

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Ю.Л. Гуревич¹, А.Г. Михайлов^{1,2}, Н.Ф. Усманова^{2,3}, М.И. Теремова¹, А.Е. Зуев¹

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, Россия, e-mail: mag@icct.ru

² Институт химии и химической технологии СО РАН —

обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия,

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация: Представлены результаты экспериментального направленного вещественного преобразования материала из массива хвостов обогащения полиметаллических руд. Эксперименты проведены на лабораторной установке, имитирующей режим восходящего выщелачивания *in situ* в условиях капиллярного фильтрационного подъема растворов и иммобилизации на испарительном барьере на дневной поверхности. В качестве окислительного компонента выщелачивающего агента использовали растворы пероксида водорода с концентрацией 0,5%, 3,0%, 10,0% в сопоставлении с аборигенным бактериальным преобразованием. Аборигенный тип бактерий выделен непосредственно из исследуемых хвостов обогащения. Для культивирования аборигенных микроорганизмов инокулировали питательную среду в фильтрационный поток. В рамках эксперимента установлена зависимость уровня концентрации ионов цветных металлов в растворе от исходного окислительно-восстановительного потенциала и получены экспериментальные данные по кинетике процесса преобразования при восходящем фильтрационном массопереносе. Установлено идентичное с пероксидом водорода окислительное влияние бактерий на процесс. Подтверждено активное участие автохтонной микрофлоры в фильтрационном окислительном выщелачивании, когда минеральное сырье выступает как единственный субстрат роста для микроорганизмов. Отмечено отличное по скорости выделение в жидкую фазу ионов кобальта по сравнению с ионами меди и никеля в зависимости от состава выщелачивающего раствора.

Ключевые слова: выщелачивание, хвосты обогащения полиметаллических руд, фильтрация, капилляры, пероксид водорода, бактерии, иммобилизация, испарительный барьер.

Благодарность: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда науки № 25-17-20016 (гос. рег. №7125061006884-7), гранта Красноярского краевого фонда науки с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Для цитирования: Гуревич Ю. Л., Михайлов А. Г., Усманова Н. Ф., Теремова М. И., Зуев А. Е. Извлечение цветных металлов из хвостов обогащения полиметаллических руд с применением биовыщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 126–140. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_126.

Recovery of nonferrous metals from complex ore mill tailings by bio-leaching

Yu.L. Gurevich¹, A.G. Mikhailov^{1,2}, N.F. Usmanova^{2,3}, M.I. Teremova¹, A.E. Zuev¹

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS (FRC KSC SB RAS), Krasnoyarsk, Russia, e-mail: mag@icct.ru

² Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS – a separate division of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail:

Abstract: The article describes the experimental directional and real transformation of complex ore mill tailings. The experiments were carried out on a laboratory plant simulating regime of in-situ upward leaching with capillary rise of solutions and their immobilization on a vapor barrier on ground surface. The oxidizing components of a leaching agent were solutions of hydrogen peroxide with the concentrations of 0.5%, 3.0% and 10.0 % in the comparison with the indigenous bacterial transformation. The indigenous type of bacteria was extracted directly from the test ore mill tailings. For the cultivation of the indigenous microorganisms, the culture medium was inoculated in the seepage flow. The tests revealed the dependence of the concentration of nonferrous metal ions in the solution on the initial redox potential and produced the data on the transformation process kinetics in the upward seepage mass transfer. It is found that the oxidative effect of the bacteria on the process is similar to the influence of hydrogen peroxide. It is proved that the autochthonous microflora takes an active participation in the oxidative seepage leaching when the mineral material acts as a single growth medium for microorganisms. The rates of extraction of cobalt ions, copper ions and nickel ions in the liquid phase differ and depend on the leaching solution composition.

Key words: leaching, complex ore mill tailings, flow, capillaries, hydrogen peroxide, bacteria, immobilization, vapor barrier.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-17-20016, State Registration No. 7125061006884-7 and by the Krasnoyarsk Region Science Foundation, and used equipment of the Krasnoyarsk Shared-Use Center at the Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Gurevich Yu. L., Mikhailov A. G., Usmanova N. F., Teremova M. I., Zuev A. E. Recovery of nonferrous metals from complex ore mill tailings by bio-leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):126-140. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_126.

Введение

Потенциальным источником, содержащим цветные, редкие и благородные металлы, и в то же время источником экологической опасности являются значительные объемы хвостов обогащения полиметаллических руд, накопленные в отвалах и хвостохранилищах [1]. Традиционные методы переработки таких материалов часто экономически неэффективны из-за низкого содержания ценных компонентов и их вещественного со-

става при тонкой вкрапленности в минеральную матрицу [2, 3]. Надеяться на сохранение тренда совершенствования технологий добычи и переработки, не вкладывая средств в разработку прорывных технологий, учитывающих снижение доли богатых руд и рост объемов хвостов, отвалов и т.п., было бы ошибочным [4]. На наш взгляд, вариантом принципиально нового подхода к построению технологий является направление вещественного преобразования

техногенных образований в режиме *in situ* (на месте залегания). Основа такого подхода заключается в использовании природных геологических процессов преобразования, которые как раз и приводят к формированию месторождений в недрах массива. Преобразование недр к требуемому для дальнейшего технологического использования вещественному состоянию желательно осуществлять на основе высокоинтенсивных геологических процессов, которые могут быть реализованы на данном участке недр. В отличие от чисто естественных геологических процессов, такие процессы требуют техногенного управляемого инициирования. Данные функционирования крупных горнопромышленных районов свидетельствуют о значительном потенциале техногенных объектов и многочисленных свидетельствах техногенно инициированных гипергенных процессов в них [5 – 9] без контроля направленности гипергенеза. Эти исследования показывают гипотетический потенциал вовлечения остаточных цветных металлов и снижения экологической нагрузки на окружающую среду [10]. В этих условиях может оказаться рациональным направленное преобразование, основанное на активизации гомеостатических механизмов природной среды [11, 12]. Этого можно достичь организацией направленного массопереноса в сочетании с управляемой иммобилизацией. Учитывая поверхностную локализацию хвостов обогащения с относительно неплохим доступом кислорода, гипергенный процесс в массиве хвостов может быть периодически достаточно интенсивным. Кроме того, поверхностное вещественное преобразование предопределяет сопутствующее участие микроорганизмов в процессах вещественного преобразования. В этом контексте биотехнологические методы, в частности биовыщелачивание, откры-

вают дополнительные новые возможности для технологических решений вовлечения в переработку хвостов полиметаллических руд [13].

