

# Моделирование теплового режима рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в холодном климате

М.В. Каймонов✉, А.И. Матвеев, Д.В. Хосоев

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация  
✉ gtf@igds.ysn.ru

**Резюме:** Изложены результаты исследований, основной целью которых в практическом плане является широкое внедрение технологии кучного выщелачивания на территориях со сложными климатическими условиями: наличием криолитозоны и продолжительным зимним периодом. Основной сдерживающий фактор применения способов 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 (только в летние месяцы) работы золотодобывающих предприятий, использующих технологию кучного выщелачивания. Для всех имеющихся в моделируемой области материалов необходимо задать соответствующие физические свойства. Также для всех используемых в модели условий теплообмена необходимо определить параметры граничных условий. Моделирование фильтрации выщелачивающих растворов в программе Frost. Thermo основано на широко апробированном уравнении фильтрации грунтовых вод, выведенном из закона Дарси. Решение уравнения теплопроводности в трехмерной постановке осуществляется численно с помощью явного метода конечных разностей. Согласно результатам компьютерного моделирования в ПК Frost 3D аварийное разрушение теплоизоляционного покрытия поверхности штабеля приводит к промерзанию пород тела штабеля на значительную глубину. Проведены расчеты теплового режима рудного штабеля при различных условиях теплоизоляции его поверхности. Наиболее оптимальным вариантом теплоизоляции бортов штабеля является следующий: борта (откосы) нижнего яруса штабеля теплоизолировать снегом толщиной 1 м; борта (откосы) верхних ярусов штабеля теплоизолировать плёнкой с воздушным прослоем 3 см.

**Ключевые слова:** кучное выщелачивание, криолитозона, рудный штабель, теплоизоляция, глубина промерзания, тепловой режим, 3D-моделирование

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта научно-исследовательских работ на оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра Якутского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. Результаты исследования получены в рамках Программы комплексных научных исследований в РС (Я), направленных на развитие производительных сил и социальной сферы на 2021–2024 гг. (проект №4, этап 2, ЕГИСУ НИОКТР №АААА-Б-17-217060520052-0).

**Для цитирования:** 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):102–108. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-102-108>

## Modeling of thermal conditions for ore stockpile in heap leaching of gold in cold climates

M.V. Kaimonov✉, A.I. Matveev, D.V. Hosoev

Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation  
✉ gtf@igds.ysn.ru

**Abstract:** The paper presents the results of research, which primary practical goal is wide implementation of the heap leaching technology in areas with harsh climatic conditions, i.e. presence of permafrost and long winter periods. The main limiting factor for applying the method in regions with cold climate is that the leaching efficiency of any type of gold-bearing ores considerably depends on the temperature conditions of the ore stockpiled and the leaching solution, which in turn determines the seasonal nature (only in the Summer months) of gold mining operations utilizing the heap leaching technology. Appropriate physical properties need to be set for all the materials available in the area to be modeled. The boundary conditions also have to be defined for all heat transfer conditions used in the model. Modeling of the leaching solution filtration in the Frost. Thermo software suite is based on the extensively tested equation for groundwater filtration derived from the Darcy law. Solution of the

thermal conductivity equation in the 3D formulation is carried out numerically using the explicit method of finite differences. According to the results of computer modeling in the Frost 3D software suite, emergency failure of the thermal insulation coating on the stockpile surface leads to freezing of the rocks in the stockpile down to a considerable depth. Calculations of the thermal conditions of the ore stockpile have been carried out for different conditions of its surface thermal insulation. The most optimal method to thermally insulate the walls of the stockpile is to cover the slopes (walls) of its lower tier with a 1-meter thick snow layer, while the slopes (walls) of the upper tiers should be insulated with a film having an air interlayer of 3 cm.

**Keywords:** heap leaching, permafrost zone, ore stockpile, thermal insulation, freezing depth, thermal conditions, 3D modeling

**Acknowledgments:** The work was carried out under a research project using the equipment of the Shared Research Center of the Yakutsk Federal Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The research results were obtained as part of the Program for Integrated Scientific Research in the Republic of Sakha (Yakutia) aimed at the development of productive forces and social sphere for 2021-2024 (Project No. 4, Phase 2, EGISU NIOCTR No. AAAA-B-17-217060520052-0).

**For citation:** 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*. 2025;(1):102–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-102-108>

## Введение

В настоящее время в сфере производства драгоценных металлов наблюдается тенденция к расширению использования технологии кучного выщелачивания (КВ) в восточных и северных регионах России. Однако внедрение этой технологии на данных территориях сталкивается с определёнными трудностями, связанными с климатическими условиями, такими как наличие вечной мерзлоты и продолжительная зима, которая длится более семи месяцев.

