

Разработка рекомендаций по обеспечению оптимального теплового режима при кучном выщелачивании золота в условиях криолитозоны

Каймонов М. В.¹

¹ Якутский научный центр Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Россия

e-mail: gtf@igds.ysn.ru

Реферат

Введение. Рассматриваются вопросы продления периода кучного выщелачивания золота в зоне распространения многолетней мерзлоты. Основным сдерживающим фактором применения этого способа в регионах с холодным климатом заключается в том, что эффективность процесса выщелачивания золотосодержащих руд любого типа в значительной степени зависит от температурных условий рудного штабеля и выщелачивающего раствора, что в свою очередь обуславливает сезонность работы золотодобывающих предприятий, использующих технологию кучного выщелачивания (только в летние месяцы).

Цель исследования – разработать новую комплексную математическую модель процессов тепломассопереноса при кучном выщелачивании полезных ископаемых в условиях холодного климата, которая позволит с высокой степенью надежности оценить ряд важных характеристик выщелачивания золота в зонах многолетней мерзлоты и продлить период выщелачивания.

Результаты исследования. Разработана математическая модель, включающая в себя двумерное нелинейное уравнение теплопроводности (задача Стефана). Программа позволяет выбирать теплофизические характеристики породного массива (основания) и штабеля раздробленных горных пород, начальную влажность (льдистость), мощность и пространственное расположение источников тепла, параметры теплоизоляции поверхности штабеля, основания и др. Разработана программа, которая позволяет прогнозировать термическое состояние массива многолетнемерзлых горных пород (основания) и штабеля раздробленных горных пород, выбирать режим эксплуатации источников тепла (нагревающего контура), параметры теплоизоляции.

Порядок проведения исследования. Проведены многовариантные расчеты по прогнозу теплового режима рудного штабеля в процессе выщелачивания золота в разные периоды года для климатических условий Верхоянского района Якутии. Варианты расчетов включают в себя дату начала процесса кучного выщелачивания и способы теплоизоляции штабеля. Показано, что между датой начала выщелачивания и способами теплоизоляции существует прямая и тесная связь.

Рекомендации. Представлены рекомендуемые периоды формирования штабеля для кучного выщелачивания длительностью 120 дней (4 месяца) при использовании теплоизоляции пенополистиролом толщиной 0,1 м и 0,2 м в различных комбинациях. Показано, что при возведении штабелей в мае–июне теплоизоляция не требуется. При возведении штабелей в марте–апреле необходима теплоизоляция основания. При возведении штабелей в июле–августе требуется теплоизоляция поверхности.

Итоги работы и актуальность исследования. При грамотном выборе материала теплоизоляции и его толщины, сроков возведения штабеля и режимов его эксплуатации возможно значительно сократить затраты на объемы материалов теплоизоляции и продлить сроки выщелачивания с марта по ноябрь включительно. Для круглогодичной эксплуатации штабелей потребуются разработки мероприятий по прогреву тела штабеля в зимние месяцы (декабрь–февраль). Правильный выбор способов теплоизоляции штабеля в зависимости от даты начала процесса выщелачивания

позволит существенно снизить затраты на дефицитные в условиях труднодоступного региона теплоизоляционные материалы и снизить потери золота по температурному фактору.

Ключевые слова: математическое моделирование; тепловой режим; тепломассоперенос; кучное выщелачивание; золото; многолетнемерзлые горные породы; криолитозона.

Работа выполнена в рамках проекта научно-исследовательских работ (грант № 13.ЦКП.21.0016) на оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра Якутского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук.

Введение. Характерной чертой развития производства драгоценных металлов в настоящее время является «продвижение» предприятий кучного выщелачивания (КВ) в восточные и северные регионы Российской Федерации в зоны все более сурового климата. Широкое внедрение технологии КВ на этих территориях осложняется климатическими условиями: наличием криолитозоны и продолжительным зимним периодом (около 7 мес.).

КВ является хорошо зарекомендовавшей себя экстракционной металлургической технологией, позволяющей экономично перерабатывать различные виды бедных руд, которые иначе не могли бы быть использованы. Технологическим вопросам цианирования металлов посвящена обширная литература, в которой достаточно подробно представлены наиболее важные проблемы, с которыми в настоящее время сталкивается отрасль, что позволяет установить наиболее эффективные и осуществимые будущие процессы [1–6], в том числе и КВ в суровом климате [7–15].

Основной сдерживающий фактор применения этого способа в регионах холодного климата заключается в том, что эффективность процесса выщелачивания золотосодержащих руд любого типа в значительной степени зависит от температурных условий рудного штабеля и выщелачивающего раствора, что в свою очередь обуславливает сезонность работы золотодобывающих предприятий, использующих технологию КВ (только в летние месяцы). Для продвижения технологий КВ в районы холодного климата необходимо решить вопросы продления периода промышленного сезона, что требует разработки новых и коренного усовершенствования существующих технологий управления тепловым режимом рудного штабеля для активизации процесса выщелачивания. Для этого необходимо разработать новую комплексную математическую модель процессов тепломассопереноса при КВ полезных ископаемых в условиях холодного климата, которая позволит с высокой степенью надежности оценить ряд важных характеристик КВ золота в зонах многолетней мерзлоты и продлить период выщелачивания.

Математическая модель теплового режима штабеля при кучном выщелачивании в условиях криолитозоны. Разработка технологии кучного выщелачивания золота в условиях многолетней мерзлоты связана с решением ряда задач, не характерных для проведения этого процесса в зонах с умеренным климатом. Процессы тепломассопереноса в раздробленных горных породах с учетом фазовых превращений *вода–лед–вода* и физико-химические процессы в системе *раствор реагента–руда* описываются нелинейными нестационарными краевыми задачами для уравнений в частных производных, как правило, не имеющих аналитического решения. Полное решение соответствующей нелинейной системы уравнений возможно только с использованием методов вычислительной математики и ЭВМ.