Само по себе биовыщелачивание основано на способности хемолитоавтотрофных микроорганизмов окислять сульфидные минералы, что способствует переводу ценных металлов в растворимую форму. Фильтрационный флюидный массоперенос — это природный процесс, и, соответственно, он характеризуется относительно низкими затратами и довольно широкими возможностями рентабельной переработки низкосортного сырья и минимальным вредным воздействием на окружающую среду по сравнению с традиционными пирометаллургическими и гидрометаллургическими методами [14].

На наш взгляд, особый интерес представляет разработка хвостов полиметаллических руд, содержащих медь, цинк, свинец, никель и другие ценные элементы. Учитывая, что каждое месторождение уникально по составу и, соответственно, уникальным является состав каждого хвостохранилища, несмотря на идентичность окислительных процессов преобразований, присущих сульфидам цветных металлов. Индивидуальность их *in situ* преобразований обусловлена исходным минеральным составом и привносимыми реагентами. Ограничения полноты извлечения традиционными методами обусловлены свойствами рудных минералов, наличием и концентрацией труднообогатимых минералов. Более полное извлечение может привнести биовыщелачивание. Следует учитывать индивидуальность бактериального подхода к каждому виду сырья.

Достаточно важным дополнением биовыщелачивания является снижение вредного влияния вещественного преобразования на природную среду техногенных образований в режиме *in situ*.

В данной статье рассматриваются аспекты применения биовыщелачивания на примере переработки лежалых хвостов обогащения полиметаллических руд. Исследования направлены на разработку эффективной технологии, позволяющей повысить степень извлечения бедного содержания ценных компонентов при одновременном снижении экологической нагрузки на природную среду, к примеру, биовыщелачиванием [15]. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий переработки минерального сырья, соответствующих принципам устойчивого развития и циркулярной экономики. Особое внимание уделено оптимизации параметров биотехнологического процесса, регулированию физико-химических условий и управлению кинетикой выщелачивания.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки промышленных технологий утилизации техногенных отходов горнодобывающей промышленности и создания замкнутых производственных циклов.

Материалы и методы исследования

Исследования по переработке хвостов обогащения полиметаллической руды проводили в колоннах, моделирующих природный процесс восходящей фильтрации при подъеме на поверхность водных флюидов в массивах с атмосферным испарением. Экспериментальные исследования проводили по схеме установки капиллярного подъема растворов в приповерхностной зоне аэрации в продолжение наших исследований [16].

Для экспериментального исследования выщелачивания ценных компонентов из отходов обогащения рудного сырья была разработана установка, моделирующая режим восходящего капиллярного фильтрационного подъема растворов на дневную поверхность с испарительным барьером. Установка дополнена двумя блоками колонн диаметром 40 мм, высотой 430 мм. В данном эксперименте использовали два блока по 4 колонны в каждом (рис. 1).

В качестве основного выщелачивающего агента в колоннах использовали воду питьевой минерализации без до-

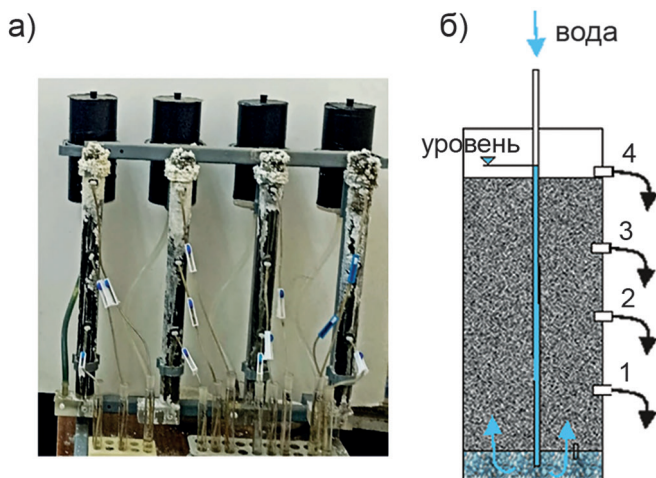


Рис. 1. Лабораторная установка восходящего капиллярного подъема: установка (а); схема подачи растворов и движения раствора (б); 1–4 — точки отбора проб

Fig. 1. Laboratory setup for ascending capillary rise: setup (a); solution feed and solution movement diagram (b), 1–4 — sampling points

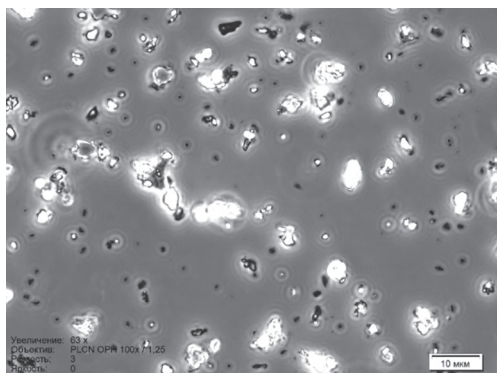


Рис. 2. Аборигенные бактерии класса *Acidithiobacillus ferrooxidans* в растворе

Fig. 2. Indigenous bacteria of the class *Acidithiobacillus ferrooxidans* in solution

бавок (одна колонна) и с окислительными компонентами в виде водных растворов пероксида водорода в концентрации 0,5%, 3,0% и 10%. В трех следующих экспериментальных колоннах использовали подачу питания для аборигенных бактерий.

Подача растворов осуществлялась в донную часть колонны (схема на рис. 1, б). Уровень подачи учитывал высоту капиллярного подъема в соответствии с размерами капилляров массива из материала хвостов флотационного обогащения. Уровень подачи растворов в массив поддерживался автоматически сосудом Мориотта. Экспериментальный массив представлен материалом хвостов обогащения 80% класса $-0,044$ мм.

Эксперименты проводили при комнатной температуре $20-25$ °C. Контроль вещественного преобразования, в частности, переход элементов в раствор, осуществляли на трех уровнях в каждой колонне (на уровнях $1/3$, $2/3$ высоты колонны) и на поверхности. Сама поверхность массива (колонны) являет собой испарительный барьер. Жидкую фазу по каждому уровню анализировали методами атомно-абсорбционной спектроскопии и масс-спектроскопии с

индуктивно-связанной плазмой. Экспериментальный цикл рассчитан на длительный период. Представлены к рассмотрению результаты (не окончательные) после первых 150 дней (эксперименты не окончены).