КВ представляет собой хорошо зарекомендовавшую себя экстракционную металлургическую технологию, которая позволяет экономически эффективно перерабатывать различные виды бедных руд, которые в противном случае не могли бы быть использованы. Обширная литература посвящена технологическим вопросам цианирования металлов, в которой достаточно подробно представлены наиболее важные проблемы, с которыми в настоящее время сталкивается отрасль [1–6]. Это позволяет определить более эффективные и осуществимые будущие процессы, включая КВ в условиях сурового климата [7–15].

Эффективность выщелачивания золотосодержащих руд в холодном климате зависит от температуры рудного штабеля и раствора, что обуславливает сезонность работы золотодобывающих предприятий. Продвижение технологии КВ в регионы с холодным климатом требует решения проблемы продления промышленного сезона, разработки новых и улучшения существующих технологий управления тепловым режимом рудного штабеля для активизации процесса выщелачивания. Для этого необходим новый комплексный подход к прогнозу теплового режима рудного штабеля, созданию 3D-модели рудного штабеля, трёхмерной математической модели процессов теплопереноса, с учётом не только климатических факторов, но и этапов формирования штабелей и продвижения фронта работ (орошения). Это позволит с высокой степенью надёжности оценить характеристики выщелачивания золота в зонах многолетней мерзлоты и продлить период выщелачивания.

Характерным примером являются полигоны КВ, расположенные в Алданском районе Республики Саха (Якутия). Климат района характеризуется резко континентальными чертами, типичными для Якутии. Он отличается суровыми зимами с продолжительными периодами экстремально низких температур (до  $-45^{\circ}\text{C}$ ) и относительно коротким, но теплым летом (до  $+35^{\circ}\text{C}$ ). Месторождения района находятся в зоне островного развития многолетнемерзлых грунтов. Термический режим грунтов стабильный. Замеренные значения температур грунтов на глубине годовых нулевых

амплитуд составили  $+0,63^{\circ}\text{C}$ . По динамике температурного режима в годовом цикле выделяется слой сезонного промерзания и талая толща. Нормативная глубина сезонного промерзания составляет более 3,0 м. Снеговой покров умеренный, до 0,5 м, с середины октября до середины апреля. Среднегодовые значения скорости ветра 2,5 м/с.

На рис. 1 на заднем плане представлен одноярусный рудный штабель, введённый в работу (началось орошение). В центре идёт формирование второго яруса рудного штабеля (первый ярус отработан в предыдущем сезоне). Фото сделано с многоярусного штабеля (общая высота более 40 м). Орошение штабелей осуществляется круглогодично: среднезимняя температура рабочих растворов  $+4^{\circ}\text{C}$ , среднелетняя – более  $+10^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 1**  
Рудный штабель при кучном выщелачивании золота. Алданский район, Республика Саха (Якутия)

**Fig. 1**  
An ore stockpile for gold heap leaching Aldan District, Republic of Sakha (Yakutia)

В настоящее время в горной и строительной практике на вечномёрзлых грунтах известны многочисленные способы защиты поверхности грунтов от сезонного промерзания. На дражных полигонах при сравнительно больших площадях обычно используются следующие приёмы тепловой мелиорации мёрзлых пород: удаление естественного растительного покрова, зачернение поверхности, покрытие её светопрозрачными и слабовлагопроницаемыми плёнками и теплоизоляционными материалами (пенопласты, снежные, водно-ледяные, воздушно-ледяные и др. покровы), устройство ветровых преград, навесов и пр. [16–20].

Компьютерное моделирование теплового режима на 3D-модели рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в холодном климате реализовывалось в программном комплексе Frost3D (ООО «НТЦ «Симмэйкерс», лицензия № С804) <sup>1</sup>.

**Результаты и их обсуждение**

**1. Теплоизоляция горизонтальной поверхности штабеля**

Для штабелей КВ, эксплуатируемых в Иркутской области, Забайкальском крае и Южной Якутии, для защиты горизонтальной поверхности орошения в зимний период широко используется технология устройства воздушно-ледяных покрытий: ледовый покров толщиной до 0,1 м с воздушным прослоем между льдом и поверхностью штабеля толщиной ≈ 5 см и укрытых снежным покровом согласно климатическим параметрам условий расположения месторождения (от 0,5 м и более). Это позволяет не заглублять питающие трубопроводы в тело штабеля.