Таким образом, в первом приближении задача формулируется следующим образом. На площадке с установившимся тепловлажностным режимом грунтов основания возведен штабель из разрушенных горных пород определенных геометрических размеров. Начальные распределения температуры, влажности, физико-технические и теплофизические свойства горных пород в теле и основании штабеля известны. Расчетная схема приведена на рис. 1.

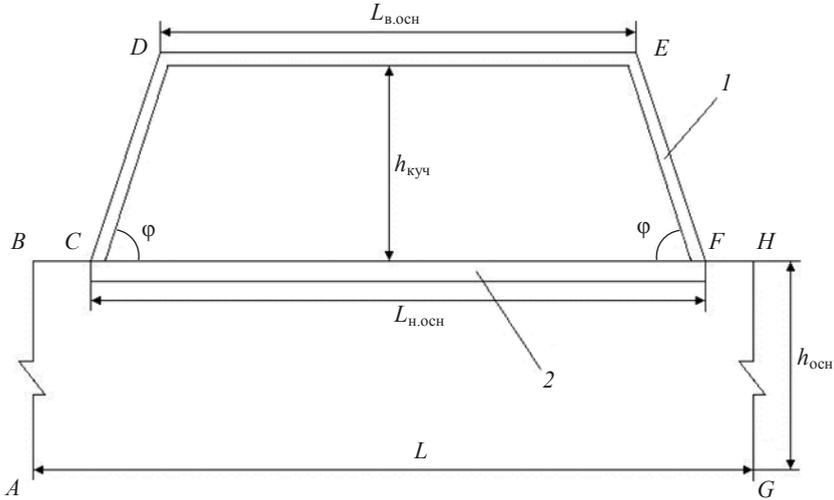


Рисунок 1. Схема расчета прогноза теплового режима рудного штабеля: L – ширина расчетной области, м; $h_{осн}$ – глубина основания штабеля, м; $h_{куч}$ – высота штабеля, м; $L_{в.осн}$ – ширина верхнего основания штабеля, м; $L_{н.осн}$ – ширина нижнего основания штабеля, м; I – толщина теплоизоляции штабеля $h_{из}$, м; 2 – толщина гидротеплоизоляции основания штабеля $h_{из.осн}$, м; φ – угол откоса штабеля, град; $ABCDEFHG$ – границы расчетной области

Figure 1. Computation scheme for ore stack thermal regime prediction: L is the width of the design area, m; $h_{осн}$ is the depth of the stack base, m; $h_{куч}$ is the stack height, m; $L_{в.осн}$ is the width of the upper base of the stack, m; $L_{н.осн}$ is width of the lower base of the stack, m; I – thickness of the stack thermal insulation, m; 2 – thickness of the hydrothermal insulation of the stack base $h_{из.осн}$, m; φ – stack slope angle, degrees; $ABCDEFHG$ – boundaries of the computational region

В теле возведенного штабеля под влиянием теплообмена с атмосферным воздухом (верхнее основание, правый и левый откосы) и грунтами основания происходит формирование определенного температурного режима. В основании штабеля естественный температурный режим грунтов изменяется в соответствии с новыми условиями теплообмена на поверхности. Необходимо выяснить динамику температурного поля штабеля и его основания в период его орошения с учетом сезонного и непрерывного круглогодичного КВ золота.

При разработке математической модели исследуемого процесса приняты следующие упрощающие допущения: штабель состоит из частиц одинакового размера; размер частиц в процессе выщелачивания не изменятся; теплообмен поверхностей штабеля (верхнее основание, правый и левый откосы) и массива горных пород приштабельной части площадки с атмосферным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом конвективного теплообмена α ; фильтрация орошающего раствора в теле штабеля происходит только в талой зоне; за время эксплуатации штабеля его геометрические размеры, а также физико-технические и теплофизические свойства горных пород не изменяются.

В соответствии с принятыми расчетной схемой и упрощающими допущениями расчет двумерного температурного поля тела и основания штабеля при нестационарном режиме сводится к решению системы дифференциальных уравнений теории теплопроводности [8, 11, 13–19]:

$$\left[C(T) + L_1 W \rho_b \delta(T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] - c_b \rho_b v \left[\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right] + f(x, y, t);$$

$$C(T) = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*; \\ c_2 \rho_2, & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*; \\ \lambda_2, & T > T^*; \end{cases}$$

$$x, y \in D_{xy}, \quad t > 0,$$

где T – температура грунта, °С; T^* – температура фазовых переходов влаги в грунте, °С; t, x, y – временная, s , и пространственная, m , координаты; L_1 – скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W – влажность грунта, доли ед.; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К), плотность, кг/м³, и коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К), для мерзлых (талых) грунтов соответственно; c_b, ρ_b – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К), и плотность воды, кг/м³; v – скорость фильтрации, м/с; $\delta(T - T^*)$ – функция Дирака; $f(x, y, t)$ – источник тепла.

Начальное условие:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y); \quad x, y \in D_{xy}.$$

Граничные условия:

– на левой Γ_1 (AB) и правой Γ_3 (HG) границах основания задаются условия второго рода (отсутствие теплового потока):

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad t > 0;$$

– на верхней Γ_2 ($BCDEFH$) границе задается условие третьего рода:

$$\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T(x, y, t) - T_b(t)); \quad t > 0;$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м² · К); T_b – температура воздуха, °С;

– на нижней Γ_4 (AH) границе на глубине 40 м задается условие первого рода:

$$T(x, H, t) = T_c; \quad t > 0,$$

где T_c – естественная температура пород, °С.

