

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА

М.А. Семин<sup>1</sup>, И.И. Головатый<sup>2</sup>, Л.Ю. Левин<sup>1</sup>, А.В. Богомягков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: seminma@inbox.ru

<sup>2</sup> ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь

**Аннотация:** Проведен анализ результатов теплотехнического расчета искусственного замораживания пород для строящегося ствола калийного рудника в Республике Беларусь. Использованная при расчетах модель тепловых процессов в замораживаемых породах валидирована по данным натурного мониторинга температур в контрольно-термических скважинах, установленных около контура замораживающих колонок. Выявлена неоднозначность параметра толщины ледопородного ограждения при количественной оценке его несущей способности в различные моменты времени. Достоверная оценка несущей способности ледопородного ограждения требует привлечения дополнительных критериев, например, его средней температуры. Показано, что толщина ЛПО и его средняя температура сильно меняются при переходе от активного замораживания к пассивному, а также при последующем переходе к стадии размораживания пород. Использование двух переменных во времени критериев для анализа состояния ледопородного ограждения оказывается не очень удобным, а потому в настоящей работе предложен новый критерий, идея которого заключается в прямом расчете предельной несущей способности ледопородного ограждения исходя из фактического поля температур в объеме замороженных пород и эмпирических зависимостей прочностных и деформационных свойств замороженных пород от температуры.

**Ключевые слова:** искусственное замораживание пород, теплотехнический расчет, ледопородное ограждение, неоднородное распределение свойств, несущая способность.

**Благодарность:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта (рег. номер ЦИТИС: 122030100425-6).

**Для цитирования:** Семин М. А., Головатый И. И., Левин Л. Ю., Богомягков А. В. Разработка критерия оценки несущей способности ледопородного ограждения по данным температурного мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 111–125. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_111.

### Load-bearing capacity criterion for frozen wall based on temperature monitoring

M.A. Semin<sup>1</sup>, I.I. Golovaty<sup>2</sup>, L.Yu. Levin<sup>1</sup>, A.V. Bogomyagkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

Perm, Russia, e-mail: seminma@inbox.ru

<sup>2</sup> OJSC «Belaruskali», Soligorsk, Belarus

---

**Abstract:** The article analyzes the thermotechnical calculation results of artificial ground freezing in an abuilding shaft of a potash mine in the Republic of Belarus. The model of thermal processes in rocks during freezing was validated using the in-situ data of temperature monitoring in thermal control wells arranged close to the ring of freeze pipe. It is found that the parameter of thickness of frozen wall in its load-bearing capacity evaluation at different times is ambiguous. A reliable estimate of load-bearing capacity of frozen wall needs additional criteria to be included, for example, the average temperature of frozen wall. This study shows that the frozen wall thickness and average temperature vary greatly in transition from active to passive freezing, as well as in subsequent transition to thawing of rocks. The use of two time-variable criteria in the frozen wall analysis appears to be inconvenient, and, therefore, this study proposes a new criterion which consists in direct calculation of the ultimate bearing capacity of frozen wall based on the actual field of temperatures in frozen rocks and using empirical temperature dependences of strength and deformation properties of frozen rocks.

**Key words:** artificial ground freezing, thermotechnical calculation, frozen wall, nonuniform distribution of properties, load-bearing capacity.

**Acknowledgements:** The research was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project (grant number: 122030100425-6).

**For citation:** Semin M. A., Golovaty I. I., Levin L. Yu., Bogomyagkov A. V. Load-bearing capacity criterion for frozen wall based on temperature monitoring. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11):111-125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_111.

---

## Введение

Строительство подземных сооружений (в частности — шахтных стволов) в обводненных неустойчивых породах осуществляется с использованием специальных способов. На калийных рудниках наиболее распространенным специальным способом строительства шахтных стволов является искусственное замораживание пород. Его цель — создание вокруг строящегося шахтного ствола защитного ледопородного ограждения (ЛПО) [1 — 3].

Вывод о достижении сплошного ЛПО заданной толщины во всем интервале замораживания обычно делается с привлечением данных мониторинга искусственного замораживания пород на конкретном объекте — измеренных температур по глубине нескольких вертикальных контрольно-термических (КТ) скважин

[4, 5]. Эти данные используются для последующей теоретической интерпретации поля температуры во всем замораживаемом массиве пород посредством обратного анализа [6] или решения обратных задач Стефана [7, 8]. Далее по выбранной изотерме начала замерзания воды (0 °С или ниже) определяется фактическая толщина ЛПО, которая сравнивается с расчетной толщиной, полученной из геомеханического (или статического) анализа. При проведении геомеханического анализа обычно принимается, что температура ЛПО распределена однородно по объему замороженных пород [9, 10]. При этом такая средняя температура равна заданной отрицательной величине, при которой были определены прочностные свойства пород в ходе лабораторных испытаний, с использованием которых были рассчитаны

