ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(1):127-145
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.271.7:622.015:624.954 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_127

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОГО СТРОЕНИЯ РУДНОГО ШТАБЕЛЯ НА ЕГО ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ЗОЛОТА В ХОЛОДНОМ КЛИМАТЕ

М.В. Каймонов[1], Н.Д. Прудецкий[1], Л.Л. Федорова[1], И.И. Саввинов[1]

[1] Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН (ИГДС СО РАН), Якутск, Россия, e-mail: gtf@igds.ysn.ru

Аннотация: Исследование строения рудного штабеля геофизическими методами проводилось на полигоне кучного выщелачивания месторождения «Северное» в Якутии с ноября 2022 по июль 2024 гг. Зимой применялись георадиолокация и бесконтактное измерение электрического поля, летом – георадиолокация и электротомография. Эти методы позволяют определить электрофизические свойства пород и зоны насыщения раствором. Компьютерное моделирование теплового режима штабеля в программном комплексе Frost 3D учитывало неоднородное строение. Полевые исследования рудного штабеля в разные сезоны и при различных режимах орошения показали, что комплексное использование георадиолокации и электротомографии обеспечивает точное описание его сложного строения и состояния. В штабеле формируются зоны переуплотнения и негабаритов с пустотами, где меняется направление фильтрационных потоков. Расчеты показали, что для сохранения положительных температур в рудном штабеле температура растворов должна быть не ниже +3 °С, а скорость фильтрации зимой не ниже 0,5 м/сут. Теплоизоляция рудного штабеля поддерживает положительную температуру. Уплотненные зоны с низкой фильтрацией замедляют выравнивание температуры на 3–6 месяцев. Повышение температуры увеличивает их проницаемость, меняя общий поток фильтрации. Породы под такими зонами исключаются из равномерного орошения и выщелачивания на 3–4 месяца и более. Уплотненные зоны существенно влияют на температурный режим рудного штабеля, особенно в нижнем ярусе.

Ключевые слова: золото, кучное выщелачивание, криолитозона, рудный штабель, неоднородное строение, геофизические методы исследования, георадиолокация, тепловой режим, компьютерное 3D-моделирование.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код (шифр темы) FWRS-2026-0054, регистрационный номер № 1025031700052-4-1.5.1), FWRS-2025-0047 регистрационный номер № 1025041400027-4..

Для цитирования: *Каймонов М. В., Прудецкий Н. Д., Федорова Л. Л., Саввинов И. И.* Исследование влияния неоднородного строения рудного шта-беля на его тепловой режим при кучном выщелачивании золота в холодном климате // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 1. – С. 127–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_127.

Effect of structural nonuniformity of ore pile on its thermal behavior in heap gold leaching in cold climate

M.V. Kaimonov[1], N.D. Prudetskii[1], L.L. Fedorova[1], I.I. Savvinov[1]

[1] Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» N.V. Chersky Institute of Northern Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, e-mail: gtf@igds.ysn.ru

Abstract: The geophysical investigation of an ore pile was carried out on a test site of heap leaching at the Severnoe deposit in Yakutia in November 2022 through July 2024. The investigation involved ground penetrating radar and non-contact electric field measurement in winter and GPR and electrical resistivity tomography in summer. These methods enable determining electrophysical properties of rocks and detecting zones saturated with leaching solution. Computer modeling of the thermal behavior of the test ore pile in Frost 3D took into account its nonuniform structure. The on-site research of the test ore pile in different seasons and under different mode of irrigation showed that the integrated application of GPR and electrical resistivity tomography provided an accurate description of the complex structure and condition of the pile. In the pile, the zones of overcompaction and oversize with voids form, where the flow direction of the leaching solution changes. The calculations show that maintenance of positive temperatures in the ore pile needs that the temperature of the solutions is not lower than +3 °C and the percolation rate in winter is not lower than 0.5 m/day. Heat-insulation of the ore pile ensures maintenance of its positive temperature. The compacted zones with the low percolation rate slow down the temperature equalization by 3–6 months. An increase in the temperature increases permeability of the zones and changes the overall percolation flow. Rocks under such zones are excluded from uniform irrigation and leaching for 3–4 months and longer. The compacted zones have an essential effect on the thermal behavior of the ore pile, especially in its bottom layer.

Key words: gold, heap leaching, permafrost area, ore pile, nonuniform structure, geophysical investigations, ground penetrating radar, thermal behavior, 3D computer modeling.

Acknowledgements: The study was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (code (subject code) FWRS-2026-0054, registration number No. 1025031700052-4-1.5.1), FWRS-2025-0047 registration number No. 1025041400027-4.

For citation: Kaimonov M. V., Prudetskii N. D., Fedorova L. L., Savvinov I. I. Effect of structural nonuniformity of ore pile on its thermal behavior in heap gold leaching in cold climate. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(1):127-145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_127.

Введение

Северные и северо-восточные территории Российской Федерации обладают значительным потенциалом в плане минерально-сырьевых ресурсов, что подтверждается обширными геологическими данными и результатами геологоразведочных работ.

Однако их освоение сопряжено с рядом серьезных технических и экономических вызовов, обусловленных экстремальными природно-климатическими условиями, труднодоступностью месторождений и необходимостью внедрения инновационных технологий для обеспечения эффективной и экологически

безопасной добычи. В работах Н.С. Батугиной и соавт. [1, 2] проведен анализ ресурсов золота в северо-восточной части Якутии, включая рудные и россыпные месторождения. Рассмотрены сложности разработки, включая удаленность и слабо развитую инфраструктуру. Особенности месторождений: небольшие и средние запасы с высоким содержанием золота, имеющие достаточный сырьевой потенциал для производства более 20 т золота в год.

За последние три десятилетия в России было запущено несколько десятков промышленных объектов, предназначенных для кучного выщелачивания (КВ) золотосодержащих руд. Этот метод переработки сырья требует меньших производственных издержек, чем другие [3, 4]. Технологическим вопросам цианирования металлов посвящена достаточно обширная литература, подробно представлены наиболее важные проблемы, с которыми в настоящее время сталкивается отрасль. В исследовании Л.В. Шумиловой и соавт. [5] проанализирован опыт организации КВ в районах с холодным климатом: Аляска, западные районы США, Канада, Казахстан и Россия. Отмечены недостатки разработанных отечественных мобильных установок и оценена возможность создания передвижных установок КВ для круглогодичного использования технологии, в том числе в криолитозоне. Представлены результаты, полученные при изучении вещественного состава объекта исследований — техногенных золотосодержащих россыпей Забайкалья. В работе Д. Медина и К. Андерсона [6] представлен подробный обзор гидрометаллургических процессов, которые в настоящее время существуют в горнодобывающей промышленности для переработки серебряных, медных и золотых руд, а также для переработки концентратов. В статье Ю. Горбани и соавт. [7] рассматриваются основные факторы, которые определяют выбор КВ в качестве технологии добычи металлов, описываются проблемы использования этих инноваций. В работе М. Мелладо и соавт. [8] представлен анализ аналитических кинетических моделей для КВ с использованием анализа неопределенности и глобальной чувствительности, что, по мнению авторов, позволяет определять рабочие области для КВ. В статье Х. Ордоньеса и соавт. [9] рассматривается процесс КВ калиевой руды. При этом штабель моделируется как многокомпонентная система с распределением частиц по размерам. Руда в штабеле представлена как два водорастворимых вещества, которые обладают разной растворимостью и скоростью растворения. Когда наиболее растворимое вещество расходуется, частица разрушается, оставляя после себя часть менее растворимого вещества вместе с нерастворимым материалом. Менее растворимое вещество теперь растворяется из разрушенного материала. В этой статье также представлена экспериментальная проверка концептуальной модели с использованием данных, полученных в ходе испытаний по выщелачиванию в колонне, проведенных с этой целью, с акцентом на растворении двух водорастворимых веществ: нитрата и магния. В работе С. Робертсона и соавт. [10] на основе испытания большого количества образцов руды, рассматриваемых для КВ, проведен анализ взаимосвязей между гидрологией и физическими свойствами руды. Определены основные свойства, регулирующие протекание раствора через измельченную руду при КВ. В статье М.А. Маринина и соавт. [11] представлены результаты исследования факторов, определяющих формирование и изменение фильтрационных свойств штабеля КВ, сформированного из гранулированных бед-

ных песчано-глинистых руд. Показано построение и применение численной модели процессов фильтрации в гранулированных рудах на основе лабораторных экспериментов. Несмотря на это, научные исследования, посвященные влиянию технологии формирования штабелей на их неоднородную структуру и, как следствие, анизотропное проникновение рабочих растворов в тело штабеля, практически отсутствуют.