Одну из экспериментальных колонн использовали для изучения степени участия микробиологического сопровождения в преобразовании вещественного состава. Для этого использовали аборигенные бактерии. Выделение бактерий из материала массива проводили только для идентификации их вида. Отдельное культивирование в реакторах не проводили. Вместо этого для поддержания и наращивания предельной численности бактерий в массиве использовали избыточную подачу питательной смеси вместе с подачей выщелачивающих реагентов через донную часть колонны. Питание являлось избыточным исходя из расчета, что лимитирующим фактором бактериального процесса преобразования является содержание железа в составе сульфидной минерализации. Энергетическим субстратом для автохтонных бактерий типа *Acidithiobacillus ferrooxidans* служат сульфидные минералы, что также подтверждает исследование [17, 18]. По ходу восходящей фильтрации раствора в каждой колонне контролировали химический состав растворов по уровням (см. рис. 1) и их бактериальную составляющую (рис. 2).

Минеральный состав экспериментального массива, представленного хвостами флотационного обогащения полиметаллической руды, характеризуется дисперсно-вкрапленными сульфидами в рудных и пороодообразующих минералах. Из рудных минералов присутствуют пирротин, пентландит, халькопирит, пирит; их совокупная доля не превышает 6%. Пороодообразующие минералы, такие как кварц, полевые шпаты, слюды, пироксены, хлориты, оксиды железа,

оливины, представляют основу (более 90%) отходов обогащения. Химический состав хвостов имеет следующую характеристику: Fe_2O_3 – 20,2%; MgO – 6,52%; MnO – 0,22%; Al_2O_3 – 11,0%; CaO – 11,1%; K_2O – 1,4%; P_2O_5 – 0,15%; Na_2O – 1,45%; SiO_2 – 40,7%; TiO_2 – 0,78%; $(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$ – 3,14%, Fe_7S_8 – 1,31%, CuFeS_2 – 1,1% и FeS_2 – 1,0%. Исходя из химического состава хвостов обогащения, следует, что в ходе преобразований с переводом в раствор возможно выщелачивание фосфора и калия, которые могут представлять собой питательную среду для бактерий. Количественное присутствие этих элементов из минерального субстрата достаточно для поддержания стабильного роста аборигенных микроорганизмов в экстенсивных условиях процесса выщелачивания. Однако с целью соблюдения принципа избыточности питания и для ускорения роста численности бактерий и для интенсивности окислительного процесса при выщелачивании минерального субстрата в начальные точки фильтрационного потока дополнительно вносили минеральные соли фосфора и азота.

Вещественное преобразование в ходе экспериментов контролировалось переходом в жидкую фазу следующих

элементов: Cu, Ni, Fe, Co, S, Mn. В ходе экспериментального цикла периодически отбирались пробы по всем уровням (см. рис. 1, б) флюидов и твердой фазы.

Результаты и обсуждение

На начальном этапе, через полтора месяца от начала эксперимента, в колонне, где выщелачивающим раствором выступал 10%-й раствор H_2O_2 , происходило активное выделение в жидкую фазу ионов металлов (Cu, Ni, Co, Fe, Mn). В колоннах с подачей 0,5%-го и 3,0%-го пероксида водорода концентрации выщелоченных ионов металлов в растворе в этот период были ниже от 5 до 100 раз. Но при этом наблюдается активный рост аборигенной микрофлоры (см. рис. 2). Аналогичная их концентрация отмечалась, практически, на протяжении всего периода эксперимента. В процессе фильтрационного массопереноса изначально учитывалась возможность переосаждения выщелоченных элементов по ходу движения растворов. Это фиксируется сменой концентрации на разных уровнях и подтверждает результат более чем месячной задержки накопления их на поверхности из парительного барьера. В течение всего периода присутствие бактерий отмечается практически на всех уровнях и во

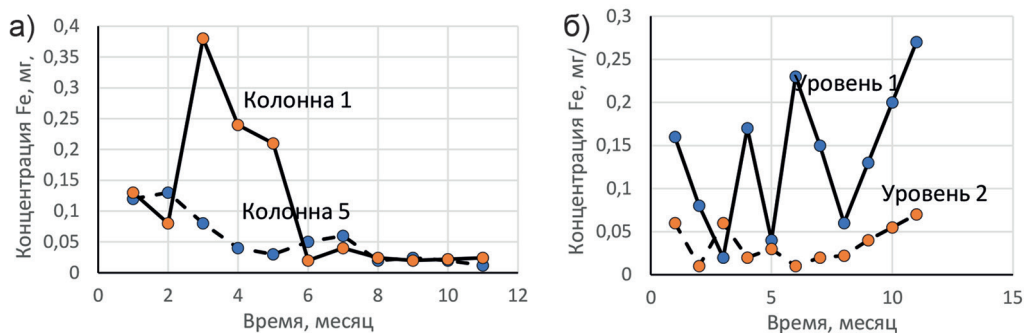


Рис. 3. Изменение концентрации Fe с 3,0% H_2O_2 (колонна 1) и с водой (колонна 5) (а); с питанием стимулирующим рост аборигенных бактерий (колонна 3) (б)

Fig. 3. Change in the concentration of Fe with 3,0% H_2O_2 (column 1) and with water (column 5) (a); with nutrition stimulating the growth of indigenous bacteria (column 3) (b)

всех колоннах (даже в колонне с 10%-м пероксидом водорода, правда, единичные случаи и только в верхнем уровне). Их численность коррелирует с уровнем кислотности и подачи питания. Следует отметить, что, в отличие от известных процессов бактериального выщелачивания сульфидных руд, которые протекают в аэробных условиях, в данном экспериментальном цикле в среднем уровне колонны только с водой бактерии находились и в анаэробной среде.

При высоком окислительном потенциале в нижней зоне колонны с подачей пероксида водорода отмечается «взрывной» рост ионов Fe в растворе в первый начальный период с последующим достаточно резким падением, что показано на рис. 3, а, б для условий с концентрацией Fe при H_2O_2 в 3,0%, как, впрочем, и в результатах с изменением цветных металлов (рис. 4). В колонне с чисто бактериальной обработкой высвобожденных ионов Fe на начальном этапе относительно немного, но отмечается эпизодическое резкое волнообразное их увеличение в течение всего последующего периода контролирования (см.