Коэффициент теплообмена α атмосферного воздуха с поверхностью на границе Γ_2 ($BCDEFH$) зависит от толщины снега в приштабельной зоне на границе Γ_2' (BC, FH) или теплоизоляции штабеля на границе Γ_2'' ($CDEF$) и определяется по формуле [20]:

$$\alpha = \left(\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} \right)^{-1},$$

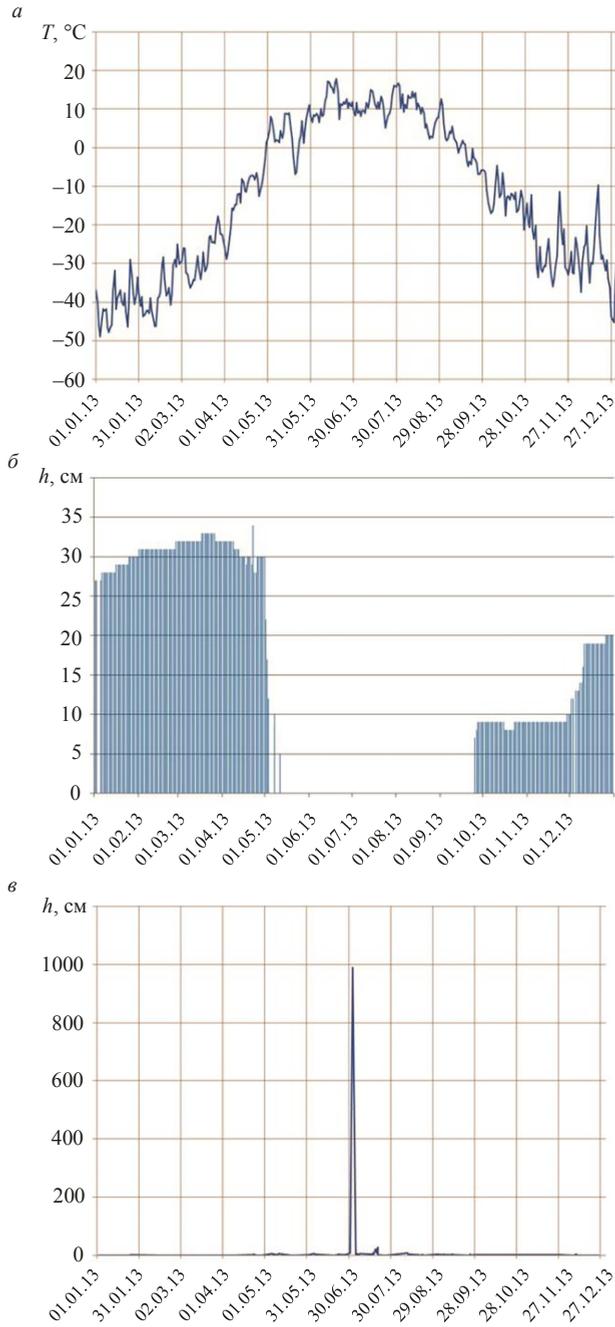


Рисунок 2. Климатические характеристики: *a* – годовой ход температуры наружного воздуха; *б* – высота снежного покрова;

в – количество выпавших осадков в теплый период года
 Figure 2. Climatic characteristics: *a* – annual cycle of outdoor air temperature; *б* – snow cover height; *в* – the amount of precipitation in the warm period of the year

где $\delta_{из}$, $\lambda_{из}$ – толщина, м, и коэффициент теплопроводности снега (теплоизоляции), Вт/(м · К); α_0 – эмпирический коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м² · К), рассчитываемый по формуле [20]:

$$\alpha_0 = \begin{cases} 6,16 + 4,19 \cdot w, & 0 < w \leq 5; \\ 7,56 \cdot w^{0,78}, & 5 < w \leq 30; \end{cases}$$

где w – скорость ветра, м/с.

Для расчета α на границе Γ_2' необходимы данные по месяцам о коэффициенте теплопроводности ($\lambda_{из} = \lambda_{сн}$) и высоте ($\delta_{из} = \delta_{сн}$) снежного покрова. На основе большого объема экспериментальных материалов в работе [20] получены следующие осредненные корреляционные зависимости для нахождения расчетных значений $\lambda_{сн}$:

$$\lambda_{сн} = \begin{cases} 1,165 \cdot \rho_{сн}, & T_{сн} > -10 \text{ }^\circ\text{C}; \\ 1,035 \cdot \rho_{сн}, & -10 \text{ }^\circ\text{C} \geq T_{сн} \geq -20 \text{ }^\circ\text{C}; \\ 0,907 \cdot \rho_{сн}, & T_{сн} < -20 \text{ }^\circ\text{C}; \end{cases}$$

где $T_{сн}$, $\rho_{сн}$ – температура и плотность снежного покрова соответственно, г/см³.

Расчет плотности снега производится по корреляционной формуле Э. Г. Коломьяца [21]:

$$\rho_{сн} = 0,182 + 0,18 \cdot \delta_{сн}.$$

Необходимо отметить, что плотность снега не является постоянной величиной и очень быстро меняется в период весеннего таяния: 0,35 г/см³ в начале, 0,45 г/см³ в середине и 0,6 г/см³ в конце снеготаяния.

При расчетах температуры наружного воздуха за зимний $T_B^3(\tau)$ и летний $T_B^л(\tau)$ периоды представляем в виде полусинусоиды [22]:

$$T_B^3(\tau) = \frac{\pi\Omega_3}{2\tau_3} \cdot \sin\left(\frac{\pi\tau}{\tau_3}\right); \quad T_B^л(\tau) = \frac{\pi\Omega_л}{2\tau_л} \cdot \sin\left(\frac{\pi\tau}{\tau_л}\right),$$

где τ – время, ч; Ω_3 , $\Omega_л$ – значения суммы градусо-часов температуры воздуха за зимний и летний периоды соответственно, градус-час; τ_3 , $\tau_л$ – продолжительности зимнего и летнего периодов соответственно, ч.