Другим недостатком технологии КВ золота, используемой в настоящее время в регионах холодного климата, является весьма скудный набор активных средств, позволяющих контролировать теплообмен внутри рудного штабеля (РШ) при низких температурах атмосферного воздуха и горных пород [12, 13]. В таких условиях снижается скорость растворения металлов и скорость миграции растворов, содержащих металлы. Поэтому необходимо разработать технические решения, которые позволят не только снизить влияние низких температур горных пород на процесс извлечения золота, но и продлить сезон работы до круглогодичного. В исследовании С.М. Татаринова и соавт. [14] приведены результаты эксплуатации установки КВ ОАО «Селигдар», которые показывают, что эффективная работа в холодный период достигается утеплением самотечных магистралей минеральной ватой, использованием эмиттерной оросительной системы внутри РШ и специальных методов подготовки цианистых растворов. В статье В.Н. Ковалева и соавт. [15] рассмотрены вопросы КВ золота в зонах вечной мерзлоты: расчет толщины теплоизолирующего слоя РШ, определение теплового потока для всесезонного выщелачивания и выбор оптимальной крупности материала.

В публикации [16] рассматривается влияние различных погодных факторов на тепловой режим РШ при КВ золота и обосновываются методы теплоизоляции бортов штабеля, в том числе при его многоярусной компоновке. В работах Д. Макбрайд и соавт. [17, 18] рассматриваются вопросы компьютерного моделирования и исследуется трехмерный гетерогенный РШ, состоящий из смеси крупной и мелкой руды, при нетепловых реакциях и отрицательных температурах. Результаты показывают, как холодная погода влияет на выщелачивание, изменяя гидродинамику РШ [17]. В исследовании [18] представлена комплексная трехмерная гидродинамическая модель CFD для растворения халькопирита в условиях кислотного выщелачивания. Модель параметризована на основе экспериментальных данных и проверена серией испытаний на выщелачивание при разных температурах. Трехмерный «виртуальный» РШ моделируется при различных метеорологических условиях. Исследуется непрерывное и прерывистое орошение, что позволяет оценить извлечение меди на единицу объема промывочного раствора. Показано, что для импульсного орошения требуется увеличенный объем раствора. В работе И. Мискольци [19] представлен усовершенствованный метод для прогнозирования времени достижения пассивного управления водными ресурсами при КВ. Метод сочетает численное моделирование ненасыщенного потока и аналитическое моделирование. Для учета нелинейности потока определяется единичная скорость для каждой области с помощью конечно-элементного моделирования, учитывающего физические и гидравлические свойства материала. Геометрия РШ дискретизируется на области одинаковой высоты, для которых вычисляются кривые стока. Объемы стока из каждой области собираются во временной ряд с учетом графика орошения и закрытия объекта.

Модель может учитывать рециркуляцию, улучшенные методы испарения, обработку и сброс дренажных растворов, а также снижение инфильтрации. Дан пример применения метода на руднике в Аргентине, где учтены водный баланс закрытия и параметры моделирования. Модель может быть реализована для любого климата — от холодного засушливого до влажного и очень влажного, с включением соответствующих предположений управления поверхностными водами во входные данные. Такая гибкость допускается тем фактом, что сток и чистая фильтрация рассматриваются как отдельные независимые члены в водном балансе.

Этот факт также является одним из ограничений модели, где прямое влияние осадков на влажность РШ не может быть оценено.

В работе А.В. Баянова [20] приводится исследование по группировке технологических мероприятий и инженерных идей для эффективного КВ в условиях отрицательных температур. В публикации Д. Уинтертон и А. Мартин [21] обобщаются некоторые ключевые проблемы, возникшие на этапе наращивания мощности, и извлеченные уроки. Обсуждаются конкретные и уникальные проблемы в цикле дробление–укладка–выщелачивание на площадке, возникающие при работе в холодную погоду, а также предложения по их учету в будущих операциях в холодную погоду.

Таким образом, продление промышленного сезона, разработка новых и улучшение существующих технологий управления тепловым режимом РШ для активизации процесса выщелачивания является актуальной задачей, для решения которой в первую очередь необходимо разработать 3D-модели РШ, трехмерную математическую модель процессов тепломассопереноса, с учетом не только климатических факторов, но и этапов формирования штабелей и продвижения фронта работ (орошения).

Георадиолокационное исследование строения РШ

Георадиолокационные методы исследования структур криогенных массивов горных пород естественного и техногенного происхождения получили широкое распространение в современных геолого-геофизических изысканиях. Эти методы позволяют с высокой точностью выявлять и анализировать морфологические и текстурные характеристики мерзлых грунтов, а также прогнозировать их инженерно-геологические свойства. Георадарное зондирование основывается на использовании высокочастотных электромагнитных волн, которые проникают в исследуемую среду и отражаются от границ различных по физическим свойствам слоев. Этот подход позволяет создавать детальные георадарные профили, что значительно повышает эффективность диагностики состояния мерзлых пород и их устойчивость к внешним воздействиям. В результате применения георадиолокации удается не только идентифицировать криогенные структуры, но и оценить их пространственную конфигурацию, что имеет важное значение для решения задач в области инженерной геологии, мерзлотоведения и строительства в условиях вечной мерзлоты. В работе А. Риболини и соавт. [22] представлены результаты георадарного обследования, проведенного на формах альпийского рельефа, представляющих сходство с геоморфологической точки зрения: пронивальный вал, проталусный каменный ледник и морена. Двумерные радиолокационные профили обеспечивают визуализацию внутренней структуры этих форм рельефа, позволяя формулировать гипотезы о процессах осадконакопления, которые привели к их формированию.

В пронивальном валу вогнутые вверх и курганообразные радиолокационные отражения соответствуют наличию хребта/вала у основания постоянного снежного пятна. Холмообразные, плоские или противосклонные отражатели отображают существование стратиграфических слоев, покрывающих стороны хребта и заполняющих впадину между ним и осыпью вверх по склону или отступающим фронтом снежника. В статье И. Сантина и соавт. [23] представлены исследования, которые объединили различные методы: георадар, геоморфологические и фотограмметрические данные, чтобы охарактеризовать ледниковую и прогляциальную среду ледника Сфорцеллина (Центральные Альпы, Италия). Это позволило выявить участки образования и сохранения погребенного льда. На основе полученных результатов утверждается, что оценки расширения ледника, связанные только с поверхностной информацией, как в случае исключительного использования данных дистанционного зондирования и мониторинга выходящих на поверхность льдов, могут давать соответствующие недооценки. В работе К. Кабальски и соавт. [24] представлены исследования осадконакопления обломочных отложений в западной части Свентокшиских гор (юго-восточная Польша). Георадиолокационные исследования, интерпретация геологических скважин, обнажений, а также петрографический и кварцевый анализы были использованы в палеогеографических реконструкциях. Несколько слоев (мощность до 12 м) мелкообломочных известняковых отложений с примесью песка в песчаной серии толщиной 30 м были задокументированы под поверхностью речной равнины. Общий объем мусора оценивается в 5 350 000 м^3. Пусковым механизмом для селевого потока было как таяние снега, так и таяние вечной мерзлоты. Данные исследования предлагается применить в других реконструкциях перигляциальных явлений в низких горах в ближнем предгорье Скандинавского ледникового щита.

Исследование строения РШ выполнялось в полевых условиях на полигоне КВ месторождения «Северное», которое расположено в Алданском районе Республики Саха (Якутия), с помощью комплексирования геофизических методов в период с ноября 2022 г. по июль 2024 г. Состав комплекса менялся в зависимости от сезонности проведения исследований. В зимнее время применялись методы георадиолокации и бесконтактное измерение электрического поля (БИЭП), в летнее время — методы георадиолокации и электротомографии (ЭТ).

