

## ИСКУССТВЕННОЕ ПРОМОРАЖИВАНИЕ НАКОПЛЕННЫХ ОБВОДНЕННЫХ ОСЫПЕЙ НА ДНЕ ОТРАБОТАННОГО КИМБЕРЛИТОВОГО КАРЬЕРА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

*Курилко А.С., Соловьев Д.Е., Романова Е.К.*

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения  
Российской академии наук, Якутск*

**Ключевые слова:** отработанный кимберлитовый карьер, обводненная породная осыпь, техногенное озеро, криолитозона, сезонно-охлаждающие устройства, жидкостные замораживающие колонки, атмосферный и искусственный холод, математическое моделирование.

**Аннотация.** В качестве одного из способов обеспечения безопасных условий ведения горных работ на действующем руднике «Интернациональный» АК «АЛРОСА», отработывающем подкарьерные запасы, и предотвращения чрезвычайной ситуации из-за внезапного прорыва накопленной на дне отработанного карьера обводненной породной осыпи предлагается ее искусственное промораживание двумя способами: с использованием сезонно-охлаждающих устройств и жидкостных замораживающих колонок с принудительной циркуляцией хладоносителя. На основе математического моделирования с учетом применяемого способа промораживания породной осыпи, влияния температурных условий на поверхности, расположения и взаимовлияния замораживающих колонок и т.д., проведены многовариантные теплофизические расчеты, по результатам которых определены продолжительность промерзания обводненной осыпи для различных схем расположения замораживающих колонок. В целях максимального сокращения времени промораживания рекомендована шахматная схема размещения замораживающих колонок. Подчеркивается, что сформированный на дне отработанного карьера ледопородный массив обладает высокой несущей способностью. В условиях криолитозоны при искусственно поддерживаемом отрицательном температурном режиме в период эксплуатации ледопородный массив будет выполнять функции искусственного предохранительного целика, защищая действующий рудник от возможного внезапного прорыва вод и пульпообразных породных масс.

## ARTIFICIAL FREEZING OF ACCUMULATED FLOODED SCREES AT THE BOTTOM OF AN EXHAUSTED KIMBERLITE QUARRY IN THE PERMAFROST ZONE

*Kurilko A.S., Solovov D.E., Romanova E.K.*

*Chersky Mining Institute of the North Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk*

**Keywords:** exhausted kimberlite quarry, flooded scree, technogenic lake, permafrost zone, seasonal cooling devices, liquid freezing columns, atmospheric and artificial cold, mathematical modeling.

**Abstract.** As one of the ways to ensure safe conditions for mining operations at the existing mine "Internatsionalny" of AK "ALROSA", which develops under-pit reserves, and to prevent an emergency due to a sudden breakthrough of watered rock scree accumulated at the bottom of a worked-out quarry, its artificial freezing is proposed in two ways: using seasonal cooling devices and liquid freezing columns with forced circulation of the coolant. On the basis of mathematical modeling, taking into account the method of freezing of rock scree, the influence of temperature conditions on the surface, the location and mutual influence of freezing columns, etc., multivariant thermophysical calculations were carried out, the results of which determined the duration of freezing of watered scree for various layouts of freezing columns. In order to minimize the freezing time, a staggered arrangement of freezing columns is recommended. It is emphasized that the ice-rock mass formed at the bottom of the worked-out quarry has a high bearing capacity. Under the conditions of the permafrost zone, with an artificially maintained negative temperature regime during the operation period, the ice-rock mass will act as an artificial safety pillar, protecting the existing mine from a possible sudden breakthrough of water and pulp-like rock masses.

### Введение

Как показывает практика, с течением времени на дне отработанных кимберлитовых карьеров Якутии образуются мощные осыпи из обрушившихся обводненных горных пород и при отсутствии водоотлива техногенные озёра, которые формируют дополнительную нагрузку на предохранительный целик, что впоследствии может привести к его разрушению,

и вследствие чего не исключается опасность внезапного прорыва скопившихся вод и пульпы в подземные горные выработки рудников [1-3]. В частности, такая ситуация возникла на руднике «Интернациональный» АК «АЛРОСА», где из пород, обрушившихся с бортов, на дне карьера образовался водонасыщенный массив значительной мощности (около 45 м) с наличием на поверхности техногенного озера глубиной 6,5 метров (рис. 1).

Одним из наиболее приемлемых выходов из сложившейся крайне непростой ситуации с учетом невозможности технической ликвидации накопленных обводненных осыпей может быть их криогенная консервация путем принудительной проморозки. Таким способом будет образовано ледопородное сооружение (целик), обладающий высокой несущей способностью.