Численные расчеты температурного режима рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в условиях криолитозоны производились методом конечных разностей с применением локально-одномерной схемы [23].

Вычислительный эксперимент, анализ и обсуждение результатов расчетов.

На основе разработанной программы для ПЭВМ [24] проведены численные эксперименты по расчету теплового режима рудного штабеля, его основания и приштабельной части массива многолетнемерзлых горных пород при следующих условиях:

– Верхоянский район Республики Саха (Якутия), осредненные климатические характеристики представлены на рис. 2;

– штабель представляет собой лежащую призму трапециевидного сечения, высота – 6 м, ширина нижнего основания – 12 м, ширина верхнего основания – 10 м, длина – 100 м;

- температура выщелачивающего раствора не менее +10 °С (производится подогрев раствора при понижении наружного воздуха до указанного значения);
- плотность орошения 10 л/(м² · ч);
- скорость фильтрации раствора в штабеле 0,5 м/сут;
- период выщелачивания 120 дней (4 мес.).

При расчетах учитывались: дата формирования штабеля 1-е и 15-е число с марта по сентябрь; наличие и толщина теплоизоляции основания и поверхности штабеля; наличие внутренних источников тепла. Порядок расчета следующий: задание начальных условий (распределение температуры основания и тела штабеля на начало даты расчета, наличие и толщина теплоизоляции основания и поверхности штабеля, наличие внутренних источников тепла и режим их функционирования), расчет значений температур геоматериалов штабеля начиная с даты его формирования в течение 4 месяцев с учетом краевых условий математической модели.

Результаты расчетов некоторых вариантов в виде температурных изолиний при различных значениях теплоизоляции приведены на рис. 3–5.

На рис. 3 и 4 представлены графики распределения температур геоматериалов по центральному вертикальному поперечному сечению штабеля и его основанию на дату завершения процесса выщелачивания при отсутствии теплоизоляции верхней и боковой поверхностей и основания штабеля (рис. 3) и наличии теплоизоляции основания штабеля пенополистиролом толщиной $h_{из.осн} = 0,1$ м (рис. 4). Цифрами 1–4 обозначены штабеля, сформированные в первых числах марта, апреля, мая и июня. Соответственно, графики даны на дату завершения процесса выщелачивания по истечении 4 месяцев соответственно: 1-е июля, 1-е августа, 1-е сентября и

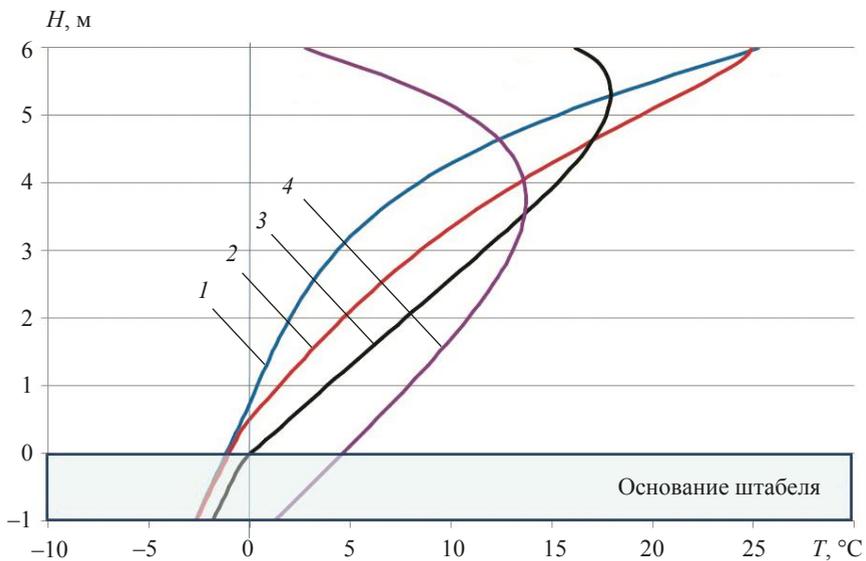


Рисунок 3. Графики распределения температур геоматериалов по центральному вертикальному сечению штабеля и его основанию на дату завершения процесса выщелачивания (1-е число каждого месяца) при отсутствии теплоизоляции поверхности и основания штабеля: 1 – июль; 2 – август; 3 – сентябрь; 4 – октябрь

Figure 3. Graphs of geomaterials temperature distribution along the central vertical section of the stack and its base on the date of the leaching process completion (1st day of each month) without thermal insulation of the stack surface and base: 1 – July; 2 – August; 3 – September; 4 – October

1-е октября. Как видно из графиков (рис. 3), температура геоматериалов по вертикальному сечению штабеля на дату завершения процесса выщелачивания неравномерна и, тем не менее, стабильно выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вариантов его формирования 1-го мая и 1-го июня (рис. 3, графики 3 и 4). В случае формирования штабеля 1-го марта на дату завершения процесса выщелачивания 1-го июля в нижней части штабеля на высоте до 0,7 м, согласно расчетам, температура пород опускается ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, график 1). Это объясняется тем, что штабель 1-го марта выкладывается на сильно замороженное основание, за счет чего аккумулированный им холод в течение последующих 4 месяцев оказывает охлаждающее влияние и понижает температуру геоматериалов в штабеле. Так как процесс выщелачивания в зоне отрицательных температур не происходит, то в этом случае потери могут составить не менее 12 %. Для варианта формирования штабеля 1-го апреля потери по этой причине составят не менее 7 % (рис. 3, график 2). Также нужно учитывать, что в данных «мертвых» зонах возможны смерзание геоматериалов в конгломераты, уменьшение фильтрации раствора за счет его намерзания на поверхности, сужение каналов, образование линз льда, куржаков и проявление других негативных факторов, сопутствующих процессу смерзания, которые часто имеют малоизученный, неуправляемый и необратимый характер в массивах крупнообломочных геоматериалов.