Методы БИЭП и ЭТ позволяют получить информацию об электрофизических свойствах (кажущееся удельное электрическое сопротивление) горных пород РШ, характеризующих зоны распространения и относительного насыщения их выщелачивающим раствором [25]. Образующиеся зоны горных пород РШ, насыщенных раствором, характеризуются низкими значениями удельных электрических сопротивлений из-за высокой ее увлажненности, что является поисковым признаком. Зоны сухих или мерзлых горных пород (заполненные льдом) РШ, наоборот, на геоэлектрических разрезах выделяются высокими значениями сопротивлений [26].

Метод георадиолокации показывает высокую эффективность при изучении строения и пути миграции раствора по телу РШ [27].

Особенностью геофизических исследований горных пород РШ КВ является частое расположение профилей, при этом направление выбирается вкрест простирания потоку распространения и выходу раствора из тела РШ. Для исследования РШ применен георадар «ОКО-3»

Рис. 1. Исследования на участке георадаром «ОКО-3» с антенным блоком АБ-100 (100 МГц). Фото Н.Д. Прудецкого

Fig. 1. Research on the site using the OKO-3 georadar with the AB-100 antenna unit (100 MHz). Photo by N.D. Prudetskii

с антенными блоками АБ-100М3, АБ-250, АБДЛ-Тритон с центральными частотами 100, 250, 50 МГц соответственно (НПО «Логис-Геотех», Россия) (рис. 1).

Предел допускаемой относительной погрешности аппаратуры — 3%.

Методика георадиолокационных измерений на объекте исследований включает в себя: анализ имеющейся геологической и гидрологической информации, электрофизических свойств грунтов, топографического плана участка работ. Составляется чертеж участка работ с разбивкой профилей и их топографическая привязка.

Для проведения полевых измерений и сбора данных использован блок управления и обработки НПО «ЛогиС-Геотех» (Россия). В процессе измерения на экране, по ходу перемещения георадара, отображается радарограмма, на которой фиксируются линии осей синфазности георадиолокационных сигналов в виде черно-белых или цветных полос, а также возникающие при записи шумы и помехи. На радарограмме указывается расстояние, пройденное георадаром, глубина зондирования, время прохождения сигнала. После завершения измерения по выбранному профилю осуществляется сохранение радарограммы в памяти блока.

Выполнение электроразведочных наблюдений велось по методике электрического профилирования (ЭП) аппаратурой БИКС. При этом измерения выполняются вдоль профиля с постоянным разносом между питающими и прием-

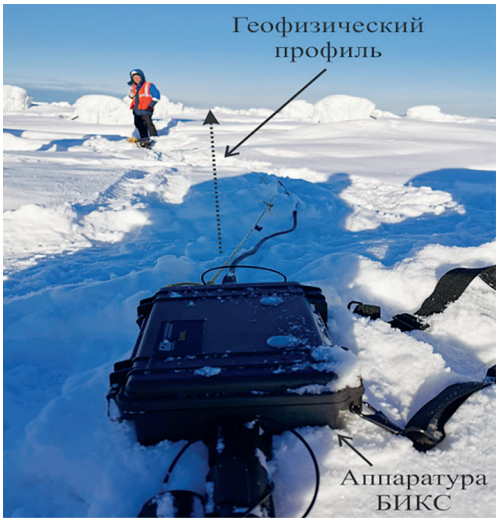

Рис. 2. Исследования на участке геофизической аппаратурой бесконтактного измерения электросопротивления (БИКС). Фото Н.Д. Прудецкого

Fig. 2. Research on the site using geophysical equipment for non-contact measurement of electrical resistance (BICS). Photo by N.D. Prudetskii

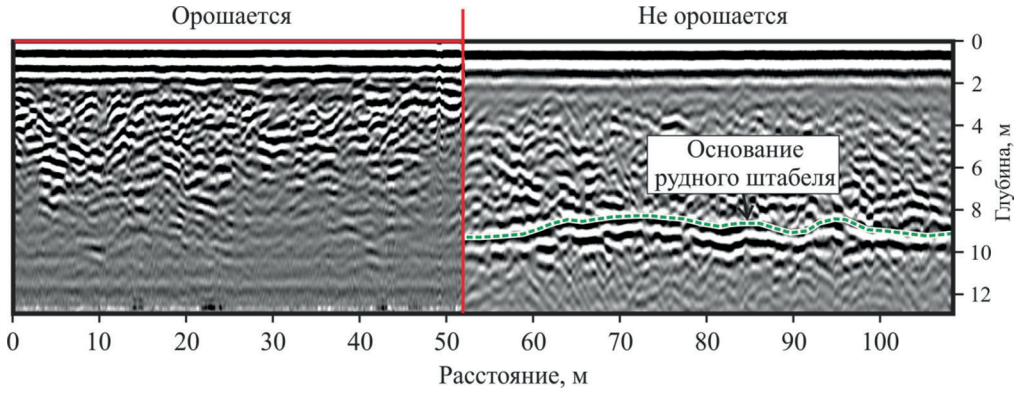

Рис. 3. Георадиолокационный разрез РШ Карты № 3 по профилю №10 (дата съемки: декабрь 2023 г.)
Fig. 3. Georadar section of RS Map No. 3 along profile No. 10 (date of shooting: December 2023)

ными линиями, которые определяют диапазон исследуемых глубин (рис. 2).

По результатам проведенной в декабре 2023 г. георадиолокации на РШ Карты № 3 выявлены участки (зоны) сигналов, характеризующиеся высокоамплитудными и контрастными сигналами отражения (рис. 3). Данный разрез получен по профилю № 10, часть которого не орошается раствором, и горные породы на данном отрезке находятся в «сухом» состоянии.

На рис. 4 представлен георадиолокационный разрез РШ Карты № 3 по профилю № 0 с другого края того же РШ. Этот участок полностью орошается раствором. На радарограмме показаны пунктирной красной линией некоторые пути миграции рабочих растворов в теле РШ на глубинах от 2 до 6 м. На глубине ниже 6 м сигналы уже не столь контрастны и волновое поле становится более равномерным (размытой серой окраски). Это свидетельствует о том, что в данной части РШ произошло затухание электромагнитных волн. Можно предположить, что на этом участке пропитывание раствором горных пород достаточно равномерное.

Данные бесконтактных наблюдений методом электроразведки по профилю БИКС-1Р РШ Карты № 2 и 3 представлены на рис. 5 (выделены цветом). При дальнейшей обработке и анализе они совмещены с радарограммой по этому же участку (волнистые линии на сером

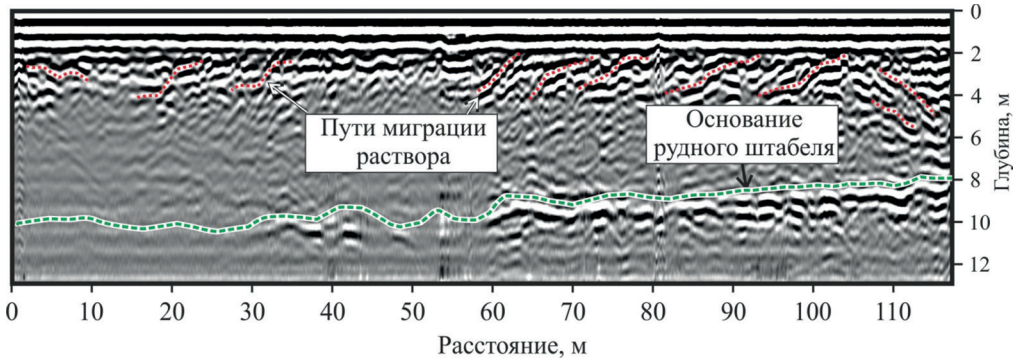

Рис. 4. Георадиолокационный разрез РШ Карты № 3 по профилю № 0 (дата съемки: декабрь 2023 г.)
Fig. 4. Georadar section of RS Map No. 3 along profile No. 0 (date of survey: December 2023)