В табл. 1 приведены некоторые значения коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) наружного воздуха (атмосферы) с поверхностью штабеля в зависимости от различных покрытий и скорости ветра. Как видно из табл. 1, теплоизоляция горизонтальной поверхности штабеля в зимний период льдом толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 0,05 м и укрытого снежным покровом является наиболее эффективным и экономичным способом. Данный тип теплоизоляции сопоставим с теплоизоляцией поверхности полистиролом толщиной 0,1 м.

**Таблица 1**  
Значения коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  наружного воздуха (атмосферы) с поверхностью штабеля в зависимости от различных покрытий и скорости ветра, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

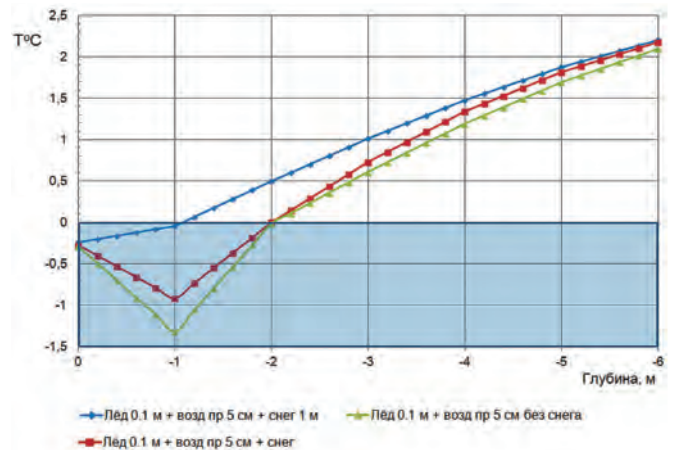
Скорость ветра, $v$ , м/с	Без снега	Снег 0,5 м	Полистирол 0,1 м	Лёд 0,1 м + воздух 0,05 м	Лёд 0,1 м + воздух 0,05 м + снег 0,5 м
0	6,16	0,46	0,25	0,44	0,23
5	27,11	0,48	0,26	0,46	0,24
10	45,55	0,49	0,26	0,47	0,24

Проведённые расчёты в ПК Frost3D также показывают высокую эффективность теплоизоляции поверхности штабеля в зимний период льдом толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 0,05 м и укрытого снежным покровом. На рис. 2 представлен график глубины промерзания поверхности штабеля под различными видами теплоизоляции при условии, что орошения поверхности штабеля рабочими растворами с положительной температурой подо льдом нет: лёд толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 5 см без снега; лёд толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 5 см, снеговой покров соответствует климату; лёд толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 5 см, снеговой покров мощностью 1,0 м.

Как видно из графиков рис. 2, глубина промерзания поверхности штабеля без орошения поверхности штабеля

рабочими растворами составляет для: льда толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 5 см при снежном покрове – 1,0 м, причём температура пород не ниже 0,24 °С; при снежном покрове согласно климату – 2,0 м, температура пород не ниже –0,91 °С; без снега – 2,0 м, температура пород не ниже –1,32 °С.

В случае орошения поверхности штабеля под теплоизоляцией из льда с воздушным просветом в этом воздушном просвете в результате процессов испарения-конденсации и фазового превращения конденсированной влаги на нижней поверхности льда (пар–вода–лёд) создаётся своеобразный микроклимат, который препятствует промерзанию поверхности штабеля и обеспечивает поверхность штабеля подо льдом в интервале положительных температур.



**Рис. 2**  
Графики глубины промерзания поверхности штабеля под различными видами теплоизоляции без орошения рабочими растворами

**Fig. 2**  
Graphs of the freezing depth at the stockpile surface with different types of thermal insulation and without irrigation using working solutions

В то же время хрупкость такого теплоизоляционного покрытия требует определённых мероприятий по контролю качества при его намораживании и контролю целостности при его эксплуатации в зимний период.

Другим недостатком теплоизоляции из льда является температура рабочего раствора и мощность орошения. При повышении температуры рабочих растворов выше +8 °С процессы таяния льда с нижней поверхности ледового покрытия могут превысить процессы конденсации водяных паров на этой же поверхности. Таким образом, может нарушиться тепловой баланс и это приведёт к разрушению (таянию) ледового покрытия, перемерзанию питающих трубопроводов, промерзанию штабеля в глубину, образованию ледяных глыб и т.д.

Согласно результатам компьютерного моделирования в ПК Frost 3D аварийное разрушение теплоизоляционного покрытия поверхности штабеля приводит к промерзанию пород тела штабеля на значительную глубину. На рис. 3 представлена температурная диаграмма продольного среза штабеля на 15 апреля 2018 г., проведённая в области аварийного разрушения теплоизоляции. Отчётливо видно, что в теле штабеля в области аварийного разрушения теплоизоляции произошло переохлаждение горных пород на значительную глубину (более 2 м).