Способы искусственного замораживания грунтов нашли применение практически во всех областях строительства: шахтном, промышленном, гидротехническом, при строительстве метрополитенов и т.д. [4-9]. Их, в частности, применяют для создания монолитного ледопородного основания в фундаментах инженерных сооружений, образования противодиффузионных ледопородных завес в насыпных плотинах хвостохранилищ обогатительных фабрик, сооружения плавучих ледяных платформ на шельфах северных морей, грунтовых аккумуляторов холода в криолитозоне и в других целях [10-14]. Применяются как энергетические, так и безэнергетические способы.

Одним из безэнергетических способов искусственного замораживания грунтов является применение сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ). Устройства такого типа представляют собой металлическую герметично запаянную трубу, состоящую из конденсатора с оребрением (надземная часть) и испарителя (подземная часть). Внутри трубы находится хладагент (фреон, аммиак, углекислота). Принцип действия СОУ заключается в переносе тепла вследствие испарения в испарителе хладагента и его поднятия в конденсаторную часть, где пар конденсируется, отдавая тепло, и стекает по внутренним стенкам трубы вниз [15]. Важной особенностью СОУ является то, что они не нуждаются во внешних источниках энергии и функционируют с использованием естественного атмосферного холода, соответственно в зимнее время.

При необходимости ускоренного замораживания пород в круглогодичном режиме чаще всего применяют энергетические – жидкостные или воздушные устройства, работающие на искусственно вырабатываемом холоде с принудительной циркуляцией хладоносителя. При этом жидкостные имеют значительные преимущества, по сравнению с воздушными, которые зачастую через короткое время забиваются льдом и инеем, а восстановление их работоспособности требует значительных затрат энергии и рабочего времени, что также немаловажно [16, 17].

В данной работе представлены результаты исследований с использованием методов математического моделирования по промораживанию обводненных осыпей скопившихся на дне отработанного кимберлитового карьера криолитозоны с использованием СОУ и жидкостных охлаждающих устройств с принудительной циркуляцией хладоносителя.

### Методы исследований

Для оценки эффективности и прогнозирования скорости промерзания обводненной породной осыпи в отработанном карьере при ее искусственном замораживании были

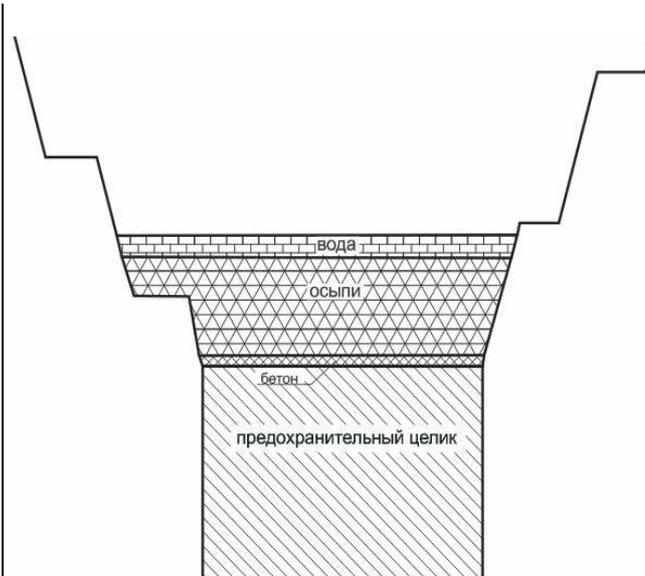


Рис. 1. Схема отработанного карьера «Интернациональный» АК «АЛРОСА»

разработаны трехмерные математические модели для указанных выше типов охлаждающих устройств (ОУ). В каждой модели учитывался ряд параметров, в том числе, фазовый переход влаги, динамику температурных условий на поверхности, расположение и взаимовлияние замораживающих колонок и др. [18].

Замораживание толщи обводненных осыпей производится с помощью одиночных вертикальных ОУ, устанавливаемых в скважинах на требуемую глубину. Были исследованы два вида схемы расположения ОУ: шахматная и квадратная (см. рис. 2).

Необходимо отметить, что при построении трехмерных математических моделей рассматривалась не вся площадь породной осыпи, а отдельно выделенный участок, на котором расположены три или четыре замораживающие колонки в зависимости от принятой схемы их размещения. Принято допущение, что через боковые поверхности выделенных участков тепловые потоки отсутствуют. Данный подход позволяет определить скорость промерзания пород в области между колонками и существенно снизить затраты машинного времени на проведение численных расчетов.