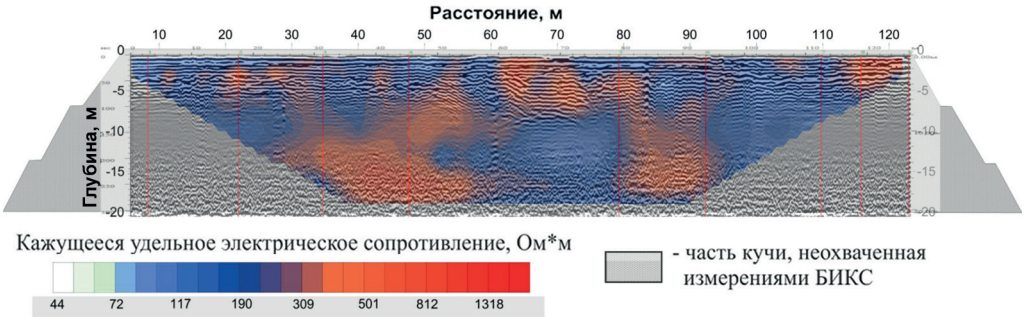

Рис. 5. Геоэлектрический разрез РШ Карты № 2 и 3 по профилю БИКС-1Р, совмещенный с георадиолокационным разрезом по этому же профилю (дата съемки: ноябрь 2022 г.)

Fig. 5. Geoelectric section of RS Maps No. 2 and 3 along the BICS-1R profile, combined with the ground penetrating radar section along the same profile (survey date: November 2022)

фоне). По электрическому сопротивлению на разрезе можно выделить следующие диапазоны (см. рис. 5):

- от 44 до 309 Ом·м — насыщенные рабочими растворами зоны РШ (синий цвет);
- от 309 до 1318 Ом·м — менее насыщенные рабочими растворами зоны РШ (оранжево-красный цвет).

Установленные значения электрического сопротивления показывают, что породы, слагающие РШ, находятся в талом состоянии. Геоэлектрический разрез РШ выщелачивания имеет достаточно неравномерное распределение влажности. Менее насыщенные зоны наблюдаются от поверхности РШ и имеют падения по направлению к ее основанию, при этом образуют собой целые блоки (обозначены оранжево-красным цветом на рис. 5). В то же время дать количественную оценку насыщенности горной породы рабочими растворами на данный момент невозможно, так же как и утверждать, что менее насыщенные зоны недостаточно орошаются растворами. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

По результатам проведенной с 1 по 8 июля 2024 г. георадиолокации на РШ Карты № 4 также выявлены зоны его неоднородного строения. На рис. 6 приведен пример отображения комплексного геофизического разреза РШ Карты № 4 по профилю № 2. По данным георадиолокации выявлены пути миграции

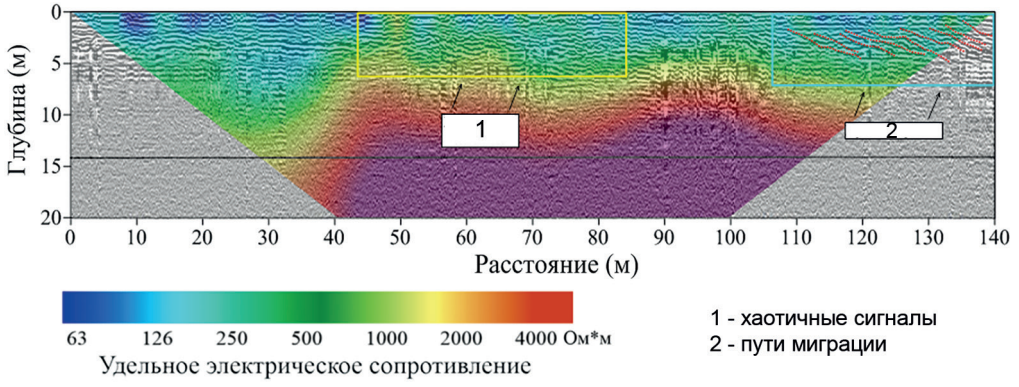

Рис. 6. Комплексный геофизический разрез РШ Карты № 4 по профилю № 2 (дата съемки: июль 2024 г.)

Fig. 6. Complex geophysical section of the RS Map No. 4 along profile No. 2 (survey date: July 2024)

раствора (красные пунктирные линии), а по данным электроразведки установлено направление его распространения и относительное насыщение горных пород рабочим раствором.

Как видно из рис. 6, в интервале 48 — 51 м по профилю № 2, на отметке от 0 до 3 м по глубине, значения удельного электрического сопротивления составляют около 500 Ом·м. По тому же участку на георадиолокационном волновом поле отображаются многократно переотраженные оси синфазности георадиолокационных сигналов. По фотофиксации этой зоны РШ видно, что на его поверхности лежат куски руды довольно больших размеров (негабариты с линейными размерами ≈1 м), не утрамбованные, между ними наблюдаются многочисленные пустоты, не заполненные мелкими фракциями руды. При распространении электромагнитных волн в среде с воздушными полостями в горных породах возникает эффект многократных отражений георадиолокационных сигналов, который на радарограмме представляется в виде повторяющихся осей синфазности (волн дифракции). Можно предположить, что смачиваемость горных пород и их пропитывание раствором на этом участке неравномерное, о чем свидетельствуют значения удельных электрических сопротивлений.

Таким образом, проведенные полевые исследования на РШ в разные периоды года и при различных режимах орошения позволяют сделать следующие выводы:

- использование двух геофизических методов георадиолокации и электротомографии в комплексе позволяет наиболее точно описать сложное строение и состояние РШ;
- в РШ в процессе его формирования и эксплуатации возникают зоны переуплотнения достаточно значительного размера, а также зоны с негабаритами, с многочисленными пустотами, не заполненными мелкими фракциями руды, в которых меняется направление фильтрационных потоков.

Компьютерное моделирование теплового режима РШ

Компьютерное моделирование теплового режима на 3D-модели РШ при КВ золота в холодном климате реализовывалось в программном комплексе Frost 3D (ООО «НТЦ «Симмэйкерс», лицензия № С804).

Расчет нестационарной задачи распространения тепла в трехмерном пространстве в программе Frost.Термо основан на широко апробированном уравнениитеплопроводности,вкоторомучтены фазовые превращения и перенос тепла за счет конвекции [28]:

$$\left(C(T)+\rho_d L_f \frac{\partial w_v(T)}{\partial T}\right)\frac{\partial T}{\partial t}+ \\ +\nabla\left(-\lambda(T)\nabla T\right)+C_w u\nabla T=0 \quad (1)$$

где T — температура, ºС; $C(T)$ — зависимость объемной теплоемкости грунта от температуры, Дж/(м³·К); $W_v(T)$ — зависимость количества незамерзшей воды в грунте от температуры, д.е.; ρ_d — плотность скелета грунта, кг/м³ ; L_f — удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; t — время, с; $\lambda(T)$ — зависимость теплопроводности грунта от температуры, Вт/(м·К); C_w — объемная теплоемкость воды, Дж/(м³·К); u — вектор скорости фильтрации грунтовых вод, м/с.

Для всех имеющихся в моделируемой области материалов необходимо задать соответствующие физические свойства с учетом неоднородного строения штабелей [29, 30]. Также для всех используемых в модели условий теплообмена необходимо определить параметры граничных условий.

На поверхности штабелей и основания задается граничное условие тре-

тьего рода (теплообмен по Ньютону) в зависимости от температуры атмосферы приземного слоя, коэффициента конвективного теплообмена, а также, при необходимости, дополнительного теплового потока от времени [28]:

$$n\cdot\left(\lambda\nabla T\right)=\alpha(t)\left(T_{ext}(t)-T\right)+q_0(t),\ (2)$$

где α — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м^2·К); T_{ext} — температура внешней среды (атмосферы), ºС; q_0 — тепловой поток, Вт/м^2.