<sup>1</sup> Практическое пособие по Frost.Термо. М.: ООО «НТЦ «Симмэйкерс»; 2024. 161 с.

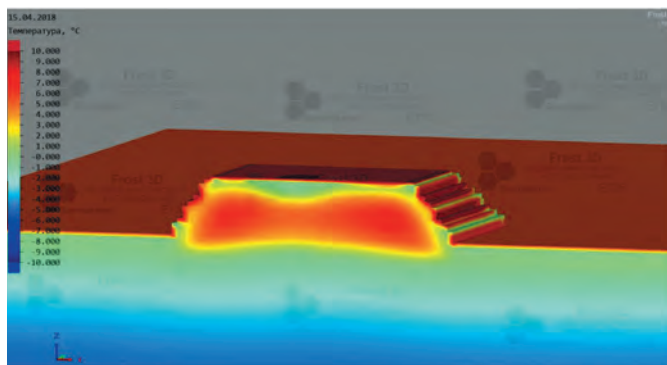


Рис. 3  
Температурная диаграмма  
продольного среза штабеля  
на 15 апреля 2018 г.

Fig. 3  
A temperature diagram of the  
stockpile longitudinal section  
as of April 15, 2018

### 2. Теплоизоляция подошвы штабеля от основания

На рис. 4 представлена температурная диаграмма продольного и поперечного среза рудного штабеля по результатам компьютерного моделирования в программном комплексе Frost3D. Многовариантные расчёты на 3D-модели рудного штабеля, проведенные в ПК Frost3D, показывают, что орошение рудного штабеля рабочими растворами с положительной температурой для климатических условий расположения месторождения в Алданском районе РС(Я) позволяет поддерживать температуру внутри штабеля выше +1 °С в холодный период года и оказывает растепляющее влияние на породы основания штабеля. Под рудным штабелем в породах основания формируется устойчивый положительный температурный режим.

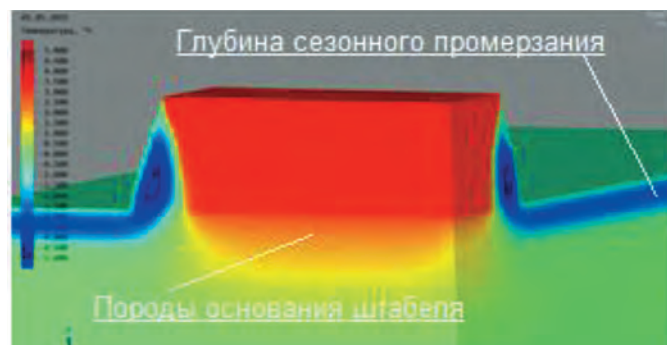


Рис. 4  
Температурная диаграмма  
продольного и поперечного  
среза рудного штабеля

Fig. 4  
A temperature diagram of the  
ore stockpile longitudinal and  
transversal sections

Таким образом, можно сделать вывод, что для климатических условий месторождения в Алданском районе РС(Я) теплоизоляция подошвы штабеля от основания не требуется.

### 3. Расчёт теплового режима рудного штабеля при различной теплоизоляции его поверхности

В зимний период снежный покров на бортах штабеля неустойчив. Из-за особенностей рельефа местности в течение зимнего периода борта штабеля могут полностью покрываться снежным покровом и полностью оголяться несколько раз. Причём, один борт может быть покрыт снежным покровом, а другой может быть оголён. Борты верхних ярусов покрыты минимальной толщиной снежного покрова или оголены.

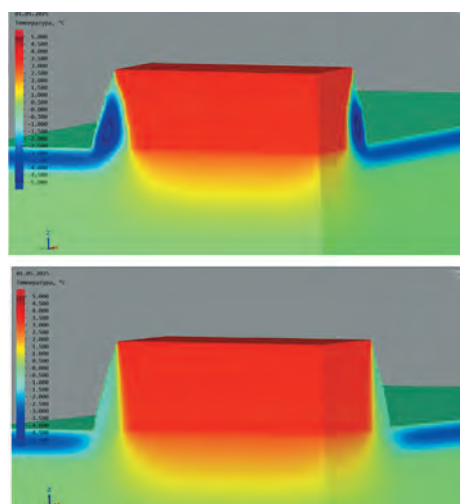


Рис. 5  
Температурная диаграмма  
поперечного среза штабеля  
на 1 мая: сверху –  
теплоизоляции бортов в  
зимний период нет;  
внизу – борты в зимний период  
открыты снегом толщиной 1 м