В случае формирования штабеля 15-го июня на дату завершения процесса выщелачивания 15-го октября в верхней части штабеля (на его поверхности) образуется слой мощностью менее 0,3 м с отрицательной температурой. Тем не менее,

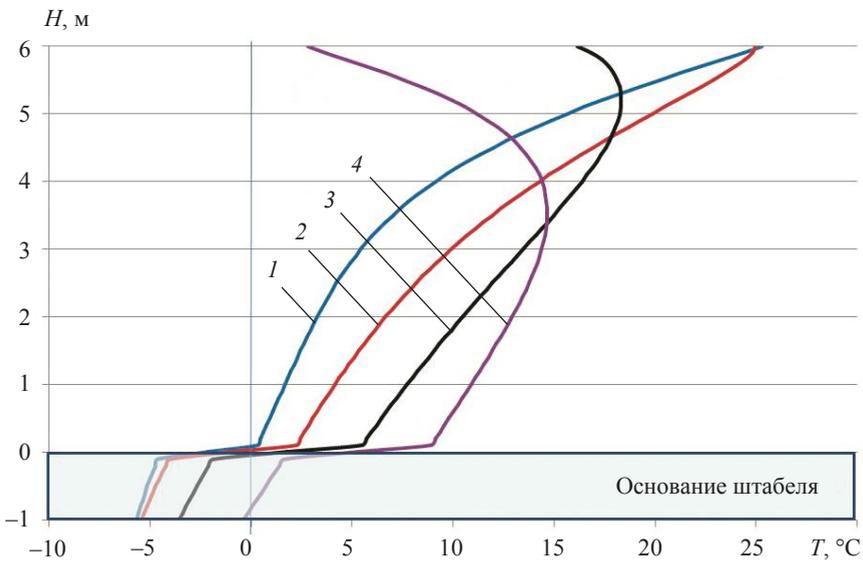


Рисунок 4. Графики распределения температур геоматериалов по центральному вертикальному сечению штабеля и его основанию на дату завершения процесса выщелачивания (1-е число каждого месяца) при отсутствии теплоизоляции поверхности и наличии теплоизоляции основания штабеля пенополистиролом толщиной $h_{\text{из.очн}} = 0,1\text{ м}$: 1 – июль; 2 – август; 3 – сентябрь; 4 – октябрь

Figure 4. Graphs of geomaterials temperature distribution along the central vertical section of the stack and its base on the date of the leaching process completion (1st day of each month) without thermal insulation of the surface and with the thermal insulation of the stack base with polystyrene foam with a thickness of $h_{\text{из.очн}} = 0.1\text{ м}$: 1 – July; 2 – August; 3 – September; 4 – October

по нашему мнению, это не скажется на увеличении показателей потерь по температурному фактору, поскольку понижение температуры пород с поверхности штабеля ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет происходить в последние дни процесса выщелачивания и затронет незначительную часть объема штабеля. Но в этом случае необходимо предусмотреть мероприятия по теплоизоляции нагнетательных трубопроводов, форсунок и др. (возможность их заглубления в тело штабеля и пр.).

Таким образом, согласно расчетам, формирование штабелей без теплоизоляции их поверхностей и основания целесообразно проводить в мае и июне. В данном случае на весь период процесса выщелачивания (4 мес.) в штабеле сохраняются положительные температуры и, соответственно, потери по температурному фактору будут равны нулю. В случае формирования штабелей ранней весной (в марте и апреле) они будут промерзать со стороны основания, а во второй половине лета (в июле и августе) – будут промерзать на значительную глубину со стороны дневной поверхности в осеннее время. Следовательно, в указанные даты формирование штабелей без теплоизоляции поверхности и основания, согласно расчетам, нецелесообразно, так как процесс промораживания пород штабеля становится необратимым, неуправляемым и приводит к существенным потерям.

Как видно из графиков, представленных на рис. 4, температура геоматериалов по вертикальному сечению штабеля на дату завершения процесса выщелачивания неравномерна и стабильно выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для всех вариантов его формирования 1-го марта, 1-го апреля, 1-го мая и 1-го июня (рис. 4, графики 1–4). В случае наличия