Коэффициент конвективного теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью массива горных пород в зимний период зависит от толщины снежного покрова и определяется по следующей формуле [31, 32]:

$$\alpha=\left(1/\alpha_0+\delta_s/\lambda_s\right)^{-1},\qquad(3)$$

где δ_s, λ_s — соответственно толщина (м) и коэффициент теплопроводности снега (Вт/(м·К)); α_0 — эмпирический коэффициент конвективного теплообмена (Вт/(м^2·К)), рассчитываемый по следующей формуле [31]:

$$\alpha_0=\begin{cases}6{,}16+4{,}19\cdot v, & 0<v\le 5;\\ 7{,}56\cdot v^{0{,}78}, & 5<v\le 30,\end{cases}\qquad(4)$$

где ν — скорость ветра, м/с.

Годовой ход температуры воздуха T_{ext} задается таблично по среднесуточным значениям [33].

Моделирование фильтрации грунтовых вод в программе Frost.Термо основано на широко апробированном уравнении фильтрации грунтовых вод, выведенном из закона Дарси [28]:

$$\nabla\cdot\left(-K\nabla H\right)=0,\qquad(5)$$

откуда вектор скорости фильтрации воды в грунте вычисляется по формуле

$$u=-K\nabla H,\qquad(6)$$

где H — гидравлический напор, м; K — коэффициент фильтрации, м/с; u — вектор скорости фильтрации воды.

Решение уравнения теплопроводности в трехмерной постановке осуществляется численно с помощью явного метода конечных разностей [28]. Конечно-разностный метод, реализованный в программе, является сеточным методом, т.е. расчетная область дискретизируется прямоугольной сеткой, а решение происходит непосредственно в узлах сетки. Для каждого узла сетки составляется разностное уравнение в соответствии с используемым шаблоном разностной схемы. Получается система линейных уравнений, решение которой позволяет получить необходимый результат в рассматриваемой расчетной области.

Рассмотрим вариант расчета теплового режима двухярусного РШ, в теле которого сформирован наклонный технологический съезд, при круглогодичном орошении рабочими растворами.

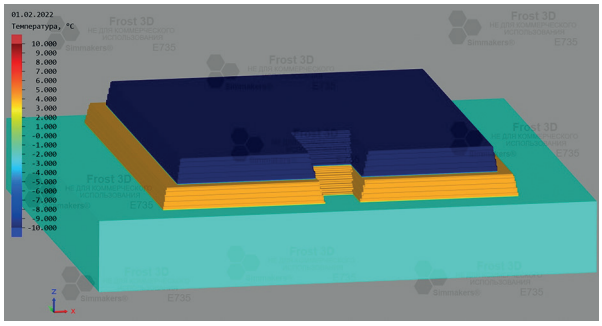

Рис. 7. Общий вид 3D-модели двухъярусного РШ со съездом в ПК Frost 3D
Fig. 7. General view of the 3D model of a two-tiered RS with a ramp in PC Frost 3D

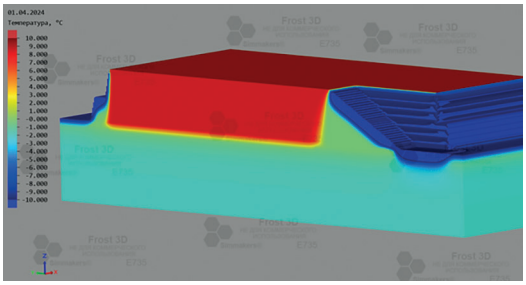

Рис. 8. Температурная диаграмма поперечного среза штабеля в районе технологического съезда на 01.04.2024 при скорости фильтрации u = 2.0 м/сут при круглогодичном орошении

Fig. 8. Temperature diagram of the cross-section of the stack in the area of the technological exit on 01.04.2024 at a filtration rate of u = 2.0 m/day with year-round irrigation

Ширина РШ 55 м, длина 75 м, высота каждого яруса 10 м. Съезд имеет уклон 70 град, борта съезда –75 град. На рис. 7 представлен общий вид 3D-модели РШ со съездом. Скорости фильтрации рабочих растворов u = 2,0 м/сут. В летний период орошается вся поверхность РШ, в зимний — только верхняя. В зимний период верхняя поверхность штабеля теплоизолируется льдом толщиной 10 см с воздушным прослоем 5 см между породами штабеля и льдом и укрыта снегом согласно климату. Борта штабеля в зимний период специально не теплоизолируются. Нижний ярус имеет начальную положительную температуру +4 °С, верхний ярус сформирован зимой и имеет начальную отрицательную температуру –10 °С. В зимний период температура раствора +6 °С. В летний период орошения штабеля — с 15 апреля до 15 октября — температура раствора выше +10 °С. На рис. 8, 9 представлены поперечные срезы в виде температурных диаграмм тела РШ в районе технологического съезда на различные даты.

При скорости фильтрации рабочих растворов u = 2,0 м/сут и при круглогодичном орошении РШ (начало орошения с 15.04.2022) после его формирования температура в весенне-летний период в теле РШ положительная и устойчиво выше +10 °С. С 15.10.2022 включается подогрев раствора до +6 °С до 15.04.2023 г. Как видно из температурных диаграмм продольного и поперечного срезов РШ на различные даты (рис. 8, 9), тело РШ находится в устойчивой температуре выше +5 °С весь зимний период. Но в нижнем ярусе наблюдается переохлаждение пород РШ под бермами. На рис. 9 можно видеть,

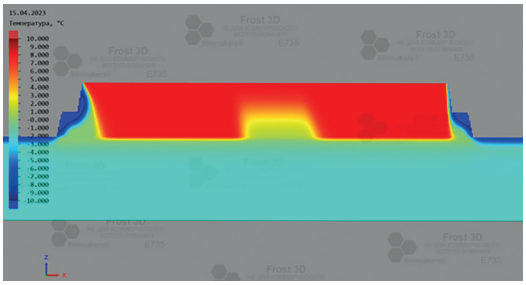

Рис. 9. Температурная диаграмма продольного среза штабеля на 15.04.2023 при скорости фильтрации u = 2.0 м/сут при круглогодичном орошении

Fig. 9. Temperature diagram of the longitudinal section of the stack on 15.04.2023 at a filtration rate of u = 2.0 m/day with year-round irrigation

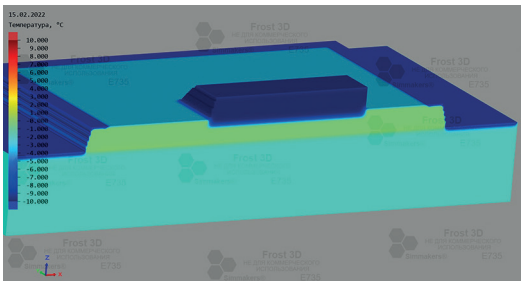

Рис. 10. Общий вид РШ с включенным внутрь него блоком повышенной плотности и пониженной фильтрации (визуализация верхнего яруса отключена)

Fig. 10. General view of the RS with a high-density, low-filtration block included inside it (visualization of the upper tier is disabled)

что есть снос температурного поля вправо по оси *X*. Это объясняется условием расчета, что вектор скорости *u* по оси *X* и оси *Y* имеет небольшой уклон в сторону растворосборника, расположенного справа. Таким образом, согласно расчетам, к началу лета в теле РШ в нижнем ярусе сохраняются устойчивые зоны с пониженной температурой. Такие же устойчивые зоны переохлажденных пород наблюдаются в теле штабеля и под технологическим съездом (см. рис. 8, 9).

Многовариантные расчеты по тепловому режиму РШ показали, что уменьшение в зимний период температуры подаваемого рабочего раствора до +3 °С критического промораживания тела РШ не вызывает. При условии надлежащей теплоизоляции поверхности штабеля.

Рассмотрим вариант расчета теплового режима РШ, в теле которого на границе верхнего и нижнего ярусов сформировался блок переуплотненных и переохлажденных пород с пониженной фильтрацией (в расчете принята фильтрация для этого блока *u* = 0,5 м/сут). Остальные исходные данные аналогичны предыдущему варианту. На рис. 10 представлен общий вид РШ с включенным внутрь него блоком (визуализация верхнего яруса отключена).