Fig. 5  
A temperature diagram of the  
stockpile transversal section  
on May 1st: on top - no  
thermal insulation of the walls  
in the winter period; below -  
the walls in the winter period  
are covered with a 1 meter-  
thick layer of snow

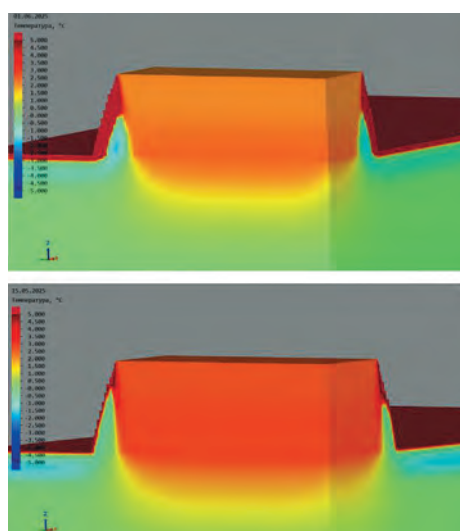
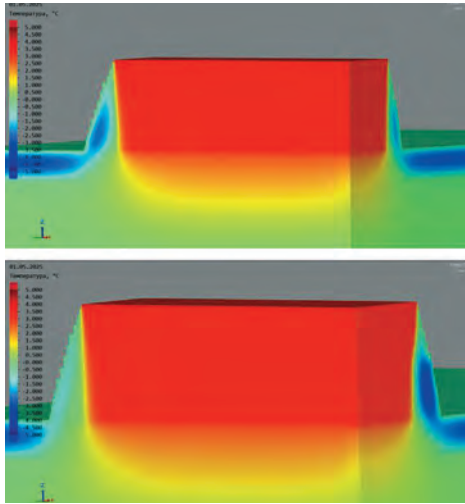


Рис. 6  
Температурная диаграмма  
поперечного среза штабеля:  
сверху на 1 июня –  
теплоизоляции бортов  
в зимний период нет;  
внизу на 15 мая – борты  
в зимний период открыты  
снегом толщиной 1 м

Fig. 6  
A temperature diagram of the  
stockpile transversal section:  
on top, June 1st - no thermal  
insulation of the walls in the  
winter period; below May 15th  
- the walls in the winter period  
are covered with a 1 meter-  
thick layer of snow

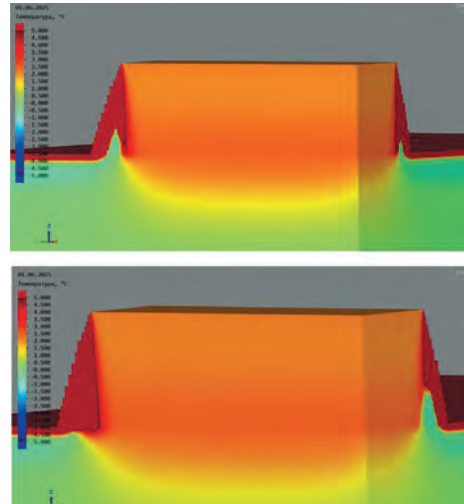
Проведены расчёты теплового режима рудного штабеля при различных условиях теплоизоляции его поверхности. Температура растворов +3–+6 °С. Скорость фильтрации растворов зимой 0,25 м/сут, летом 1 м/сут. Высота штабеля 10 м. Горизонтальная поверхность штабеля зимой теплоизолирована льдом толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 5 см и укрыта снегом согласно климатическим данным (см. рис. 2).

На рис. 5 представлен срез штабеля на 1 мая, слева – теплоизоляции бортов в зимний период нет; справа – борты в зимний период открыты снегом толщиной 1 м. На рис. 6



**Рис. 7**  
Температурная диаграмма поперечного среза штабеля на 1 мая:  
вверху – теплоизоляции бортов в зимний период плёнкой с воздушным прослоем 3 см;  
внизу – один борт в зимний период укрыт снегом толщиной 1 м, другой борт – плёнкой с воздушным прослоем 1 см

**Fig. 7**  
A temperature diagram of the stockpile transversal section on May 1st:  
on top - thermal insulation of the walls in the winter period using a film having an air interlayer of 3 cm;  
below - one walls in the winter period is covered with a 1 meter-thick layer of snow;  
another wall - with a film having an air interlayer of 1 cm