рис. 3, б). Практически аналогичная картина наблюдается и с ионами контролируемых цветных металлов. Отмечается резкий рост ионов Ni и Co в растворе только после 3 месяцев.

Характерная особенность динамики выщелачивания хвостов полиметаллической руды состоит в том, что в начальный период эксперимента содержание в жидкой фазе извлекаемых элементов (Fe, Cu, Ni, Co, S) достигает наибольших значений (в течение первых 3–4 недель). Содержание меди и серы в растворе (рис. 5) находится, как и предполагалось, в практически полной (92%) корреляции. После первоначального довольно резкого повышения концентрации следует такое же резкое значительное снижение их концентрации в растворе. Можно предположить, что это связано с переосаждением на поверхностях капилляров массива переведенных в раствор элементов и, как следствие, частичной коагуляцией капилляров массива, что сопровождается некоторым снижением скорости фильтрации. Снижение концентрации выщелачиваемых цветных металлов и железа в растворе

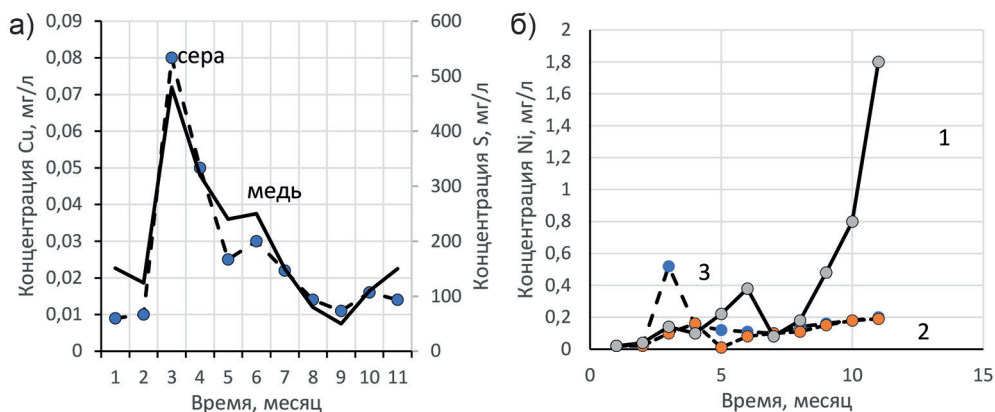


Рис. 4. Изменение концентрации веществ в период года по месяцам: Cu и S с H_2O_2 (а); Ni без питания бактерий (3), только с питанием для стимулирования роста аборигенных бактерий с растворами H_2O_2 концентрацией 0,5% (2) и концентрацией 3,0% (1) (б)

Fig. 4. Change in the concentration of substances during the period of the year by month: Cu and S with H_2O_2 (a); Ni without bacterial nutrition (3), only with nutrition stimulating the growth of indigenous bacteria with H_2O_2 solutions with a concentration of 0.5% (2), and a concentration of 3.0% (1) (b)

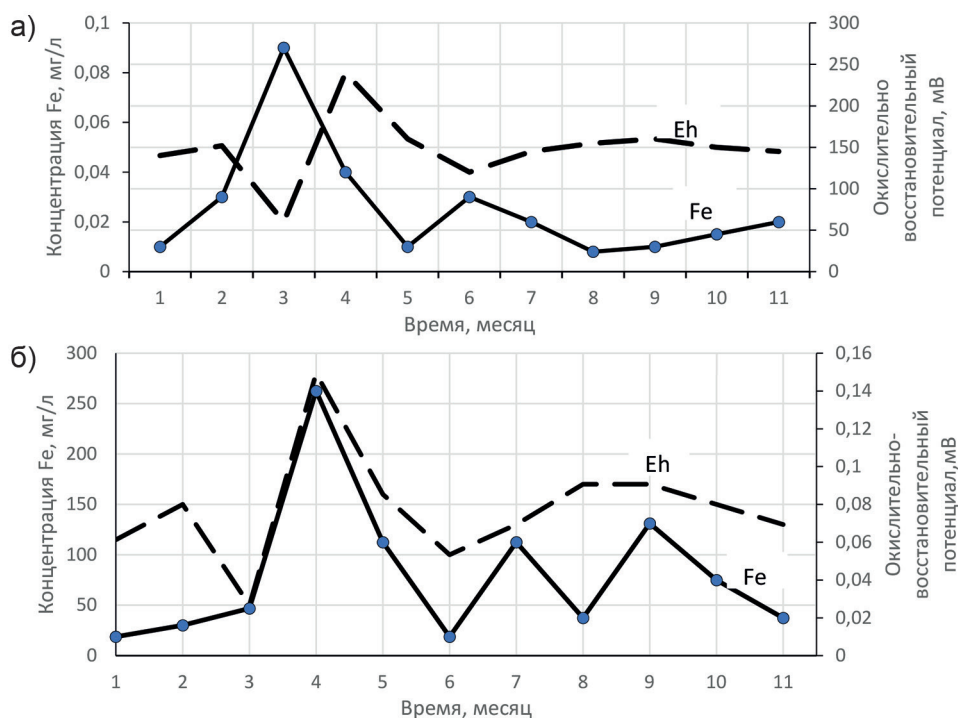


Рис. 5. Изменение окислительно-восстановительного потенциала Eh и концентрации Fe на среднем уровне в колонне с 3%-м раствором пероксида (а) и с аборигенными бактериями (б)

Fig. 5. Change in the oxidation-reduction potential Eh and the concentration of Fe at the average level in a column with a 3% peroxide solution (a) and with indigenous bacteria (b)

можно объяснить вероятным переосаждением их по ходу восходящего подъема, как отмечается в [19], при фильтрационном выщелачивании. При опробовании были отмечены осадки в форме вторичных сульфатов цветных металлов. Единственный выщелачиваемый элемент, который можно рассматривать в качестве решающего и, вероятно, контролирующего процесс — кальций, так как уровень его концентрации в жидкой фазе — одного порядка с серой. Наибольших значений выщелачиваемых элементов достигает также сера (до 800 мг/л), минимальных — кальций (до 0,544 мг/л). Суммарная доля рудных минералов (пирротина, пентландита, халькопирита и пирита) в хвостах обогащения, отобранных в эксперимент, в исходном состоянии была в пределах