На рис. 11, 12 представлены температурные диаграммы продольного среза РШ в районе блока переуплотненных пород на различные даты. Как видно из рис. 11, блок переуплотненных пород изменяет общий поток фильтрации рабочих растворов. Породы, находящиеся внизу блока, также исключаются из общего процесса равномерного орошения и, соответственно, из процесса выщелачивания золота. Постепенно они

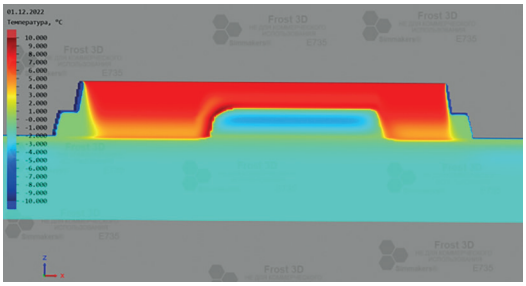

Рис. 11. Температурная диаграмма продольного среза РШ в районе блока переуплотненных пород на 01.12.2022 при скорости фильтрации u = 2.0 м/сут при круглогодичном зимнем орошении

Fig. 11. Temperature diagram of the longitudinal section of the RS in the area of the block of over-compacted rocks on 01.12.2022 at a filtration rate of u = 2.0 m/day with year-round winter irrigation

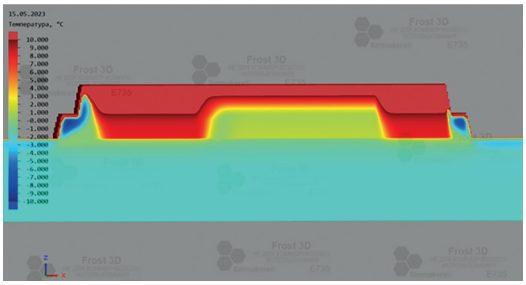

Рис. 12. Температурная диаграмма продольного среза РШ в районе блока переуплотненных пород на 15.05.2023 при скорости фильтрации u = 2.0 м/сут при круглогодичном зимнем орошении
Fig. 12. Temperature diagram of the longitudinal section of the RS in the area of the block of over-compacted rocks on 15.05.2023 at a filtration rate of u = 2.0 m/day with year-round winter irrigation

вовлекаются в процесс выщелачивания, но с задержкой на 3—4 и даже более месяцев. Таким образом, наличие блока переуплотненных пород оказывает значительное влияние на формирование температурного режима РШ. Особенно в породах нижнего яруса, находящихся под блоком.

На рис. 13, 14 представлены температурные диаграммы поперечного среза РШ на 1 июля и 1 сентября 2024 г. Исходные данные аналогичны предыдущему варианту. Внутри штабеля размещены несколько зон уплотненных пород с пониженной фильтрацией u_z = = 0,25 м/сут в летний период с температурой –3 °С. Зоны толщиной 2 м, высотой 5 м, размещены над основанием штабеля на высоте 1 м.

Как видно из рис. 13, 14, зоны пониженной фильтрации с начальной температурой –3 °С достаточно медленно

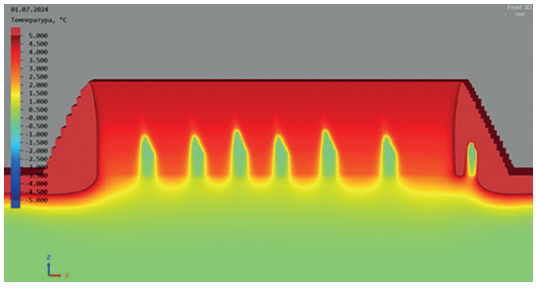

Рис. 13. Температурная диаграмма поперечного среза РШ на 01.07.2024
Fig. 13. Temperature diagram of the cross-section of the RS on 01.07.2024

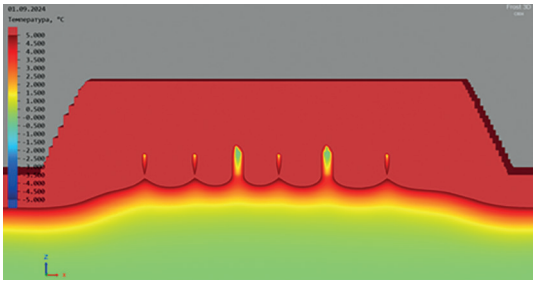

Рис. 14. Температурная диаграмма поперечного среза РШ на 01.09.2024
Fig. 14. Temperature diagram of the cross-section of the RS on 01.09.2024

прогреваются, сохраняя температуру +0,5 ºС до середины лета. Оказывают негативное влияние на нижележащие породы, охлаждая их. Практически полностью прогреваются к началу сентября.

Многовариантные расчеты по тепловому режиму РШ показали, что с понижением начальной температуры таких зон до –7 ºС их прогрев несколько замедляется, но не сильно отличается от предыдущего варианта. Можно сделать вывод, что эти зоны выравнивают свою температуру с общей температурой РШ с отставанием на 2 — 3 месяца. С увеличением размера этих зон их температурное выравнивание с общей температурой пород РШ замедляется и растягивается на 4 — 6 месяцев.

Выводы

Таким образом, проведенные полевые исследования на РШ в разные периоды года и при различных режимах орошения позволяют сделать следующие выводы:

• использование двух геофизических методов георадиолокации и электротомографии в комплексе позволяет наиболее точно описать сложное строение и состояние РШ;

• в РШ в процессе его формирования и эксплуатации возникают зоны переуплотнения достаточно значительного размера, а также зоны с негабаритами, с многочисленными пустотами, не заполненными мелкими фракциями руды, в которых меняется направление фильтрационных потоков.

Согласно расчетам, проведенным в ПК Frost 3D на компьютерной модели РШ, для сохранения положительных температур в теле РШ температура растворов не должна быть ниже +3 ºС, скорость фильтрации в зимний период не должна быть ниже u_x = 0,5 м/сут, при условии теплоизоляции поверхности РШ, обеспечивающей его положительную температуру под теплоизоляцией. Наличие в РШ зон уплотненных пород с пониженной фильтрацией замедляет процесс выравнивания общей температуры РШ на период от 3 до 6 месяцев, в зависимости от начальной температуры этих зон и их размера. Существенное значение имеет размер этих зон. Повышение температуры в переуплотненных зонах повышает их проницаемость. Блок переуплотненных пород изменяет общий поток фильтрации рабочих растворов. Породы, находящиеся внизу блока, также исключаются из общего процесса равномерного орошения и, соответственно, из процесса выщелачивания золота. Постепенно они вовлекаются в процесс выщелачивания, но с задержкой на 3 — 4 и даже более месяцев. Таким образом, наличие блока переуплотненных пород оказывает значительное влияние на формирование температурного режима РШ, особенно в породах нижнего яруса, находящихся под блоком.

Авторы выражают глубокую благодарность коллективу АО «Эльконский ГМК» за всестороннюю поддержку, оказанную в ходе проведения полевых исследований на опытнопромышленном полигоне кучного выщелачивания месторождения «Северный», и лично генеральному директору М.Л. Бруку, первому зам. ген. директора П.С. Варлакову, зам. ген. директора по стратегическому развитию В.Ю. Кургузову за их активное участие и содействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батугина Н. С., Хоютанов Е. А.* Проблемы и перспективы освоения минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых северо-востока Республики Саха (Якутии) // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2025. — № 1 (192). — С. 50 — 62.

2. *Батугина Н. С.*, *Ткач С. М.*, *Хоютанов Е. А.*, *Данилова В. Е.* Оценка минерально-сырьевой базы золота северо-восточной Якутии // Горный журнал. — 2024. — № 2. — С. 11—16.

3. *Хабиров В. В.*, *Забельский В. К.*, *Воробьев А. Е.* Прогрессивные технологии добычи и переработки золотосодержащего сырья. — М.: Недра, 1994. — 268 с.

4. *Кашуба С. Г.*, *Лесков М. И.* Кучное выщелачивание в российской практике — обзор опыта и анализ перспектив // Золото и технологии. — 2014. — № 1(23). — С. 10—14.

