp. 84–112. DOI: 10.3390/min13010084.
6. Litvinova T., Kashurin R., Zhadovskiy I., Gerasev S. The kinetic aspects of the dissolution of slightly soluble lanthanoid carbonates. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 11, article 1793. DOI: 10.3390/met11111793.
7. Pashkevich M. A., Alekseenko A. V., Nureev R. R. Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 155–167. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
8. Rudzish R. E., Petrova V. A. Application prospects for nonconventional improvers for vegetation cover in reclamation areas. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 75–82. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11.
9. Yakubovsky M. A., Pavlichenko M. V., Loginov E. V. Experience in technical recultivation of lands disturbed during the development of sand-gravel deposit. *Mineral mining & conservation*. 2022, no. 3(65), pp. 66–74. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2022.38.25.007.
10. Thenepalli T., Chilakala R., Habte L., Tuan L., Kim C. S. A brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals. *Sustainability*. 2019, vol. 11, no. 12, article 3347. DOI: 10.390/SU1112334730.
11. Jia L., Huang J., Ma Z., Liu X., Chen X., Li J., He L., Zhao Z. Research and development trends of hydrometallurgy: An overview based on Hydrometallurgy literature from 1975 to 2019. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020, vol. 30, no. 11, pp. 3147–3160. DOI: 10.1016/S1003-6326(20)65450-4.
12. Kozyrev B. A., Sizyakov V. M. Heap leaching of red mud by the formate method. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 4, pp. 40–45. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.04.07.
13. Valiev N. G., Propp V. D., Abramkin N. I., Kambolov D. A. The practice of leaching metals from substandard raw materials and ore dressing waste. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 12-1, pp. 17–30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_17.
14. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching technology – current state, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016, vol. 377, pp. 73–119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.
15. Dement'ev V. E., Druzhinina G. E., Gudkov S. S. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolota i srebro* [Heap leaching of gold and silver], Irkutsk, Irgiredmet, 2004, 352 p.
16. Toro N., Ghorbani Y., Turan M. D., Robles P., Gálvez E. Gangues and clays minerals as rate-limiting factors in copper heap leaching: A review. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 10, pp. 1539–1554. DOI: 10.3390/met11101539.
17. Leiming W., Shenghua Y., Aixiang W. Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 279, article 123705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123705.