3,5—6%. В связи с этим текущие концентрации меди, никеля в жидкой фазе наблюдались достаточно низкие, в отличие от Fe, тем не менее, динамика выщелачивания цветных металлов имела согласованный вид, что свидетельствует в пользу единого механизма окисления сульфидов. Поскольку в выщелачивании цветных металлов немаловажное значение играет железо в 2-валентном состоянии, его контроль производился, в том числе, посредством pH среды. Во всех колоннах установки среда относительно стабильная и находилась в течение всего эксперимента в пределах от слабо кислой до слабо щелочной (pH 5—8 с колебаниями в 0,5 в обе стороны). В этих условиях происходит гидролиз с участием Fe(II) в капиллярах при небольшой скорости фильтрации, фор-

мирующиеся гидроокиси осаждаются на поверхности капилляров. Влияние автохтонных микроорганизмов на выщелачивание хвостов обогащения полиметаллических руд оценивается сопоставлением динамики концентраций ключевых элементов — Fe, Cu, Ni и S на разных уровнях отбора проб по направлению движения раствора в колонне. Условия выщелачивания во всех колоннах были идентичны, за исключением условий со стимулированием роста автохтонных микроорганизмов. В этой колонне содержание на уровнях 1, 2 и 3 в сопоставлении с условиями с пероксидом водорода по элементам серы, железа, меди и никеля превысило (мг/л): на 1,1; 1,43 и 1,2 по сере, 2,7; 3,2 и 29,4 по железу, 4,2; 2,1 и 0,4 по меди и 13,4; 5,5 и 0,86 по никелю, соответственно. То есть, извлечение этих элементов в жидкую фазу при участии микроорганизмов в наших экспериментальных исследованиях было кратно выше, что согласуется с результатами в литературных источниках [20—22] по биовыщелачиванию.

Кроме того, на наш взгляд, весьма характерным контролирующим фактором биоокислительного процесса служит окислительно-восстановительный потенциал Eh среды. Его изменения представлены на рис. 5.

На первоначальном частичном этапе экспериментального цикла, соответствующем 5 месяцам, проведена оценка накопительной (суммарной) концентрации элементов цветных металлов и железа (рис. 6) На этом этапе рост концентраций имеют закономерности, близкие к линейным. В колонне с подачей пероксида водорода с концентрацией 10% в течение 5 дней концентрации ионов цветных металлов наращивались до содержания соответственно Cu, Ni, Co — 0,10; 0,07; 0,04 мг/л, и этот уровень поддерживался в течение первого ме-

сяца, а затем концентрация снизилась практически в два раза до значений соответственно 0,04; 0,03; 0,02 мг/л, которые сохранялись на протяжении всего последующего периода эксперимента. В колоннах с низкими исходными концентрациями пероксида водорода (3% и 0,5%) после постепенного набора концентрации ионов металлов Cu, Ni, Co в растворе до значений 0,04; 0,03; 0,02 мг/л соответственно она остается стабильной практически на всех уровнях отбора проб по высоте колонны. Характер перехода в раствор кобальта имеет отличительную особенность в задержке перехода в раствор на начальном этапе почти до 15—18 сут. В дальнейшем, в течение 5—7 дней, отмечен интенсивный прирост концентраций до 0,04 мг/л, и после этого уровень прироста оставался стабильным.

Представляют интерес закономерности накопительного характера концентрации ионов цветных металлов в растворе. В совокупный период эксперимента тренд прироста концентрации ионов цветных металлов можно считать стабильным, даже с учетом вероятного переосаждения солей металлов по ходу фильтрационного движения. Образование поверхностной кристаллизационной структуры на испарительном барьере в течение периода первых 30—80 сут представлен только гипсом (см. рис. 1), что косвенно подтверждает процесс окисления сульфидов до сульфатов с формированием гипса [23]. Только в конце четвертого месяца экспериментального периода уже на поверхности кристаллического гипса начинают кристаллизоваться сульфаты цветных металлов.

Сравнительная характеристика изменения накопительной концентрации металлов в растворе с пероксидом водорода и только с бактериями (за счет подачи питательной среды) во времени представлена на рис. 6.