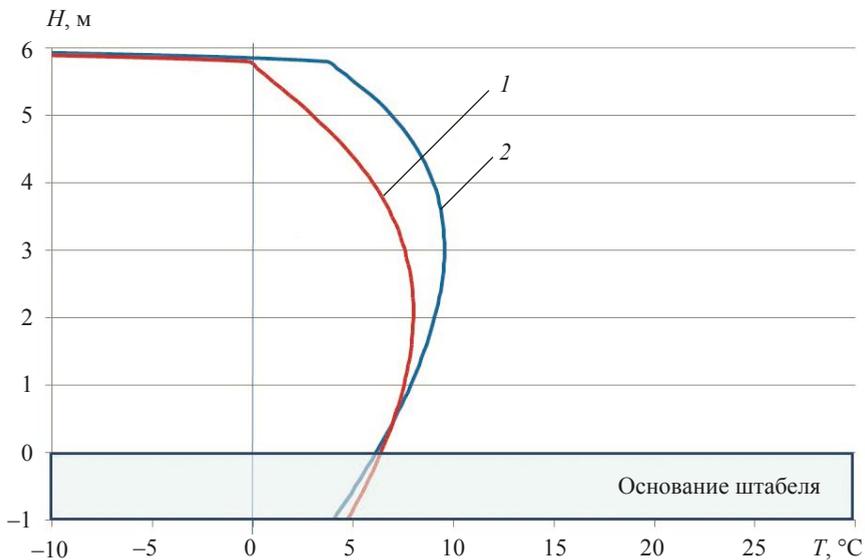


Рисунок 5. Графики распределения температур геоматериалов по центральному вертикальному сечению штабеля и его основания на дату завершения процесса выщелачивания (15-е число каждого месяца) при наличии теплоизоляции поверхности пенополистиролом толщиной $h_{пз} = 0,2\text{ м}$ и отсутствии теплоизоляции основания штабеля: 1 – ноябрь; 2 – декабрь

Figure 5. Graphs of geomaterials temperature distribution along the central vertical section of the stack and its base on the date of the leaching process completion (the 15th day of each month) with the thermal insulation of the surface with polystyrene foam with a thickness of $h_{пз} = 0.2\text{ м}$ and without the thermal insulation of the stack base: 1 – November; 2 – December

теплоизоляции основания штабеля пенополистиролом $h_{из.осн} = 0,1$ м температура геоматериалов стабильно выше $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вариантов его формирования 1-го мая и 1-го июня (рис. 4, графики 3, 4). Для варианта формирования 1-го марта температура геоматериалов ниже $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нижней его половине (рис. 4, график 1). Для варианта формирования 1-го апреля температура геоматериалов ниже $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1/3 нижней его части (рис. 4, график 2). В случае наличия теплоизоляции основания штабеля пенополистиролом $h_{из.осн} = 0,2$ м температура геоматериалов стабильно выше $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вариантов формирования 1-го апреля, 1-го мая и 1-го июня. Для варианта формирования 1-го марта температура геоматериалов ниже $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нижней его половине.

Таким образом, согласно расчетам, формирование штабелей без теплоизоляции их поверхности и при наличии теплоизоляции основания целесообразно проводить в апреле, мае и июне. В данном случае на весь период процесса выщелачивания (4 мес.) в штабеле сохраняются положительные температуры без образования смерзшихся зон, недоступных для выщелачивающих растворов, и, соответственно, потери металла по температурному фактору будут равны нулю. Причем температуры геоматериалов в теле штабеля будут выше $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и процесс выщелачивания будет происходить в близких к оптимальным по температурному фактору условиям [8]. В случае формирования штабелей в марте температуры геоматериалов будут нахо-

Таблица 1. Рекомендуемые периоды формирования штабеля для кучного выщелачивания длительностью 120 дней (4 мес.)
Table 1. Recommended 120-day (4-month) periods for heap leach stacks formation

Тип теплоизоляции	Месяц											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Без теплоизоляции поверхности и основания штабеля												
<i>Без теплоизоляции поверхности</i>												
$h_{из.осн} = 0,1$ м												
$h_{из.осн} = 0,2$ м												
<i>Теплоизоляция поверхности пенополистиролом толщиной $h_{из} = 0,1$ м</i>												
Без теплоизоляции основания												
$h_{из.осн} = 0,1$ м												
$h_{из.осн} = 0,2$ м												
<i>Теплоизоляция поверхности пенополистиролом толщиной $h_{из} = 0,2$ м</i>												
Без теплоизоляции основания												
$h_{из.осн} = 0,1$ м												
$h_{из.осн} = 0,2$ м												

- с предварительным однократным прогревом штабеля горячей водой до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- без предварительного прогрева штабеля
- возможно промерзание верхней части штабеля на глубину до 0,3 м в последние недели процесса выщелачивания

даться в диапазоне $+3...+5$ °С в 1/2 его нижней части при толщине теплоизоляции пенополистиролом $h_{из.осн} = 0,1$ м и 1/3 при $h_{из.осн} = 0,2$ м, что объясняется воздействием аккумулярованного холода пород со стороны основания.

На рис. 5 представлены графики распределения температур геоматериалов по центральному поперечному вертикальному сечению штабеля и его основанию на дату завершения процесса выщелачивания при наличии теплоизоляции поверхности штабеля пенополистиролом толщиной $h_{из} = 0,2$ м и отсутствии теплоизоляции основания штабеля соответственно. Как видно из графиков, наличие теплоизоляции поверхности штабеля позволяет продлить период выщелачивания до начала декабря. Как показывают наши расчеты, выщелачивание в декабре–феврале при теплоизоляции пенополистиролом толщиной 0,1 м и 0,2 м представляется неэффективным. Для поддержания оптимальных температур в теле штабеля, не препятствующих процессу выщелачивания золота, необходимо либо существенное наращивание толщины теплоизоляции поверхности, либо подогрев тела штабеля, например, способами, предложенными Институтом горного дела Севера Сибирского отделения Российской академии наук (ИГДС СО РАН) [25].