5. *Шумилова Л. В.*, *Хатькова А. Н.*, *Мязин В. П.*, *Лесков А. С.* Круглогодичное кучное выщелачивание золота в криолитозоне // Металлург. — 2020. — № 10. — С. 56—64.

6. *Medina D.*, *Anderson C. G.* A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates // Metals. 2020, vol. 10, no. 7, article 897. DOI: 10.3390/met10070897.

7. *Ghorbani Y., Franzidis J-P., Petersen J.* Heap leaching technology — current state, innovations and future directions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2015, vol. 37, no. 2. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

8. *Mellado M. E.*, *Lucay F. A.*, *Cisternas L. A.*, *Gálvez E. D.*, *Sepúlveda F. D.* A posteriori analysis of analytical models for heap leaching using uncertainty and global sensitivity analyses // Minerals. 2018, vol. 8, article 44. DOI: 10.3390/min8020044.

9. *Ordóñez J. I.*, *Condori A., Moreno L.*, *Cisternas L. A.* Heap leaching of caliche ore. Modeling of a multicomponent system with particle size distribution // Minerals. 2017, vol. 7, article 180. DOI: 10.3390/min7100180.

10. *Robertson S. W.*, *Van Staden P. J.*, *Cherkaev A., Petersen J.* Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching // Hydrometallurgy. 2022, vol. 208, article 105811. DOI: 10.10165/J.HYDROMET.2021.105811.

11. *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.

12. *Игнатов А. А.* Физико-химические процессы горного производства (математические модели выщелачивания руд и оттаивания мерзлых пород). — М.: Наука, 1986. — 96 с.

13. *Татауров С. Б.* Трансформация и переработка золотосодержащего сырья в криолитозоне. — М.: Изд-во «Горная книга», 2008. — 318 с.

14. *Татаринов С. М.*, *Хомутов А. В.*, *Косяков О. В.*, *Седых В. И.* Применение кучного выщелачивания золота в условиях Крайнего Севера // Цветные металлы. — 2010. — № 11. — С. 44—45.

15. *Ковалев В. Н.*, *Муслимов Б. А.*, *Клепиков А. С.* Математическое моделирование кучного выщелачивания золота в зонах многолетней мерзлоты // Горный журнал. — 2013. — № 7. — С. 37—40.

16. *Каймонов М. В.*, *Матвеев А. И.*, *Хосоев Д. В.* Моделирование теплового режима рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в холодном климате // Горная промышленность. — 2025. — № 1. — С. 102—108.

17. *McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross M.* Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures // Minerals Engineering. 2015, pp. 1—26. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.11.005.

18. *McBride D., Gebhardt J., Croft N., Cross M.* Heap leaching: Modelling and forecasting using CFD technology // Minerals. 2018, vol. 8, article 9. DOI: 10.3390/min8010009.

19. *Miskolczi I.* Accounting for complexity in draindown modeling for heap leach closure / Proceedings of Heap Leach Solutions 2022. 2022, Sparks, Nevada, USA, pp. 231—243. https://www.heapleachsolutions.ca/WPwebsite/wp-content/uploads/2022/10/Proceedings-of-Heap-Leach-Solutions-Conference-2022.pdf.

20. *Баянов А. Е.* Группировка мероприятий и инженерных идей для эффективного кучного выщелачивания в условиях отрицательных температур / Кулагинские чтения: XII Международная научно-практическая конференция. Ч. VI. — Чита: ЗабГУ, 2012. — С. 33—35.

21. *Winterton J., Martin A.* Process operations considerations at Victoria Gold Corp.'s Eagle Gold Mine / Proceedings of Heap Leach Solutions 2022. 2022, Sparks, Nevada, USA, pp. 143—154. https://www.heapleachsolutions.ca/WPwebsite/wp-content/uploads/2022/10/Proceedings-of-Heap-Leach-Solutions-Conference-2022.pdf.

22. *Ribolini A., Forte E., Khajuria V.*, *Colucci R. R.*, *Paro L., Guglielmin M.* Scratching beneath the surface: Using Ground-Penetrating Radar to disentangle pronival ram-parts, embryonic rock glaciers and moraines (Gardetta Plateau, Southwestern Alps) // Geomorphology, 2025, vol. 474, article 109647. DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.109647.

23. *Santina I., Forte E., Nicora M., Ponti S., Guglielmin M.* Where does a glacier end? Integrated geophysical, geomorphological and photogrammetric measurements to image geometry and ice facies distribution // Catena. 2023, vol. 225, article 107016. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107016.

24. *Cabalski K., Dzierżek J., Kowalczyk S.* Middle Pleistocene debris flows in the low mountains: Geological and georadar surveys at the Mosty site (Holy Cross Mountains, Poland) // Quaternary International. 2021, vol. 589, pp. 25—38. DOI: 10.1016/j.quaint.2021.03.002.

25. *Оленченко В. В., Осипова П. С., Калганов А. С., Чекрыжов А. В.* Электротомография рудного штабеля при кучном выщелачивании золота / Инженерная и рудная геофизика 2021: Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки. — М., 2021. — С. 12. DOI: 10.3997/2214-4609.202152019.

26. *Maghsoudy Soroush, Ardejani Faramarz, Molson John, Amin Mehdi, Ebrahimi Luna.* Application of geoelectrical tomography in coupled hydromechanical — Chemical investigations in heap leaching // Mine Water and the Environment. 2018, vol. 38. DOI: 10.1007/s10230-018-0557-6.

27. *Саввин Д. В., Федорова Л. Л., Куляндин Г. А.* Геофизические исследования мерзлотных условий водозащитной дамбы угольного разреза «Кангаласский» // Известия вузов. Горный журнал. — 2022. — № 4. — С. 38—46 [In Eng]. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-38-46.

28. *Самарский А. А., Гулин А. В.* Численные методы математической физики. — М.: Научный мир, 2003. — 316 с.

29. *Гаврильев Р. И.* Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 280 с.

30. *Курилко А. С., Ермаков С. А., Хохолов Ю. А., Каймонов М. В., Бураков А. М.* Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. — 140 с.

31. *Павлов А. В.* Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. — Новосибирск: Наука, 1980. — 240 с.

32. *Перльштейн Г. З.* Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. — Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1979. — 304 с.

33. *Фельдман Г. М., Тетельбаум А. С., Шендер Н. И., Гаврильев Р. И.* Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии. — Якутск, 1988. — 240 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Batugina N. S., Hoyutanov E. A. Problems and prospects for the development of the mineral resource base of solid minerals in the north-east of the Republic of Sakha (Yakutia). *Mineral resources of Russia. Economics & management*. 2025, no. 1 (192), pp. 50—62. [In Russ].

2. Batugina N. S., Tkach S. M., Hoyutanov E. A., Danilova V. E. Assessment of the mineral resource base of gold in northeastern Yakutia. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 2, pp. 11—16. [In Russ].

3. Khabirov V. V., Zabel'skiy V. K., Vorob'ev A. E. *Progressivnye tekhnologii dobychi i pererabotki zolotosoderzhashchego syr'ya* [Progressive technologies for the extraction and processing of gold-containing raw materials], Moscow, Nedra, 1994, 268 p.

4. Kashuba S. G., Leskov M. I. Heap leaching in Russian practice — review of experience and analysis of prospects. *Gold and technology*. 2014, no. 1(23), pp. 10—14. [In Russ].

5. Shumilova L. V., Hat'kova A. N., Myazin V. P., Leskov A. S. Year-round heap leaching of gold in the cryolithozone. *Metallurgist*. 2020, no. 10, pp. 56—64. [In Russ].

6. Medina D., Anderson C. G. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 7, article 897. DOI: 10.3390/met10070897.

7. Ghorbani Y., Franzidis J-P., Petersen J. Heap leaching technology — current state, innovations and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2015, vol. 37, no. 2. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

8. Mellado M. E., Lucay F. A., Cisternas L. A., Gálvez E. D., Sepúlveda F. D. A posteriori analysis of analytical models for heap leaching using uncertainty and global sensitivity analyses. *Minerals*. 2018, vol. 8, article 44. DOI: 10.3390/min8020044.