**Рис. 8**  
Температурная диаграмма поперечного среза штабеля на 1 июня:  
вверху – теплоизоляции бортов в зимний период плёнкой с воздушным прослоем 3 см;  
внизу – один борт в зимний период укрыт снегом толщиной 1 м, другой борт – плёнкой с воздушным прослоем 1 см

**Fig. 8**  
A temperature diagram of the stockpile transversal section on June 1st:  
on top - thermal insulation of the walls in the winter period using a film having an air interlayer of 3 cm;  
below - one walls in the winter period is covered with a 1 meter-thick layer of snow;  
another wall - with a film having an air interlayer of 1 cm

представлен срез штабеля: вверху на 1 июня – теплоизоляции бортов в зимний период нет; внизу на 15 мая – борта в зимний период укрыты снегом толщиной 1 м.

Как видно из рис. 5, 6, штабель без теплоизоляции бортов к 1 мая имеет температуру пород в откосах ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ , через месяц, к 1 июня, имеет со стороны откосов зоны переохлаждённых пород ниже  $0^{\circ}\text{C}$  значительного размера. Штабель, борта которого были укрыты снегом толщиной до 1 м, имеет положительную температуру пород уже через 2 недели к 15 мая. Штабель, не имеющий теплоизоляцию бортов, прогревается полностью только к 15 июня.

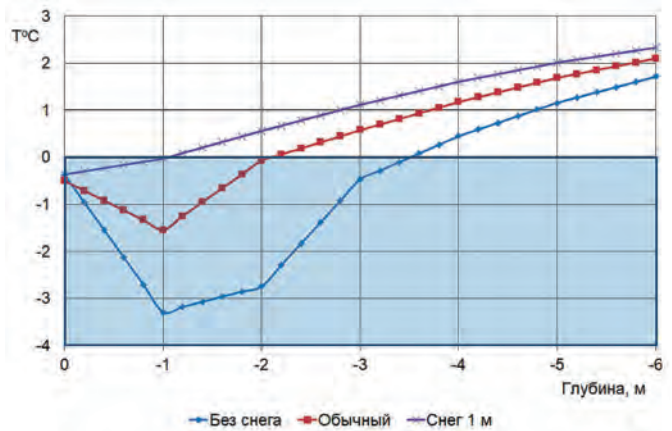
На рис. 7 и 8 представлен срез штабеля на 1 мая и 1 июня соответственно: вверху – теплоизоляции бортов в зимний период плёнкой с воздушным прослоем 3 см; внизу – один борт в зимний период укрыт снегом толщиной 1 м, другой борт – плёнкой с воздушным прослоем 1 см.

Как видно из рис. 7, на 1 мая породы бортов штабеля под плёнкой с воздушным прослоем 3 см промёрзли, но температура пород не ниже  $-2^{\circ}\text{C}$ . Породы под плёнкой с воздушным прослоем 1 см промёрзли значительно, но меньше, чем борта совсем без теплоизоляции (см. рис. 5, вверху). Как видно из рис. 8, борта под плёнкой с воздушным прослоем 3 см к 1 июня оттаяли почти полностью, плёнкой с воздушным прослоем 1 см имеют зону переохлаждённых пород, но меньше, чем борта совсем без теплоизоляции (см. рис. 8, вверху).

На рис. 9–11 представлены графики глубины промерзания бортов штабеля под различными видами теплоизоляции: без теплоизоляции; снег соответствует климату; снег толщиной 1 м; лёд толщиной 0,1 м без снега; лёд толщи-

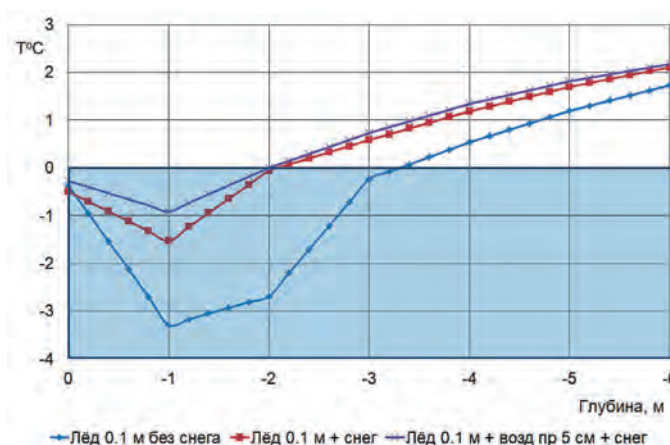
ной 0,1 м, покрытый снегом в соответствии с климатом; лёд толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 5 см, покрытый снегом в соответствии с климатом; лёд толщиной 0,1 м с воздушным прослоем 5 см, покрытый снегом толщиной 1 м; плёнкой с воздушным прослоем 1 см; плёнкой с воздушным прослоем 3 см.