Процесс распространения тепла в расчетной области описывается с помощью нестационарного уравнения теплопроводности с учетом фазовых переходов влаги и внутренних источников тепла [19]:

$$C_{эфф}(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(x, y, z, t), \quad (1)$$

где  $C_{эфф}$  – эффективная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К),  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности пород (воды), Вт/(м·К),  $q$  – интенсивность внутренних источников тепла, Вт/м<sup>3</sup>.

На поверхности водоема  $\Gamma_{нов.вод}$  задается граничное условие третьего рода, моделирующее конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела с атмосферным воздухом:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n_{\Gamma_{нов.вод}}} = \alpha_{нов.вод} \cdot (T - T_{воз}), \quad (2)$$

где через  $\partial / \partial n_{\Gamma_{нов.вод}}$  обозначена внешняя нормаль к границе  $\Gamma_{нов.вод}$ ;  $\alpha_{нов.вод}$  – коэффициент теплоотдачи через поверхность водоема с учетом снежного покрова, ветра на дне карьера, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_{воз}$  – температура воздуха на дне карьера, °С.

На границах теплового влияния  $\Gamma_{m.в}$  и симметрии  $\Gamma_c$  задается граничное условие второго рода:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n_{\Gamma_{m.в}}} = 0, \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n_{\Gamma_c}} = 0, \quad (3)$$

где  $\partial / \partial n_{\Gamma_{m.в}}$ ,  $\partial / \partial n_{\Gamma_c}$  – внешние нормали к границам  $\Gamma_{m.в}$  и  $\Gamma_c$ , соответственно.

В начальный момент времени задается начальное распределение температуры в расчетной области:

$$T(x, y, z, 0) = T^0(x, y, z). \quad (4)$$

Численная реализация математических моделей осуществлялась методом конечных разностей [20-22].

### Результаты численного моделирования

Расчеты проводились при исходных физико-механических и теплофизических параметров породной осыпи (были получены на основе лабораторных испытаний [23] образцов породной осыпи и данных фондовых источников): естественная температура породной осыпи – 0°С; температура фазового перехода воды – минус 1°С; коэффициент

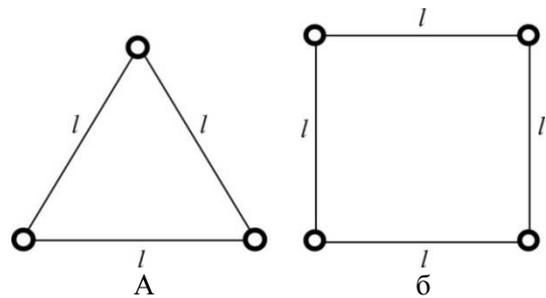


Рис. 2. Схемы расположения ОУ, где  $l$  – расстояние между ОУ:

а) шахматная схема б) квадратная схема

теплопроводности пород в талом и мерзлом состояниях соответственно 1,73 и 1,85 Вт/(м·К); удельная теплоемкость скелета породы – 887 Дж/(кг·К); плотность пород – 2000 кг/м<sup>3</sup>; влажность пород – 0,15 д.е. Климатические условия (среднесуточные температуры воздуха, среднемесячные скорости ветра и толщины снега) заимствованы из справочных материалов по климату Мирнинского района РС(Я).

Начало расчетов осуществляется с начала октября, когда устанавливаются устойчивые отрицательные среднесуточные температуры воздуха на дне карьера.

Необходимо отметить, что в первый год СОУ устанавливаются и включаются, когда в зимнее время ледовый покров на водоеме достигает требуемой толщины, выдерживающей нагрузку буровых установок. В последующие годы СОУ включаются, когда температура воздуха на дне карьера опускается ниже -10°C.

Расчеты показали, что интенсивность промерозки толщи осыпей СОУ значительно зависит от схемы их расположения и шага установки (см. рис. 3). При шахматном расположении СОУ в 3 м друг от друга в первый год их эксплуатации в значительном объеме насыпных пород устанавливается отрицательная температура, которая в конце лета составляет -7,9 ÷ -1,5°C. А при квадратной схеме расположения СОУ с дистанцией 4 м между ними в первый год эксплуатации СОУ мерзлая зона составляет только 41% от общего объема насыпных пород. В этом случае для достижения устойчивой отрицательной температуры в массиве насыпных пород понадобится трехлетняя эксплуатация СОУ (рис. 4). В остальных вариантах схем расположения СОУ после их двухлетней эксплуатации в массиве насыпных пород устанавливается устойчивая отрицательная температура, что позволяет в последующем их отключить. Результаты расчетов показывают, что в последующие годы после отключения СОУ мерзлое состояние насыпного массива сохраняется и породы на дне карьера постепенно переходят на естественный сезонный температурный режим.