9. Ordóñez J. I., Condori A., Moreno L., Cisternas L. A. Heap leaching of caliche ore. Modeling of a multicomponent system with particle size distribution. *Minerals*. 2017, vol. 7, article 180. DOI: 10.3390/min7100180.

10. Robertson S. W., Van Staden P. J., Cherkaev A., Petersen J. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching. *Hydrometallurgy*. 2022, vol. 208, article 105811. DOI: 10.10165/J.HYDROMET.2021.105811.

11. Marinin M. A., Karasev M. A., Pospekhov G. B., Pomorceva A. A., Kondakova V. N., Sushkova V. I. Comprehensive study of filtration properties of pelletized sand-clay ores and filtration modes in a heap leaching pile. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 30 — 40. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.

12. Ignatov A. A. *Fiziko-khimicheskie protsessy gornogo proizvodstva (matematicheskie modeli vyshchelachivaniya rud i ottaivaniya merzlykh porod)* [Physicochemical processes of mining production (mathematical models of ore leaching and frozen rock thawing)], Moscow, Nauka, 1986, 96 p.

13. Tataurov S. B. *Transformatsiya i pererabotka zolotosoderzhashchego syr'ya v kriolitozone* [Transformation and processing of gold-bearing raw materials in the cryolithozone], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2008, 318 p.

14. Tatarinov S. M., Homutov A. V., Kosyakov O. V., Sedyh V. I. Application of heap leaching of gold in the conditions of the Far North. *Tsvetnye Metally*. 2010, no. 11, pp. 44 — 45. [In Russ].

15. Kovalyov V. N., Muslimov B. A., Klepikov A. S. Mathematical modeling of heap leaching of gold in permafrost zones. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 7, pp. 37 — 40. [In Russ].

16. Kaimonov M. V., Matveev A. I., Hosoev D. V. Modeling of thermal conditions for ore stockpile in heap leaching of gold in cold climates. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 1, pp. 102 — 108. [In Russ].

17. McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross M. Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures. *Minerals Engineering*. 2015, pp. 1 — 26. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.11.005.

18. McBride D., Gebhardt J., Croft N., Cross M. Heap leaching: Modelling and forecasting using CFD technology. *Minerals*. 2018, vol. 8, article 9. DOI: 10.3390/min8010009.

19. Miskolczi I. Accounting for complexity in draindown modeling for heap leach closure. *Proceedings of Heap Leach Solutions 2022*. 2022, Sparks, Nevada, USA, pp. 231 — 243. https://www.heapleachsolutions.ca/WPwebsite/wp-content/uploads/2022/10/Proceedings-of-Heap-Leach-Solutions-Conference-2022.pdf.

20. Bayanov A. E. Grouping of measures and engineering ideas for efficient heap leaching under subzero temperatures. *Kulaginskie chteniya: XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya* [Kulagin readings: XII International scientific-practical conference], Chita, ZabGU, 2012, pp. 33 — 35. [In Russ].

21. Winterton J., Martin A. Process operations considerations at Victoria Gold Corp.'s Eagle Gold Mine. *Proceedings of Heap Leach Solutions 2022*. 2022, Sparks, Nevada, USA, pp. 143 — 154. https://www.heapleachsolutions.ca/WPwebsite/wp-content/uploads/2022/10/Proceedings-of-Heap-Leach-Solutions-Conference-2022.pdf.

22. Ribolini A., Forte E., Khajuria V., Colucci R. R., Paro L., Guglielmin M. Scratching beneath the surface: Using Ground-Penetrating Radar to disentangle pronival ram-parts, embryonic rock glaciers and moraines (Gardetta Plateau, Southwestern Alps). *Geomorphology*, 2025, vol. 474, article 109647. DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.109647.

23. Santina I., Forte E., Nicora M., Ponti S., Guglielmin M. Where does a glacier end? Integrated geophysical, geomorphological and photogrammetric measurements to image geometry and ice facies distribution. *Catena*. 2023, vol. 225, article 107016. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107016.

24. Cabalski K., Dzierżek J., Kowalczyk S. Middle Pleistocene debris flows in the low mountains: Geological and georadar surveys at the Mosty site (Holy Cross Mountains, Poland). *Quaternary International*. 2021, vol. 589, pp. 25 — 38. DOI: 10.1016/j.quaint.2021.03.002.

25. Olenchenko V. V., Osipova P. S., Kalganov A. S., Chekryzhov A. V. Electrical resistivity tomography of an ore pile during heap leaching of gold. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2021: Materialy 17-y nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki* [Engineering and ore geophysics 2021: Proceedings of the 17th scientific and practical conference and exhibition], Moscow, 2021, pp. 12. [In Russ]. DOI: 10.3997/2214-4609.202152019.

26. Maghsoudy Soroush, Ardejani Faramarz, Molson John, Amin Mehdi, Ebrahimi Luna. Application of geoelectrical tomography in coupled hydromechanical — Chemical investigations in heap leaching. *Mine Water and the Environmen*t. 2018, vol. 38. DOI: 10.1007/s10230-018-0557-6.

27. Savvin D. V., Fedorova L. L., Kulyandin G. A. Geophysical studies of permafrost conditions of the water-protective dam of the Kangalassky coal mine. *Minerals and Mining Engineering*. 2022, no. 4, pp. 38 — 46 [In Eng]. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-38-46.

28. Samarskiy A. A., Gulin A. V. *Chislennye metody matematicheskoy fiziki* [Chislennye metody matematicheskoj fiziki], Moscow, Nauchniy mir, 2003, 316 p.

29. Gavril'ev R. I. *Teplofizicheskie svoystva gornykh porod i napochvennykh pokrovov kriolitozony* [Teplofizicheskie svojstva gornyh porod i napochvennyh pokrovov kriolitozony], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 1998, 280 p.

30. Kurilko A. S., Ermakov S. A., Khokholov Yu. A., Kaymonov M. V., Burakov A. M. *Modelirovanie teplovykh protsessov v gornom massive pri otkrytoy razrabotke rossypey kriolitozony* [Modeling of thermal processes in a rock mass during open-pit mining of placers in the cryolithozone], Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2011, 140 p.

31. Pavlov A. V. *Raschet i regulirovanie merzlotnogo rezhima pochvy* [Calculation and regulation of the permafrost regime of the soil], Novosibirsk, Nauka, 1980, 240 p.

32. Perl'shteyn G. Z. *Vodno-teplovaya melioratsiya merzlykh porod na Severo-Vostoke SSSR* [Water-thermal melioration of frozen rocks in the North-East of the USSR], Novosibirsk, Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1979, 304 p.

33. Fel'dman G. M., Tetel'baum A. S., Shender N. I., Gavril'ev R. I. *Posobie po prognozu temperaturnogo rezhima gruntov Yakutii* [Manual for forecasting the temperature regime of soils in Yakutia], Yakutsk, 1988, 240 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каймонов Михаил Васильевич[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: gtf@igds.ysn.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2506-8349,
Прудецкий Николай Дмитриевич[1] — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: ndprudetskii@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7570-2985,
Федорова Лариса Лукинична[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: lar-fed-90@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5002-6140,
Саввинов Иннокентий Иннокентьевич[1] — ведущий инженер,
e-mail: geophyzicist@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-1256-2689,
[1] Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения РАН» Институт горного дела Севера
им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН (ИГДС СО РАН).
Для контактов: Каймонов М.В., e-mail: gtf@igds.ysn.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Kaimonov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, e-mail: gtf@igds.ysn.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2506-8349,
N.D. Prudetskii[1], Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, e-mail: ndprudetskii@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7570-2985,
L.L. Fedorova[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: lar-fed-90@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5002-6140,
I.I. Savvinov[1], Leading Engineer, e-mail: geophyzicist@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0005-1256-2689,
[1] Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences» N.V. Chersky Institute of Northern Mining
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 677000, Yakutsk, Russia.
Corresponding author: M.V. Kaimonov, e-mail: gtf@igds.ysn.ru.

Получена редакцией 10.04.2025; получена после рецензии 05.08.2025; принята к печати 10.12.2025.
Received by the editors 10.04.2025; received after the review 05.08.2025; accepted for printing 10.12.2025.