Как видно из графиков рис. 9–11, наиболее оптимальным вариантом теплоизоляции бортов штабеля является: борта (откосы) нижнего яруса штабеля теплоизолировать сне-



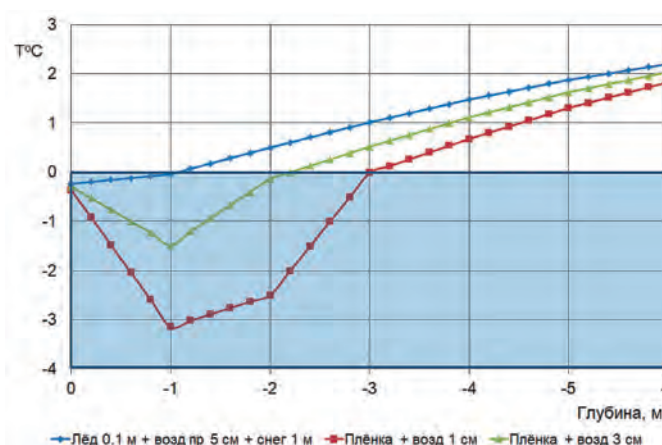
**Рис. 9**  
Графики глубины промерзания бортов штабеля без теплоизоляции и под снегом в качестве вида теплоизоляции

**Fig. 9**  
Charts of the stockpile wall freezing depth without thermal insulation and under snow used as a kind of thermal insulation



**Рис. 10**  
Графики глубины промерзания бортов штабеля под льдом в качестве вида теплоизоляции

**Fig. 10**  
Charts of the stockpile wall freezing depth under ice used as a kind of thermal insulation



**Рис. 11**  
Графики глубины промерзания бортов штабеля под льдом и пленкой с разным воздушным прослоем в качестве теплоизоляции

**Fig. 11**  
Charts of the stockpile wall freezing depth under ice and films with various thickness of the air interlayer used as a kind of thermal insulation

гом толщиной 1 м; борта (откосы) верхних ярусов штабеля теплоизолировать плёнкой с воздушным прослоем 3 см. В случае невозможности применить плёнку – проводить теплоизоляцию бортов льдом толщиной не менее 0,1 м.

### Заключение

Таким образом, современные методы моделирования позволяют построить и внедрить 3D-модели рудного штабеля, учитывающие геометрию строения, фильтрацию рабочих растворов, погодные условия (температуру, скорость ветра, толщину снежного покрова, инсоляцию), теплоизоляцию поверхности рудного штабеля. Это позво-

ляет провести в программном комплексе Frost3D многовариантные численные расчёты теплового режима рудного штабеля при различных режимах орошения и способов теплоизоляции боковой поверхности, а также режимах его орошения и этапов возведения (как в горизонтальном, так и вертикальном плане). Всё это позволяет с высокой долей надёжности спрогнозировать тепловой режим рудного штабеля в процессе его эксплуатации в суровых климатических условиях Восточной Сибири и определить оптимальные варианты теплоизоляции бортов штабеля.

### Список литературы / References

1. Medina D., Anderson C.G. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. *Metals*. 2020;10(7):897. <https://doi.org/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*. 2016;37(2):73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
3. Mellado M.E., Cisternas L.A., Lucay F.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(2):44. <https://doi.org/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(10):180. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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;259:30–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.7>  
Marinin M.A., Karasev M.A., Posphehov G.B., Pomortseva A.A., Kondakova V.N., Sushkova V.I. Comprehensive study of filtration properties of pelletized sandy clay ores and filtration modes in the heap leaching stack. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:30–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.7>
7. Хабиров В.В., Забельский В.К., Воробьёв А.Е. *Прогрессивные технологии добычи и переработки золотосодержащего сырья*. М.: Недра; 1994. 268 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/2420> (дата обращения: 17.12.2024).
8. Игнатов А.А. *Физико-химические процессы горного производства: математические модели выщелачивания руд и оттаивания мерзлых пород*. М.: Наука; 1986. 96 с.
9. Татауров С.Б. *Трансформация и переработка золотосодержащего сырья в криолитозоне*. М.: Горная книга; 2008. 318 с.