Выводы. В табл. 1 представлены рекомендуемые периоды формирования штабеля для кучного выщелачивания длительностью 120 дней (4 мес.) при использовании теплоизоляции пенополистиролом толщиной $h_{из} = 0,1$ м и 0,2 м в различных комбинациях. Как видно из табл. 1, при возведении штабелей в мае–июне теплоизоляция не требуется. При возведении штабелей в марте–апреле необходима теплоизоляция основания. При возведении штабелей в июле–августе требуется теплоизоляция поверхности. При грамотном выборе материала теплоизоляции и его толщины, сроков возведения штабеля и режимов его эксплуатации возможно значительно сократить затраты на объемы материалов теплоизоляции и продлить сроки выщелачивания с марта по ноябрь включительно. Для круглогодичной эксплуатации штабелей потребуется разработка мероприятий по прогреву тела штабеля в зимние месяцы (декабрь–февраль). Предложенная математическая модель и программы для ЭВМ могут быть использованы при разработке «цифрового двойника» штабеля горных пород при КВ драгоценных металлов в условиях криолитозоны, функционирующего в реальном времени и синхронизированного с реальным производственным процессом [26].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Medina D., Anderson C. G. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates // *Metals*. 2020. No. 10(7). P. 897. DOI: 10.3390/met10070897
2. 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. November. No. 37(2). P. 73–119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990
3. 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. No. 8. P. 44. DOI: 10.3390/min8020044
4. 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. No. 7. P. 180. DOI: 10.3390/min7100180
5. 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. Art. 105811. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105811
6. 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
7. Хабиров В. В., Забельский В. К., Воробьев А. Е. Прогрессивные технологии добычи и переработки золотосодержащего сырья. М.: Недра, 1994. 268 с.

8. Игнатов А. А. Физико-химические процессы горного производства (математические модели выщелачивания руд и оттаивания мерзлых пород). М.: Наука, 1986. 96 с.
9. Тагауров С. Б. Трансформация и переработка золотосодержащего сырья в криолитозоне. М.: Горная книга, 2008. 318 с.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross M. Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures // Minerals Engineering. 2016. Vol. 90. P. 77–88. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.11.005
14. McBride D., Gebhardt J., Croft N., Cross M. Heap leaching: modelling and forecasting using CFD technology // Minerals. 2018. No. 8(1). P. 9. DOI: 10.3390/min8010009
15. Попов В. И., Каймонов М. В. Определение оптимальных параметров процесса выщелачивания в рудном штабеле при отрицательных температурах окружающей среды // ГИАБ. 2017. № 11 (Спец. вып. 24). С. 292–298.
16. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
17. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
18. Nourani V., Behfar N., Dabrowska D., Zhang Y. The applications of soft computing methods for seepage modeling: a review // Water. 2021. No. 13. Art. 3384.
19. Parsaie A., Haghiabi A. H., Latif S. D., Tripathi R. P. Predictive modelling of piezometric head and seepage discharge in Earth dam using soft computational models // Environmental Science and Pollution Research. 2021. No. 28(43). Art. 60842–60856. DOI: 10.1007/s11356-021-15029-4
20. Павлов А. В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск: Наука, 1980. 240 с.
21. Гаврильев Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. Новосибирск: СО РАН, 2004. 146 с.
22. Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии / отв. ред. П. И. Мельников. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН СССР, 1988. 240 с.
23. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.
24. Численный расчет нестационарных температурных полей в системе «Массив многолетнемерзлых горных пород – Штабель раздробленных горных пород» при кучном выщелачивании драгоценных металлов: свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2023613099 Рос. Федерация. № 2022681453; заявл. 14.11.2022; зарег. 10.02.2023. Бюл. № 2. 1 с.
25. Киселев В. В., Каймонов М. В., Попов В. И. Перспективные направления подземного выщелачивания золота в россыпных шахтах криолитозоны // ГИАБ. 2018. № 12. С. 177–184.
26. Бабенко А. Г. Научные, технологические и иные аспекты цифровизации производственных процессов // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 4. С. 90–100. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-90-100

Поступила в редакцию 21 февраля 2023 года

Сведения об авторе:

Каймонов Михаил Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Якутского научного центра Сибирского отделения РАН. E-mail: gtf@igds.ysn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2506-8349>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-68-81

Developing recommendations for optimal thermal conditions for gold heap leaching in the permafrost zone

Mikhail V. Kaimonov¹

¹ Yakut Scientific Center SB RAS, Yakutsk, Russia.

Abstract

Introduction. The article considers the problem of extending the period of gold heap leaching in the permafrost zone. The main factor limiting the use of this method in cold regions is that the efficiency of the process of leaching any gold-bearing ores largely depends on the ore stack and leaching solution temperature conditions, which in turn determines the seasonal activity of the gold mining enterprises that use heap leaching technology (only during the summer months).

Research objective is to develop a new integrated mathematical model of heat and mass transfer during mineral heap leaching in cold regions. The model will make it possible to very reliably assess a number of important characteristics of gold leaching in permafrost zones and extend the leaching period.

Research results. A mathematical model has been developed that includes a two-dimensional nonlinear heat-transfer equation (the Stefan problem). The program allows to select the thermal and physical characteristics of a rock mass (base) and a crushed rock stack, initial moisture content (ice content), power and spatial arrangement of heat sources, thermal insulation parameters of the surface of a stack and a base, etc. A program has been developed that allows to predict the thermal condition of the permafrost mass (base) and crushed rock stacks, choose the heat sources operation mode (heating circuit) and the thermal insulation parameters

Research procedure. Multivariate analysis was carried out on the ore stack thermal conditions prediction in the process of gold leaching in different periods of the year for the climatic conditions of the Verkhoyansk region, Yakutia. Calculation types include the starting date of the heap leaching process and the methods of stack thermal insulation. It is shown that there is a direct and close relationship between the starting date of leaching and the methods of thermal insulation.

Recommendations. The recommended 120-day (4-month) periods of heap leaching stack formation are presented under the thermal insulation with 0.1 m and 0.2 m thick polystyrene foam in various combinations. It is shown that for the stacks constructed in May and June, thermal insulation is not required. For the stacks constructed in March and April, thermal insulation is necessary. For the stacks constructed in July and August, thermal insulation of the surface is required.