18. Petrakov D. G., Penkov G. M., Zolotukhin A. B. Experimental study on the effect of rock pressure on sandstone permeability. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 244–251. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.24.
19. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Komashchenko V. I., Burdzieva O. G. Experimental study of the quality of ore crushing for underground leaching. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 352, no. 6, pp. 160–166. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3246.
20. Tataurov S. B. *Obosnovanie geotekhnologicheskikh protsessov kuchnogo vyshchelachivaniya zolota s kriogennymi preobrazovaniyami mineral'nogo syr'ya* [Justification of geotechnological processes of heap leaching of gold with cryogenic transformations of mineral raw materials], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2011, 41 p.
21. Tcharo H., Tcharo Ya. A., Mirsamiev N. A. New approaches to improving heap leach stockpiles filtration properties. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023, vol. 15, no. 6. [In Russ]. <https://esj.today/PDF/32NZVN623.pdf>.
22. Wang L., Zhang X., Yin S., Zhang X., Liu P., Ilankoon I. M. S. K. Three-dimensional characterisation of pore networks and fluid flow in segregated heaps in the presence of crushed ore and agglomerates. *Hydrometallurgy*. 2023, vol. 219, article 106082. DOI: 10.1016/J.Hydromet.2023.106082.
23. Apelt T., Forrester K., Short M., Stefan L. Determination of optimum heap height from column leach tests: 1. Model development and initial results. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2017, vol. 126, no. 3, pp. 146–156. DOI: 10.1080/03719553.2016.1196520.
24. McBride D., Gebhardt J., Croft N., Cross M. Heap leaching: modeling and forecasting using CFD technology. *Minerals*. 2018, vol. 8, no. 1, article 9. DOI: 10.3390/MIN8010009.
25. van Staden P. J., Petersen J. The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 1: Segregation. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 128, pp. 202–214. DOI: 10.1016/J.Mineng.2018.08.045.
26. Rusanov I. F., Rusanov N. I. Influence of slope formations conditions on the segregation of materials by size over inclined surface. *Sbornik Don GTU*. 2019, no. 13(56), pp. 27–33. [In Russ].
27. Pchelkin G. D., Kustov V. V., Kustov A. V. Experimental studies of the influence of loose rock properties on the slope characteristic of the bulk technogenic formation. *Gorny Vestnik*. 2012, no. 95, pp. 219–223. [In Russ].
28. Lushnikov Ya. V., Bagazeev V. K. Definition of physical and mechanical properties of ore pellets when forming a stack of heap leaching. *Minerals and Mining Engineering*. 2013, no. 8, pp. 124–127. [In Russ].
29. Vorob'ev A. E., Tcharo Kh. The main factors determining the efficiency of irrigation of the HL stack. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 59. [In Russ].
30. Kutepov Yu. Yu., Karasev M. A. Analysis and prediction of phosphogypsum compaction in dumps for dump capacity substantiation. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 61–67. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.09.
31. Verigin N. N. *Metody opredeleniya fil'tratsionnykh svoystv gornykh porod* [Methods for determining the filtration properties of rocks], Moscow, Gosstroyizdat, 1962, 180 p.
32. Saldaña M., Gálvez E., Robles P., Castillo J., Toro N. Copper mineral leaching mathematical models – A review. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 5, article 1757. DOI: 10.3390/ma15051757.
33. Morozov K. V., Demekhin D. N., Kotlov S. N., Abashin V. I. In-situ permeability testing of deep-level potash salt rocks with a view to creating water retaining walls. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 25–31. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04.
34. Iovlev G. A., Protosenya A. G., Petrov N. E. Determination of parameters of soil constitutive models based on field test data. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024, vol. 60, pp. 528–534. DOI: 10.1007/s11204-024-09925-3.
35. Marinin M. A., Karasev M. A., Posphehov G. B., Pomortseva A. A., Kondakova V. N., Sushkova V. I. Comprehensive study of filtration properties of pelletized sandy clay ores and filtration modes in the heap leaching stac. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 30–40. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.
36. *Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa*, t. 2 [Hydrogeologist's reference guide, vol. 2], Moscow-Leningrad, Nedra, 1967, 360 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Маринин Михаил Анатольевич*¹ — канд. тех. наук,
доцент, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

*Поспехов Георгий Борисович*¹ — канд. геол-мин. наук,
доцент, e-mail: pospehov@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9090-5150,

*Сушкова Вероника Ивановна*¹ — аспирант,
e-mail: s235054@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4247-6499,

Поморцева Анастасия Александровна — ведущий
специалист, ООО «Газпром инвест»,
e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7911-7011,

Мосейкин Владимир Васильевич — д-р техн. наук,
профессор, НИТУ МИСИС,
e-mail: moseykin@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2286-1480,

¹ Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II.

Для контактов: Маринин М.А., e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*M.A. Marinin*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,

e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

*G.B. Posphehov*¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Assistant Professor, e-mail: pospehov@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9090-5150,

*V.I. Sushkova*¹, Graduate Student,
e-mail: s235054@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4247-6499,

A.A. Pomortseva, Leading Specialist,
Limited Liability Company «Gazprom invest»,
196210, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7911-7011,

V.V. Moseykin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,

e-mail: moseykin@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2286-1480,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: M.A. Marinin, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 03.04.2024; получена после рецензии 13.05.2024; принята к печати 10.07.2024.
Received by the editors 03.04.2024; received after the review 13.05.2024; accepted for printing 10.07.2024.