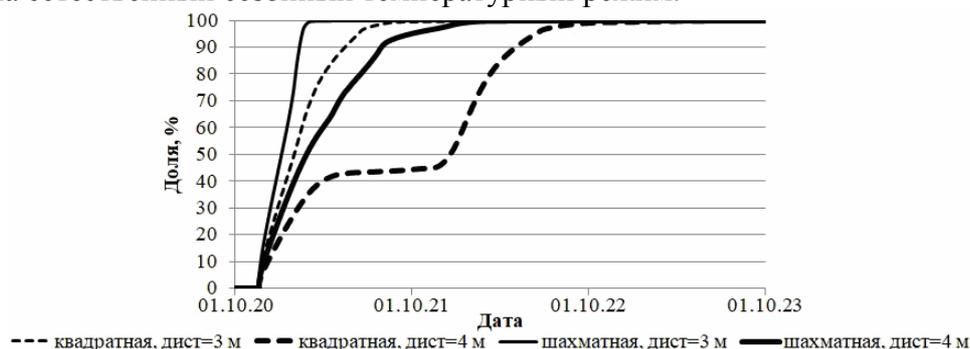


Рис. 3. Динамика изменения доли мерзлых пород в осыпи при различных схемах расположения СОУ за первые 3 года эксплуатации

В таблицу 1 сведены результаты расчетов показателей полной промерозки толщи породной осыпи на дне карьера с помощью СОУ (количество зимних сезонов эксплуатации СОУ, температура в массиве насыпных пород в конце летнего сезона), из которой можно выбрать оптимальные параметры СОУ (диаметр труб и шаг установки).

Табл. 1. Результаты расчета показателей полной промерозки толщи породной осыпи на дне карьера с помощью СОУ (количество зимних сезонов эксплуатации СОУ, температура в массиве пород в конце летнего сезона) в зависимости от шага установки и диаметра СОУ при шахматной схеме их расположения

| Показатели                | Диаметр СОУ, м   |           |           |           |           |           |
|---------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                           | 0,089            |           |           | 0,057     |           |           |
|                           | Шаг установки, м |           |           |           |           |           |
|                           | 3                | 4         | 6         | 3         | 4         | 6         |
| Количество зимних сезонов | 1                | 2         | 4         | 1         | 2         | 4         |
| Летняя температура, °С    | -5,0÷-1,9        | -8,5÷-3,0 | -4,5÷-1,2 | -2,0÷-1,3 | -3,5÷-1,4 | -3,4÷-1,1 |

Как видно из таблицы 1 применение СОУ увеличенного диаметра, способствует повышению интенсивности проморозки пород осыпи на дне карьера.

Проведенные исследования выявили, что при промораживании породной осыпи с использованием жидкостных замораживающих колонок принудительного действия также как и при использовании СОУ интенсивность проморозки ее толщи значительно зависит от схемы их расположения и шага установки. На рисунках 4 и 5, показано температурное поле по горизонтальному и вертикальному сечению породной осыпи между замораживающими колонками для квадратной схемы их размещения и температуре хладоносителя  $-15^{\circ}\text{C}$ . Расстояние между колонками составляет 3 метра.

На рисунке 4 показано температурное поле по горизонтальному сечению расчетного участка на глубине 20 метров от поверхности спустя 4 месяца (121 день) после начала работы системы замораживания. Видно, что происходит прогрессирующее промерзание пород между колонками, при этом в средней части остается зона талых пород с температурой выше  $-1^{\circ}\text{C}$ . Для полного промерзания пород (рис. 5) при данной схеме расположения колонок необходима работа системы замораживания в течение чуть более 6 месяцев (191 день).