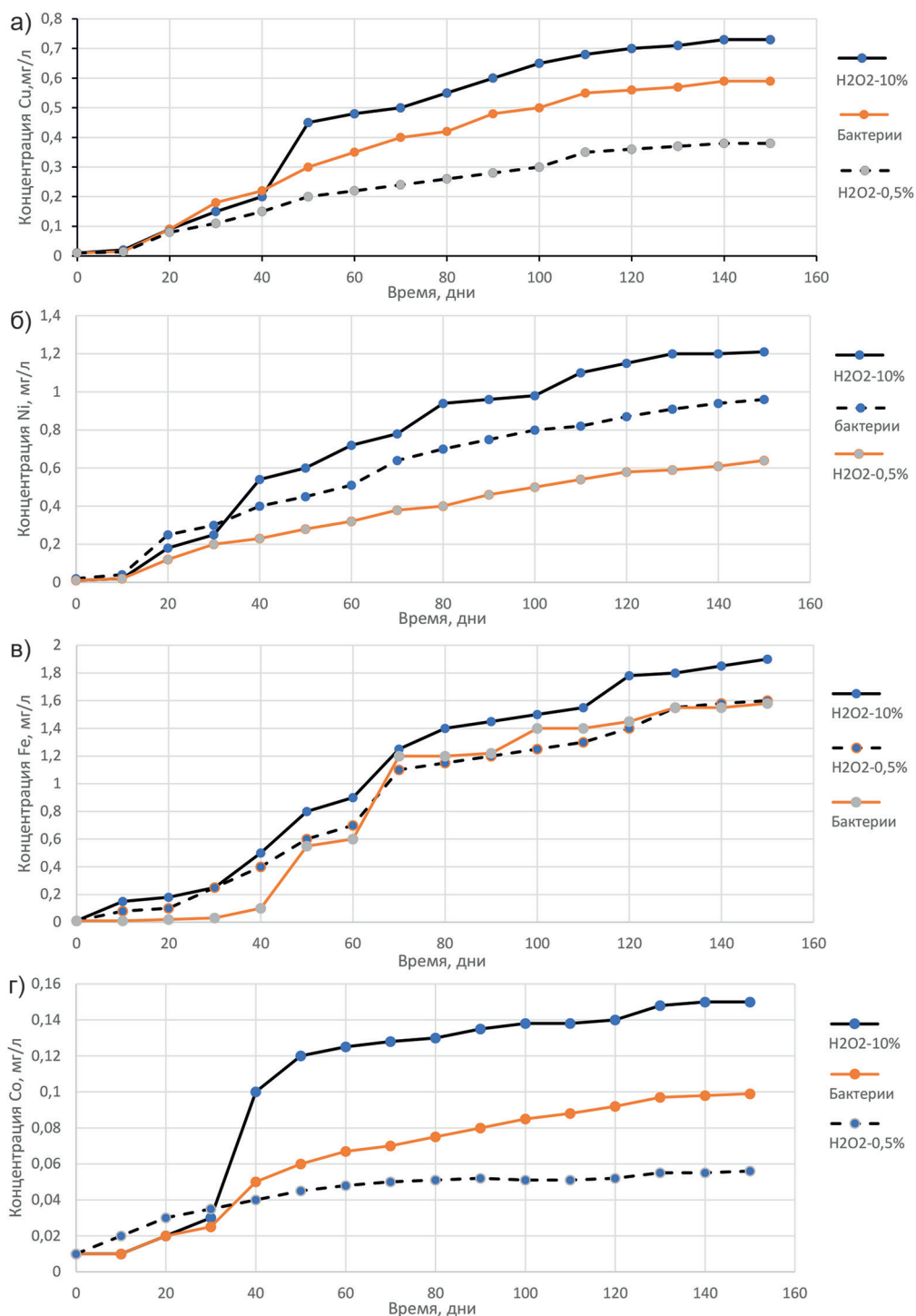


Рис. 6. Изменение концентрации Cu (а), Ni (б), Fe (в) и Co (г) в растворах (средний уровень) во времени
 Fig. 6. Change in the concentration of Cu (a), Ni (b), Fe (c) and Co (d) in solutions (average level) over time

Сопоставление динамики выщелачивания в колоннах с подачей 0,5% и 3% пероксида водорода и в колонне с подачей питания для культивирования бактерий показывает достаточно близкую результативность. Из этого можно сделать предположение, что для стимулирования биоокисления сульфидов может быть достаточной только подача питания автохтонной микрофлоры, без внесения селективно выделенных и культивированных в реакторе бактерий. Такой результат может представляться достаточно важным для выработки вариантов технологических решений этапов подготовки техногенных массивов.

Визуализация процесса окисления сульфидов в массиве при восходящем капиллярном подъеме растворов представлена в виде высолов на поверхностях колонн. Практически на всех поверхностях колонн появились первые высолы (гипса) в период с 30-го дня от начала экспериментов.

Заключение

Фильтрационный массоперенос цветных металлов и их концентрирование посредством переотложения на разных уровнях массива в экспериментальных колоннах при миграции с восходящим фильтрационным потоком зависит от ряда взаимосвязанных факторов; прежде всего это рН, окислительно-восстановительный потенциал среды и направленная фильтрация растворов в массиве. Процессы выщелачивания, перехода в раствор, относительно постоянные концентрации ионов металлов, кристаллизационное осаждение представляют собой гипергенные преобразования вещественной и структурной основы массива. Детальную картину вещественного преобразования сульфидов металлов в техногенных массивах еще предстоит проанализировать. На данный момент можно констатировать уровень стабильной ин-

тенсивности процессов преобразования при условиях стимулирования окислительных процессов сульфидных минералов цветных металлов, в том числе с участием микрофлоры.

Экспериментально сопоставлена роль автохтонных микроорганизмов в выщелачивании цветных металлов флотационных отходов в режиме *in situ*. Подтверждено активное участие автохтонной микрофлоры в фильтрационном окислительном выщелачивании, когда минеральное сырье выступает как единственный субстрат роста для микроорганизмов. Следует отметить, что хотя неоптимальный уровень кислотности среды для рода бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*, близкий к нейтральному, и снижает активность окисления, но положительным фактом является то, что процесс остается на всем протяжении экспериментального цикла весьма стабильным, и это важно, поскольку временной фактор не является основным.

Проведена оценка влияния режима стимулирования роста микрофлоры и экспериментально подтверждена возможность интенсификации разложения сульфидов, по уровню сопоставимой с окислением сульфидных минералов пероксидом водорода.

Установлено, что на скорость прироста аборигенных микроорганизмов и, соответственно, интенсивность выщелачивания рудного сырья можно воздействовать путем подачи питательной среды.

По приведенным выше данным можно также заключить, что аборигенные бактерии вносят вклад в выщелачивание металлов из хвостов обогащения полиметаллической руды, сопоставимый с окислительными свойствами 3%-го пероксида водорода. В целом, полученные в настоящий момент данные по проводимым исследованиям означают, что вещественное преобразование хвостов

обогащения сульфидных руд и подобных объектов можно интенсифицировать, используя технологические приемы, та-