10. Татаринов С.М., Хомутов А.В., Косякова О.В., Седых В.И. Применение кучного выщелачивания золота в условиях Крайнего Севера. *Цветные металлы*. 2010;(11):44–46. Режим доступа: <https://rudmet.net/journal/488/article/4755/> (дата обращения: 17.12.2024).  
Tatarinov S.M., Khomutov A.V., Kosyakova O.V., Sedykh V.I. Usage of heap leaching of gold in the conditions of High North. *Tsvetnye Metally*. 2010;(11):44–46. (In Russ.) Available at: <https://rudmet.net/journal/488/article/4755/> (accessed: 17.12.2024).
11. Ковалёв В.Н., Муслимов Б.А., Клепиков А.С. Математическое моделирование кучного выщелачивания золота в зонах многолетней мерзлоты. *Горный журнал*. 2013;(7):37–40. Режим доступа: <https://rudmet.net/journal/1212/article/20548/> (дата обращения: 17.12.2024).  
Kovalev V.N., Muslimov B.A., Klepikov A.S. Mathematical modeling of gold heap leaching in permafrost zones. *Gornyi Zhurnal*. 2013;(7):37–40. (In Russ.) Available at: <https://rudmet.net/journal/1212/article/20548/> (accessed: 17.12.2024).
12. Кашуба С.Г., Лесков М.И. Кучное выщелачивание в российской практике – обзор опыта и анализ перспектив. *Золото и технологии*. 2014;(1):10–14. Режим доступа: [https://zolteh.ru/technology\\_equipment/kuchnoe\\_vyshchelachivanie\\_v\\_rossiyskoy\\_praktike\\_obzor\\_opyta\\_i\\_analiz\\_perspektiv/](https://zolteh.ru/technology_equipment/kuchnoe_vyshchelachivanie_v_rossiyskoy_praktike_obzor_opyta_i_analiz_perspektiv/) (дата обращения: 17.12.2024).  
Kashuba S.G., Leskov M.I. Heap leaching in the Russian practice: a review of experience and analysis of prospects. *Zoloto i Tekhnologii*. 2014;(1):10–14. (In Russ.) Available at: [https://zolteh.ru/technology\\_equipment/kuchnoe\\_vyshchelachivanie\\_v\\_rossiyskoy\\_praktike\\_obzor\\_opyta\\_i\\_analiz\\_perspektiv/](https://zolteh.ru/technology_equipment/kuchnoe_vyshchelachivanie_v_rossiyskoy_praktike_obzor_opyta_i_analiz_perspektiv/) (accessed: 17.12.2024).
13. McBride D., Gebhardt J.E., Croft T.N., Cross M. Modeling the hydrodynamics of heap leaching in sub-zero temperatures. *Minerals Engineering*. 2016;90:77–88. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.3390/min8010009>
15. Попов В.И., Каймонов М.В. Определение оптимальных параметров процесса выщелачивания в рудном штабеле при отрицательных температурах окружающей среды. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S24):292–298. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-11-24-292-298>  
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. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(S24):292–298. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-11-24-292-298>
16. Перльштейн Г.З. *Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние; 1979. 304 с.
17. Павлов А.В. *Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние; 1980. 240 с.
18. Гаврильев Р.И. *Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2004. 145 с.
19. Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И., Гаврильев Р.И. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения; 1988. 240 с.
20. 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: Гео; 2011. 139 с. Режим доступа: <https://igds.ysn.ru/themes/IGDS/images/Monografi/Kurilko.pdf> (дата обращения: 17.12.2024).

**Информация об авторах**

**Каймонов Михаил Васильевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2506-8349>; e-mail: [gtf@igds.ysn.ru](mailto:gtf@igds.ysn.ru)

**Матвеев Андрей Иннокентьевич** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>; e-mail: [andrei.mati@mail.yandex.ru](mailto:andrei.mati@mail.yandex.ru)

**Хосоев Доржо Владимирович** – младший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: [hosoev70@mail.ru](mailto:hosoev70@mail.ru)

**Information about the authors**

**Mikhail V. Kaimonov** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2506-8349>; e-mail: [gtf@igds.ysn.ru](mailto:gtf@igds.ysn.ru)

**Andrey I. Matveev** – Dr. Sci. (Eng.), leading researcher, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>; e-mail: [andrei.mati@mail.yandex.ru](mailto:andrei.mati@mail.yandex.ru)

**Dorzho V. Hosoev** – Junior Research Fellow, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: [hosoev70@mail.ru](mailto:hosoev70@mail.ru)

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 13.11.2024

Поступила после рецензирования: 09.01.2025

Принята к публикации: 10.01.2025

**Article info**

Received: 13.11.2024

Revised: 09.01.2025

Accepted: 10.01.2025