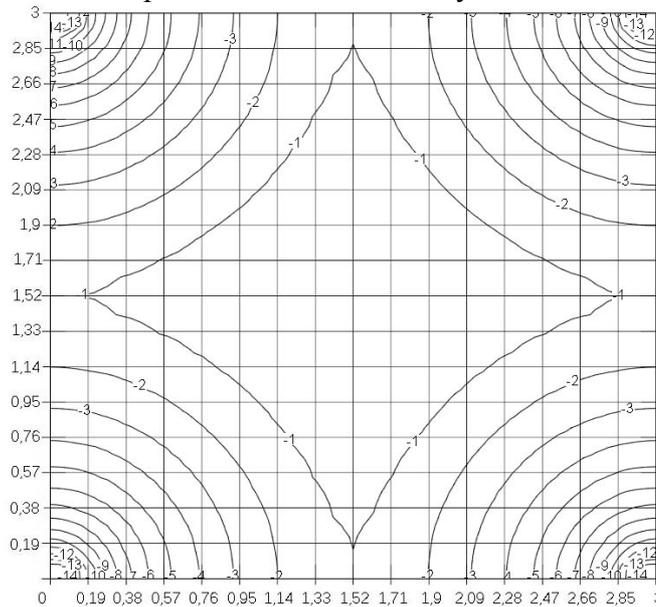


Рис. 4. Температурное поле в породной осыпи при квадратной схеме размещения замораживающих колонок, по истечении 121 дня (горизонтальное сечение на глубине 20 м от поверхности)

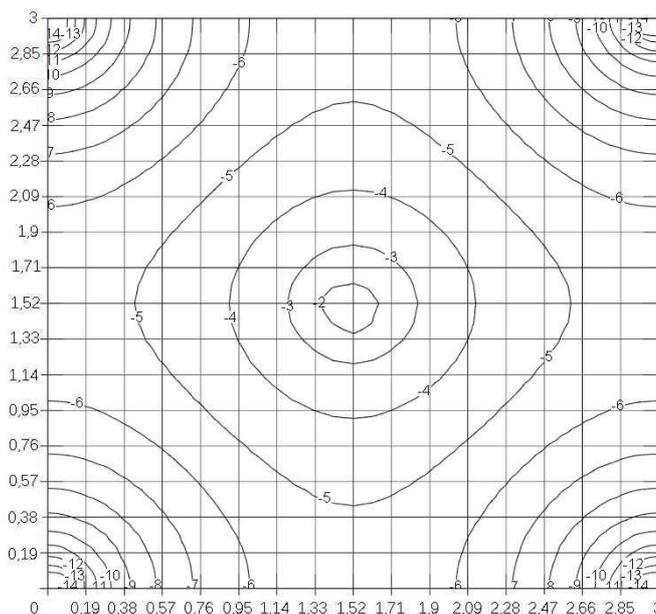


Рис. 5. Температурное поле в породной осыпи при квадратной схеме размещения замораживающих колонок, по истечении 191 дня (горизонтальное сечение на глубине 20 м от поверхности)

Шахматная схема расположения замораживающих колонок существенно сокращает время полного промораживания породной осыпи и для случая, когда расстояние между колонками составляет 3 метра этот процесс займет 150 дней (рис. 6).

Понижение температуры хладоносителя до  $-20^{\circ}\text{C}$ , при данной схеме расположения замораживающих колонок, позволяет дополнительно сократить время промораживания породной осыпи на 35 дней. В этом случае промерзание пород между колонками произойдет за 115 дней, т.е. практически за 4 месяца.

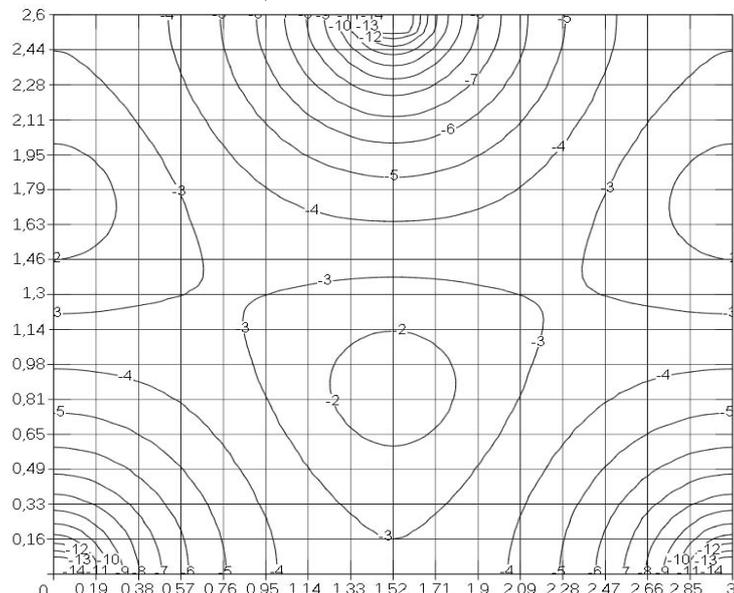


Рис. 6. Температурное поле в породной насыпи при шахматной схеме размещения замораживающих колонок, располагающихся на расстоянии 3 метров друг от друга, по истечении 150 дней (горизонтальное сечение на глубине 20 м от поверхности)

В таблице 2 сведены параметры шага установки (для шахматной схемы расположения замораживающих колонок с принудительной циркуляцией хладоносителя), температуры хладоносителя, времени затрачиваемого на промерзание пород между замораживающими колонками и их общего количества необходимого для промораживания всего объема породной осыпи на дне карьера.