кие как введение в массив окислителей, и путем стимулирования роста аборигенной микрофлоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юркевич Н. В., Ельцов И. Н., Гуреев В. Н., Мазов Н. А., Юркевич Н. В., Еделев А. В. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 12. — С. 230–249.
2. Calvo G., Mudd G., Valero A., Valero A. Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? // Resources. 2016, vol. 5, article 36. DOI: 10.3390/resources5040036.
3. Макаров Д. В., Семенова Е. П., Зоренко И. В., Меньшиков Ю. П. Исследование возможности использования хвостов обогащения вермикулитовых руд как сырья для получения соединений магния // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12. — № 1. — С. 97–100.
4. Latyuk E., Goryachev A., Makarov D. Processing of alluvial deposit sands with a high content of copper and nickel using combined enrichment technology // Metals. 2023, vol. 13, no. 8, article 1493.
5. Голик В. И., Титова А. В., Титов Г. И. К утилизации хвостов обогащения руд цветных металлов // Горная промышленность. — 2023. — № 5. — С. 96–101. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5-96-101.
6. Schoenberger E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities // Resources Policy. 2016, vol. 49, pp. 119–128. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.04.009.
7. Päivi H., Kinnunen M., Kaksonen A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 228, pp. 153–160. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.171.
8. Johnson D. B., Grail B. M., Hallberg K. B. A new direction for biomining: Extraction of metals by reductive dissolution of oxidized ores // Minerals. 2013, vol. 3, no. 1, pp. 49–58. DOI: 10.3390/min3010049.
9. Falagán C., Grail B. M., Johnson D. B. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings // Minerals Engineering. 2017, vol. 106, pp. 71–78. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.10.008.
10. Валиев Н. Г., Разоренов Ю. И., Голик В. И., Лебзин М. С. Комбинирование технологий выщелачивания с традиционными технологиями горного передела руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 4. — С. 33–43. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.
11. Vardanyan N., Sevoyan G., Navasardyan T., Vardanyan A. Recovery of valuable metals from polymetallic mine tailings by natural microbial consortium // Environmental Technology. 2019, vol. 40, no. 26, pp. 3467–3472. DOI: 10.1080/09593330.2018.1478454.
12. Василькова А. О., Бывальцев А. В., Хмельницкая О. Д., Войлошников Г. И. Разработка технологии извлечения золота из хвостов обогащения полиметаллических руд // Polytech Journal. — 2024. — № 1. — С. 139–148.
13. Размахнин К. К., Василюк П. А. Технологическо-экологические особенности кучного выщелачивания золотосодержащих руд «Дельмачикского» месторождения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 234–238. DOI: 10.15372/FPVGN2020070136.
14. Василькова А. О., Васильков Н. В., Хмельницкая О. Д., Войлошников Г. И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья // Polytech Journal. — 2021. — № 1. — С. 97–107.
15. Сачков В. И., Луцаева И. В., Дайбова Е. Б., Медведев Р. О., Сусид М. В. Биовыщелачивание золота из отходов горнодобывающей промышленности // Вестник Томского государственного университета. Химия. — 2025. — № 37. — С. 84–99. DOI: 10.17223/24135542/37/6.
16. Mikhailov A. G., Vashlaev I. I., Kharitonova M. Yu., Gurevich Yu. L., Usmanova N. F. Fluid mass-exchange process in the near-surface zone of massif // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2025, vol. 20, pp. 73–81. DOI: 10.37394/232013.2025.20.8.
17. Karacharov A. A., Borisov R. V., Mikhlin Y. L., Likhatsk M. N., Teremova M. I., Gurevich Yu. L. The study of bacterial leaching of synthetic valleriite-containing materials // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2023, vol. 16, no. 2, pp. 300–311.

18. Kaksonen A. H., Deng X., Bohu T., Zea L., Khaleque H. N., Gumulya Y., Cheng K. Y. Prospective directions for biohydro-metallurgy // *Hydrometallurgy*. 2020, vol. 195, article 105376.
19. Mäkinen J., Heikola T., Salo M., Kinnunen P. The effects of milling and pH on Co, Ni, Zn and Cu bioleaching from polymetallic sulfide concentrate // *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 3, article 317.
20. Roberto F. F., Schippers A. Progress in bioleaching: Part B, applications of microbial process by the mineral industries // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2022, vol. 106, pp. 5913–5928.
21. Rouchalova D., Rouchalova K., Janakova I., Cablik V., Janstova S. Bioleaching of iron, copper, lead, zinc from the slud mining sediment at different particle sizes, pH, and pulp density using acidithiobacillus ferrooxidans // *Minerals*. 2020, vol. 10, article 1013.
22. Калашникова О. Б., Кашевский А. В., Варданян Н. С., Эрдэнэчимэг Д., Жданова Г. О., Топчий И. А., Пономарева О. Н., Вятчина О. Ф., Стом Д. И. Ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы: перспективы применения в биогидрометаллургии и микробных топливных элементах // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. — 2021. — № 11(1). — С. 34–52. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-1-34-52.
23. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review // *Chemical Engineering Journal*. 2023, vol. 457, pp. 141–197. **PIAB**

REFERENCES

1. Yurkevich N. V., Yeltsov I. N., Gureev V. N., Mazov N. A., Yurkevich N. V., Edelev A. V. Technogenic impact on the environment in the Russian Arctic: the example of the Norilsk industrial region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 12, pp. 230–249. [In Russ].
2. Calvo G., Mudd G., Valero A., Valero A. Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? *Resources*. 2016, vol. 5, article 36. DOI: 10.3390/resources5040036.
3. Makarov D. V., Semenova E. P., Zorenko I. V., Menshikov Yu. P. Study of the possibility of using vermiculite ore beneficiation tailings as raw material for producing magnesium compounds. *Vestnik of MSTU*. 2009, vol. 12, no. 1, pp. 97–100. [In Russ].
4. Latyuk E., Goryachev A., Makarov D. Processing of alluvial deposit sands with a high content of copper and nickel using combined enrichment technology. *Metals*. 2023, vol. 13, no. 8, article 1493.
5. Golik V. I., Titova A. V., Titov G. I. On the utilization of tailings from the enrichment of non-ferrous metal ores. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 5, pp. 96–101. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5-96-101.
6. Schoenberger E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. *Resources Policy*. 2016, vol. 49, pp. 119–128. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.04.009.
7. Päivi H., Kinnunen M., Kaksonen A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 228, pp. 153–160. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.171.
8. Johnson D. B., Grail B. M., Hallberg K. B. A new direction for biomining: Extraction of metals by reductive dissolution of oxidized ores. *Minerals*. 2013, vol. 3, no. 1, pp. 49–58. DOI: 10.3390/min3010049.
9. Falagán C., Grail B. M., Johnson D. B. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 106, pp. 71–78. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.10.008.
10. Valiev N. G. O., Razorenov Yu. I., Golik V. I., Lebzin M. S. Combination of leaching technologies with conventional ore processing techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 4, pp. 33–43. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.
11. Vardanyan N., Sevoyan G., Navasardyan T., Vardanyan A. Recovery of valuable metals from polymetallic mine tailings by natural microbial consortium. *Environmental Technology*. 2019, vol. 40, no. 26, pp. 3467–3472. DOI: 10.1080/09593330.2018.1478454.
12. Vasilkova A. O., Byval'tsev A. V., Khmel'nitskaya O. D., Voiloshnikov G. I. Development of a technology for gold extraction from polymetallic ore processing tailings. *Polytech Journal*. 2024, no. 1, pp. 139–148. [In Russ].
13. Razmakhnin K. K., Vasilyuk P. A. Technological and environmental features of heap leaching of gold-bearing ores of the Delmachik deposit. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2020, vol. 7, no. 1, pp. 234–238. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN2020070136.