Results and relevance. Correct thermal insulation material and its thickness, the timing of the stack construction and its operating modes can significantly reduce the cost of thermal insulation materials and extend the leaching time from March to November inclusive. For year-round operation of stacks, measures for the stack body heating in the winter months (from December to February) are required. The right choice of stack thermal insulation methods, depending on the starting date of the leaching process, will significantly reduce the cost of thermal insulation materials that are scarce in a remote region and reduce gold losses due to the temperature factor.

Keywords: mathematical modeling; thermal conditions; heat and mass transfer; heap leaching; gold; permafrost rock; permafrost zone.

The research was carried out within the research project (grant no. 13.TsKP.21.0016) using the equipment of the Resource Sharing Center of the Federal Research Center of the Yakut Scientific Center SB RAS.

REFERENCES

1. Medina D., Anderson C. G. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. *Metals*. 2020; 10(7): 897. Available from: doi: 10.3390/met10070897
2. 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. November. No. 37(2). P. 73–119. Available from: doi: 10.1080/08827508.2015.1115990
3. 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; 8: 44. Available from: doi: 10.3390/min8020044
4. 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; 7: 180. Available from: doi: 10.3390/min7100180
5. 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; 208: 105811. Available from: doi: 10.1016/j.hydromet.2021.105811
6. Marinin M. A., Karasev M. A., Pospekhov G. B., Pomortseva A. A., Kondakova V. N., Sushkova V. I. Integrated study of the filtration properties of pelletized sandy-argillaceous ore and filtration modes in the heap leaching stack. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2023; 259: 30–40. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/PMI.2023.7
7. Khabirov V. V., Zabelskii V. K., Vorobiev A. E. *Innovative technologies of gold-bearing raw materials extraction and processing*. Moscow: Nedra Publishing; 1994. (In Russ.)
8. Ignatov A. A. *Physical and chemical processes of mining (mathematical models of ore leaching and frozen rock thawing)*. Moscow: Nauka Publishing; 1986. (In Russ.)
9. Tataurov S. B. *Gold-bearing raw material transformation and processing in the permafrost zone*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2008. (In Russ.)

10. Tatarinov S. M., Khomutov A. V., Kosiakov O. V., Sedykh V. I. Usage of heap leaching of gold in the conditions of high north. *Tsvetnye metally = Non-Ferrous Metals Journal*. 2010; 11: 44–45. (In Russ.)
11. Kovalev V. N., Muslimov B. A., Klepikov A. S. Mathematical modeling of gold heap leaching in permafrost zones. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2013; 7: 37–40. (In Russ.)
12. Kashuba S. G., Leskov M. I. Heap leaching in Russia: review of experience and prospects analysis. *Zoloto i tekhnologii = Gold and Technologies*. 2014; 1(23): 10–14. (In Russ.)
13. McBride D., Gebhardt J., Croft T., Cross M. Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures. *Minerals Engineering*. 2016; 90: 77–88. Available from: doi: 10.1016/j.mineng.2015.11.005
14. McBride D., Gebhardt J., Croft N., Cross M. Heap leaching: modelling and forecasting using CFD technology. *Minerals*. 2018; 8(1): 9. Available from: doi: 10.3390/min8010009
15. Popov V. I., Kaimonov M. V. Determination of the optimal parameters of the process of leaching in stack of ore with negative temperatures of the environment. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 11 (Special issue 24): 292–298. (In Russ.)
16. Tikhonov A. N., Samarskii A. A. *Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka Publishing; 1977. (In Russ.)
17. Samarskii A. A., Vabishchevich P. N. *Computer-oriented heat transfer*. Moscow: Editorial URSS Publishing; 2003. (In Russ.)
18. Nourani V., Behfar N., Dabrowska D., Zhang Y. The applications of soft computing methods for seepage modeling: a review. *Water*. 2021; 13: 3384.
19. Parsaie A., Haghiahi A. H., Latif S. D., Tripathi R. P. Predictive modelling of piezometric head and seepage discharge in Earth dam using soft computational models. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021; 28(43): 60842–60856. Available from: doi: 10.1007/s11356-021-15029-4
20. Pavlov A. V. *Calculation and control of the cryogenic condition of soil*. Novosibirsk: Nauka Publishing; 1980. (In Russ.)
21. Gavriliev R. I. *Thermophysical properties of the natural environment components in the permafrost zone*. Novosibirsk: SB RAS Publishing; 2004. (In Russ.)
22. Melnikov P. I. (ed.) *Reference guide for the prediction of the temperature mode of the Yakutia soils*. Yakutsk: IPS SB RAS; 1988. (In Russ.)
23. Samarskii A. A. *The theory of difference schemes*. Moscow: Nauka Publishing; 1983. (In Russ.)
24. Kaimonov M. V. *Numerical calculation of non-stationary temperature fields within the “permafrost rock mass – crushed rock stack” system in the course of precious metals heap leaching*. RF State Reg. of Comp. no. 2023613099.
25. Kiselev V. V., Kaimonov M. V., Popov V. I. Promising trends in in-situ leaching in gold placer mines in permafrost region. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 12: 177–184. (In Russ.)
26. Babenko A. G. Scientific, technological and other bases of production processes digitalization. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 4: 90–100 (In Russ.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-4-90-100

Received 21 February 2022

Information about the author:

Mikhail V. Kaimonov – PhD (Engineering), senior researcher, Yakut Scientific Center SB RAS. E-mail: gtf@igds.ysn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2506-8349>

Для цитирования: Каймонов М. В. Разработка рекомендаций по обеспечению оптимального теплового режима при кучном выщелачивании золота в условиях криолитозоны // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 68–81. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-68-81

For citation: Kaimonov M. V. Developing recommendations for optimal thermal conditions for gold heap leaching in the permafrost zone. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 68–81 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-68-81