Табл. 2. Время промерзания пород между замораживающими колонками и их общее количество при шахматной схеме расположения

| Расстояние между колонками, м | Температура хладоносителя, $^{\circ}\text{C}$ | Время затрачиваемой на промерзание пород между замораживающими колонками, дни | Общее количество замораживающих колонок, шт. |
|-------------------------------|---|---|--|
| 3                             | -15   | 150 (5 месяцев)   | 1123   |
|                               | -20   | 115 (3 месяца 25 дней)  |  |
| 5                             | -15   | 524 (1 год 5 месяцев 9 дней)  | 405  |
|                               | -20   | 402 (1 год 1 месяц 7 дней)  |  |
| 6                             | -15   | 799 (2 года 2 месяцев 9 дней)   | 281  |
|                               | -20   | 615 (1 год 8 месяцев 10 дней)   |  |
| 7                             | -15   | 1135 (3 года 1 месяц 10 дней)   | 206  |
|                               | -20   | 876 (2 года 4 месяца 26 дней)   |  |

Сравнивая оба способа промораживания (СОУ и замораживающие колонки с принудительной циркуляцией хладоносителя) породной осыпи на дне карьера можно отчетливо увидеть разницу в скорости этого процесса при изменении расстояния между колонками при шахматной схеме их расположения. При расстоянии между замораживающими колонками 3 метра проморозка массива в обоих способах займет один

зимний сезон, но потребуется пробурить более 1100 скважин для их установки. Увеличивая расстояние между колонками до 6 метров можно добиться сокращения их количества практически в четыре раза, но в этом случае при использовании СОУ время промораживания породной осыпи займет 4 года, что в 2 раза дольше чем при использовании замораживающих колонок с принудительной циркуляцией хладоносителя.

Таким образом, как показали результаты математического моделирования проморозку обводненных породных осей на дне карьера «Интернациональный» возможно осуществить обоими предложенными способами: СОУ и замораживающими колонками с принудительной циркуляцией хладоносителя, тем самым, обеспечивая безопасные условия подземной разработки подкарьерных запасов кимберлитовой руды. Выбор способа проморозки и шага установки замораживающих колонок должен проводиться после детального технико-экономического сравнения различных вариантов учитывающих расстояние между колонками, времени проморозки породной осыпи, стоимостью оборудования и буровыми работами, затратами на эксплуатацию системы замораживания на весь срок работы и др.

### **Заключение**

Для предотвращения возможной чрезвычайной ситуации в действующем руднике при внезапном прорыве скопившихся на дне отработанного кимберлитового карьера криолитозоны обводненных породных масс, одним из рациональных превентивных мероприятий является их искусственная проморозка с образованием монолитного ледопородного сооружения (целика), обладающего высокой несущей способностью.

Рассмотрены два способа проморозки обводненной породной осыпи и стабилизации отрицательного температурного режима образованного ледопородного целика, с использованием замораживающих колонок с принудительной циркуляцией хладоносителя и сезонно-охлаждающих устройств.

В результате проведения многовариантных расчетов на разработанных трехмерных математических моделях на примере кимберлитового карьера «Интернациональный» определено время (продолжительность) промерзания пород между замораживающими колонками при различных схемах их расположения.

Как показали численные расчеты шахматная схема расположения замораживающих колонок позволяет максимально сократить время промораживания породной осыпи для обоих способов (СОУ и замораживающие колонки с принудительной циркуляцией хладоносителя).