14. Vasilkova A. O., Vasilkov N. V., Khmelnitskaya O. D., Voiloshnikov G. I. Analysis of the current state of methods for processing technogenic gold-bearing raw materials. *Polytech Journal*. 2021, no. 1, pp. 97–107. [In Russ].
15. Sachkov V. I., Lushchaeva I. V., Daibova E. B., Medvedev R. O., Susid M. V. Bioleaching of gold from mining waste. *Tomsk state university journal of chemistry*. 2025, no. 37, pp. 84–99. [In Russ]. DOI: 10.17223/24135542/37/6.
16. Mikhailov A. G., Vashlaev I. I., Kharitonova M. Yu., Gurevich Yu. L., Usmanova N. F. Fluid mass-exchange process in the near-surface zone of massif. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*. 2025, vol. 20, pp. 73–81. DOI: 10.37394/232013.2025.20.8.
17. Karacharov A. A., Borisov R. V., Mikhlin Y. L., Likhatsk M. N., Teremova M. I., Gurevich Yu. L. The study of bacterial leaching of synthetic valleriite-containing materials. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2023, vol. 16, no. 2, pp. 300–311.
18. Kaksonen A. H., Deng X., Bohu T., Zea L., Khaleque H. N., Gumulya Y., Cheng K. Y. Prospective directions for biohydro-metallurgy. *Hydrometallurgy*. 2020, vol. 195, article 105376.
19. Mäkinen J., Heikola T., Salo M., Kinnunen P. The effects of milling and pH on Co, Ni, Zn and Cu bioleaching from polymetallic sulfide concentrate. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 3, article 317.
20. Roberto F. F., Schippers A. Progress in bioleaching: Part B, applications of microbial process by the mineral industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2022, vol. 106, pp. 5913–5928.
21. Rouchalova D., Rouchalova K., Janakova I., Cablik V., Janstova S. Bioleaching of iron, copper, lead, zinc from the slud mining sediment at different particle sizes, pH, and pulp density using acidithiobacillus ferrooxidans. *Minerals*. 2020, vol. 10, article 1013.
22. Kalashnikova O. B., Kashevsky A. V., Vardanyan N. S., Erdenechimeg D., Zhdanova G. O., Topchiy I. A., Ponamoreva O. N., Vyatchina O. F., Stom D. I. Acidophilic chemolithotrophic microorganisms: prospects for application in biohydrometallurgy and microbial fuel cells. News of universities. *Proceedings of Universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2021, no. 11(1), pp. 34–52. [In Russ]. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-1-34-52.
23. Ju J., Feng Y., Li H., Xu C., Xue Z., Wang B. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*. 2023, vol. 457, pp. 141–197.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гуревич Юрий Леонидович¹ — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, e-mail: btchem@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0250-845X,

Михайлов Александр Геннадьевич^{1,2} — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, e-mail: mag@icct.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5537-7479,

Усманова Наталья Фергатовна² — к-т техн. наук,
научный сотрудник, Сибирский федеральный университет,
e-mail: usman@icct.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0430-535X,

Теремова Маргарита Ивановна¹ — ведущий технолог,
e-mail: mterem@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5982-2960,

Зуев Алексей Евгеньевич¹ — ведущий инженер,
e-mail: alex_corp85@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0912-4395,

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Красноярский научный центр
Сибирского отделения РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН),

² Институт химии и химической технологии СО РАН —
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН.

Для контактов: Михайлов А.Г., e-mail: mag@icct.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Yu.L. Gurevich*¹, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher,
e-mail: btchem@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0250-845X,

A.G. Mikhailov^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher,
e-mail: mag@icct.ru, ORCID ID: 0000-0001-5537-7479,

*N.F. Usmanova*², Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia,
e-mail: usman@icct.ru, ORCID ID: 0000-0002-0430-535X,

*M.I. Teremova*¹, Leading Technologist,
e-mail: mterem@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5982-2960,

*A.E. Zuev*¹, Leading Engineer,
e-mail: alex_corp85@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0912-4395,

¹ Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center
of the Siberian Branch of the RAS (FRC KSC SB RAS), 660036, Krasnoyarsk, Russia,

² Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS –
a separate division of FRC KSC SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia.

Corresponding author: A.G. Mikhailov, e-mail: mag@icct.ru.

Получена редакцией 04.03.2026; получена после рецензии 27.04.2026; принята к печати 10.09.2026.

Received by the editors 04.03.2026; received after the review 27.04.2026; accepted for printing 10.09.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ

(специальный выпуск), смотри на www.gornaya-kniga.ru

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАЗРАБОТКИ

(2026, № 5, СБ 17, 32 с.)

Дробаденко В. П., Дьяченко Е. Н., Чеснова Е. С., Салахова К. Н., Гончаров Я. А. Повышение извлечения благородных металлов из бедных руд на основе активации эрлифтного перемешивания многофазных сред.

Кадыргулов Р. Р., Вильмис А. Л., Боровков Ю. А., Франтов А. Е., Салахов И. Н. Исследование влияния рельефа поверхности на напряженно-деформированное состояние массива многолетнемерзлых горных пород.

INTENSIFICATION OF HYDROMETALLURGICAL PROCESSES AND GEOMECHANICAL SUPPORT OF DEVELOPMENT

Drobadenko V. P., Dyachenko E. N., Chesnova E. S., Salakhova K. N., Goncharov Ya. A. Enhanced extraction of precious metals from poor ores based on activation of airlift mixing of multiphase media.

Kadyrgulov R. R., Vilms A. L., Borovkov Yu. A., Frantov A. E., Salakhov I. N. Investigation of the influence of surface relief on the stress-strain state of permafrost rocks.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

(2026, № 5, СБ 18, 36 с.)

Савич О. И., Мельник В. В. Скважинная гидродобыча в условиях Крайнего Севера.

Савич И. Н., Савич А. О., Козлова О. Ю., Агафонов В. В. Обоснование параметров подэтажного торцевого выпуска кимберлитовых руд.

DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATION OF MINING FACILITIES

Savich O. I., Melnik V. V. Borehole hydraulic extraction in the Far North.

Savich I. N., Savich A. O., Kozlova O. Yu., Agafonov V. V. Substantiation of the parameters of the sub-story end discharge of kimberlite ores.