Разработанные по результатам исследований рекомендации могут найти применение при выборе рациональных параметров проморозки водонасыщенных породных осей на дне отработанных кимберлитовых карьеров Севера с использованием системы сезонно охлаждающих колонок или замораживающих колонок с принудительной циркуляцией хладоносителя, обеспечивающих безопасные условия подземной разработки подкарьерных запасов кимберлитовой руды.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0021, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800083-0) с использованием приборной базы ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

### **Список литературы**

1. Zarovnyaev B.N., Akishev A.N., Shubin G.V., Budikina M.E., Sobakina M.P. Technology of final extraction of the reserves of deep diamond quarries using mining equipment with remote control // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. – SGEM, 2019. – P. 629-634.
2. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Красюкова Е.В. Обоснование параметров опасных зон при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений Якутии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 3. – С. 48-60.
3. Мальцева И.А. Обоснование и выбор параметров отработки подкарьерных запасов трубки "Мир" // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 7. – С. 120-123.
4. Вакуленко И.С. Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 3. – С. 338-346.

5. Кузнецов Г.И. Мерзлотные подпорные стены в гидротехническом строительстве // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 1(709). – С. 76-83.
6. Семин М.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С. Выбор параметров и обоснование режима работы замораживающих колонок для поддержания толщины ледопородного ограждения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 5. – С. 194-205.
7. Liu Z., Sun Y., Wang B., Li Q. Experimental study of artificial ground freezing by natural cold gas injection // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no. 17, p. 6055. DOI: 10.3390/app10176055.
8. Andersland O.B., Ladanyi B. Frozen ground engineering (2nd edition). – John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2004. – 363 p. – DOI: 10.1017/s003224740529441x.
9. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A.P. Artificial groundfreezing: a review of thermal and hydraulic aspects // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, vol. 104, p. 103534. doi.org/10.1016/j.tust.2020.103534.
10. Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Соловьев Д.Е. Расчет температурного поля засоленных горных пород в устьевой части вертикального ствола при работе замораживающей системы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №3. – С. 176-184.
11. Ahmed Marwan, Meng-Meng Zhou, M. Zaki Abdelrehim, Günther Meschke. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow // Computers and Geotechnics. 2016, vol. 75, pp. 112-125. doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.004.
12. Цыбин С.С. Обзор систем термостабилизации ММГ и оценка эффективности работы термостабилизатора в конкретных климатических условиях // Аллея науки. – 2017. – Т. 2, № 9. – С. 432-439.
13. Лихачев Е.С., Молчанов С.А. Методы термостабилизации вечномерзлых грунтов и разработка перспективных установок замораживания грунтов // Академическая публицистика. – 2018. – № 10. – С. 14-19.
14. Choi S., Lee S., Son K., Kim Y. The effects of operation variables on the cooling seasonal efficiency of a residential air conditioner with an inverter compressor // ACRA. 8th Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning. 2016.
15. Васильев В.И., Сидняев Н.И. Моделирование распределения нестационарных температурных полей в криолитозоне при проектировании геотехнических сооружений: учеб. пособие. – М.: КУРС, 2017. – 624 с.
16. Степанов А.В., Попенко А.В., Рожин И.И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. – Новосибирск: Наука, 2014. – 448 с.
17. Анисимов В.А. Экспериментальное исследование жидкостной замораживающей системы // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1983. – №9. – С. 86-92.
18. Романова Е.К. Прогноз термостабилизации массива обводненных осыпей на дне карьера криолитозоны с помощью сезонно-охлаждающих устройств // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 183-194.
19. Ефимов В.М., Васильчук Ю.К., Рожин И.И., Попенко Ф.Е., Степанов А.В. Моделирование температурного режима грунтовых оснований с сезонноохлаждающими устройствами в условиях криолитозоны республики Саха (Якутия) // Арктика и Антарктика. – 2017. – № 4. – С. 86-97.
20. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
21. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – Т. 5, №5. – С. 816-827.
22. Изаксон В.Ю., Петров Е.Е. Численные методы прогнозирования и регулирования теплового режима горных пород области многолетней мерзлоты. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1986. – 95 с.
23. Захаров Е.В. Прочность смерзшихся пород осыпи карьера "Интернациональный" // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 10. – С. 113-117.

### References

1. Zarovnyaev B.N., Akishev A.N., Shubin G.V., Budikina M.E., Sobakina M.P. Technology of final extraction of the reserves of deep diamond quarries using mining equipment with remote control // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. – SGEM, 2019. – P. 629-634.
2. Ajnbinder I.I., Pakevich P.G., Krasnyukova E.V. Justification of the parameters of hazardous zones in the combined development of kimberlite deposits in Yakutia // Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. 2019, no 3, pp. 48-60.
3. Mal'ceva I.A. Justification and selection of parameters for mining the under-pit reserves of the Mir pipe // Mining information and analytical bulletin. 2002, no. 7, pp. 120-123.
4. Vakulenko I.S., Nikolaev P.V. Analysis and development prospects of the method of artificial freezing of rocks in underground construction // Mining information and analytical bulletin. 2015, no. 3, pp. 338-346.
5. Kuznetsov G.I., Kruk N.V. Frozen retaining walls in hydraulic engineering // News of universities. Building. 2018, no. 1(709), pp. 76-83.
6. Semin M.A., Levin L.Yu., Parshakov O.S. Choice of parameters and justification of the operation mode of freezing columns to maintain the thickness of the ice wall // Physical and technical problems of the development of useful minerals. 2020, no. 5, pp. 194-205.

7. Liu Z., Sun Y., Wang B., Li Q. Experimental study of artificial ground freezing by natural cold gas injection // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no. 17, p. 6055. DOI: 10.3390/app10176055.
8. Andersland O.B., Ladanyi B. Frozen ground engineering (2nd edition). – John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2004. – 363 p. – DOI: 10.1017/s003224740529441x.
9. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A.P. Artificial groundfreezing: a review of thermal and hydraulic aspects // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, vol. 104, p. 103534. doi.org/10.1016/j.tust.2020.103534.
10. Khokholov Yu.A., Kurilko A.S., Solovev D.E. Calculation of the temperature field of saline rocks in the mouth of the vertical shaft during the operation of the freezing system // Physical and technical problems of the development of useful minerals. 2016, no. 3, pp. 176-184.
11. Ahmed Marwan, Meng-Meng Zhou, M. Zaki Abdelrehim, Günther Meschke. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow // Computers and Geotechnics. 2016, vol. 75, pp. 112-125. doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.004.
12. Cybin S.S. Review of MMG thermal stabilization systems and evaluation of the thermal stabilizer performance under specific climatic conditions // Science Alley. 2017, vol. 2, no. 9, pp. 432-439.
13. Lihachev E.S., Molchanov S.A. Methods of thermal stabilization of permafrost soils and the development of promising installations for freezing soils // Academic journalism. 2018, no. 10, pp. 14-19.
14. Choi S., Lee S., Son K., Kim Y. The effects of operation variables on the cooling seasonal efficiency of a residential air conditioner with an inverter compressor // ACRA. 8th Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning. 2016.
15. Vasiliev V.I. Modeling the distribution of non-stationary temperature fields in the permafrost zone in the design of geotechnical structures: textbook. – M.: KURS, 2017. – 624 p.
16. Stepanov A.V., Popenko F.E., Rozhin I.I. Fundamentals of engineering protection of construction objects in permafrost. – Novosibirsk: Science, 2014. – 448 p.
17. Anisimov V.A. Experimental study of a liquid freezing system // News of universities. Construction and architecture. 1983, no. 9, pp. 86-92.
18. Romanova E.K. Prediction of thermostabilization of a watered emergency mass at the bottom of the cryolithozone pit with the use of seasonal cooling devices // Mining information and analytical bulletin. 2021, no. 12-1, pp. 183-194.
19. Efimov V.M., Vasil'chuk Yu.K., Rozhin I.I., Popenko F.E., Stepanov A.V. Modeling the temperature regime of soil foundations with seasonal cooling devices in the permafrost zone of the Republic of Sakha (Yakutia) // Arctic and Antarctic. 2017, no. 4, pp. 86-97.
20. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Equations of mathematical physics. –M.: Science, 1977. – 736 p.
21. Samarskii A.A., Moiseenko B.D. An economical scheme for the counting account for the multidimensional Stefan problem // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1965, vol. 5, no. 5, pp. 816-827.
22. Isakson V.Yu., Petrov E.E. Numerical methods for forecasting and regulating the thermal regime of rocks in the permafrost area. – Yakutsk: YaSC SB AS USSR, 1986. – 95 p.
23. Zakharov E.V. The strength of frozen rocks of the scree of the "International" quarry // Successes of modern natural science. 2022, no. 10, pp. 113-117.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

|  |  |
|--|--|
| <b>Курилко Александр Сардокович</b> – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник | <b>Kurilko Aleksandr Sardokovich</b> – candidate of technical sciences, leading researcher |
| <b>Соловьев Дмитрий Егорович</b> – кандидат технических наук, старший научный сотрудник  | <b>Solovev Dmitrii Egorovich</b> – candidate of technical sciences, senior researcher      |
| <b>Романова Елена Константиновна</b> – кандидат технических наук, научный сотрудник      | <b>Romanova Elena Konstantinovna</b> – candidate of technical sciences, researcher         |
| solovjevde@igds.ysn.ru   |  |

Получена 15.03.2024