таны проектные толщины ЛПО. Данный подход имеет очевидное достоинство, связанное с оперативностью оценок несущей способности ЛПО, однако в своей основе он содержит ряд допущений, которые в некоторых практических ситуациях могут оказаться очень грубыми [10]. Допущения касаются пренебрежения следующими факторами:

- изменение физико-механических и прочностных свойств в зависимости от температуры и времени;
- объемное расширение влажных пород при замерзании в них воды;
- выпирание влаги из области замороженных пород, приводящее к повышению внешней нагрузки на боковую стенку ледопородного цилиндра;
- влияние морозного пучения на напряженно-деформированное состояние ЛПО.

Все эти факторы связаны с учетом взаимного влияния механической и тепловой задач при моделировании ЛПО. Относительный вклад каждого из этих факторов может сильно меняться в зависимости от типа породы и внешних условий. Факторы 2–4, включающие в себя также процессы массопереноса [11], в настоящее время активно исследуются в научной литературе: представлено множество математических моделей тепломассопереноса в замораживаемых грунтах с учетом перераспределения механических напряжений [12–14]. Такие модели в потенциале позволяют описывать физические процессы в замораживаемых породах гораздо точнее, но имеют свои недостатки: длительность моделирования и большое количество дополнительных исходных данных для моделирования — реологических и гидравлических параметров замораживаемых пород при различных температурах, параметров морозного пучения и пр. Данный подход мы не будем обсуждать в настоящей статье.

Первый фактор из списка выше является наименее изученным. Некоторые результаты в этом направлении были ранее получены авторами настоящей статьи. В частности, в работе [10] было исследовано влияние неоднородности распределения прочностных свойств пород на расчетное значение толщины ЛПО. А в работе [15] исследовано изменение несущей способности ЛПО по условию предельной прочности при переходе от активного к пассивному замораживанию. Настоящее исследование является продолжением работы [15] и направлено на анализ изменения несущей способности ЛПО по еще одному условию — предельному деформированному состоянию ЛПО, введенному С.С. Вяловым [16]. Помимо этого, в настоящей работе рассматривается более длительный период искусственного замораживания пород, вплоть до перехода к стадии размораживания. Описываемые в работе исследования проводились применительно к практической ситуации контроля искусственного замораживания пород при строительстве скипового ствола Дарасинского калийного рудника в Республике Беларусь.

#### **Объект исследования и данные экспериментальных наблюдений**

Объект исследования — замораживаемый породный массив вокруг строящегося скипового ствола Дарасинского рудника, который располагается в Солигорском районе Минской области, Республика Беларусь. Сложные гидрогеологические условия заложения стволов связаны с наличием обводненных рыхлых и неустойчивых пород в верхней части осадочного чехла до глубины 185 м. По данным инженерно-геологических изысканий, присутствующие водоносные слои пород мощностью более 10 м способны обеспечить водопритоки в ствол с расходом более 10 м<sup>3</sup>/ч. Это

предопределило необходимость применения специального способа проходки — искусственного замораживания горных пород.

Вокруг проектируемого скипового ствола было пробурено 39 замораживающих скважин. Диаметр замораживающего контура равен 15,4 м, а расстояние между устьями соседних замораживающих колонок примерно равно 1,24 м. При этом диаметр проектируемого шахтного ствола  $D_{ст}$  составляет 8 м (рис. 1). Диаметр контура замораживания  $D_3$  равен 15,4 м.

В настоящей работе исследовано временное изменение несущей способности ЛПО скипового ствола Дарасинского рудника при переходе со стадии активного замораживания на стадию поддержания фиксированной толщины ЛПО (пассивное замораживание) и затем на стадию размораживания пород. Получены и обработаны экспериментальные данные термометрического мониторинга в четырех КТ скважинах, располо-

женных около контура замораживающих колонок (после начала проходки ствола четвертая скважина была демонтирована). Измерения температуры осуществлялись ежесуточно по всей высоте КТ скважин (185 м) с помощью системы распределенных оптоволоконных измерений температуры [17, 18]. На рис. 1 представлены характерные измеренные распределения температуры по высоте скважины КТ-1 в различные моменты времени.

С течением времени температура пород в окрестности КТ-скважин понижается. Причем это понижение происходит тем быстрее, чем ближе к контуру замораживания расположена КТ-скважина. Неравномерность понижения температуры по высоте КТ-скважин связана с тем, что в интервале замораживания присутствуют различные слои горных пород с существенно разными теплофизическими свойствами.

На рис. 2, а представлены временные зависимости температуры хладоноси-

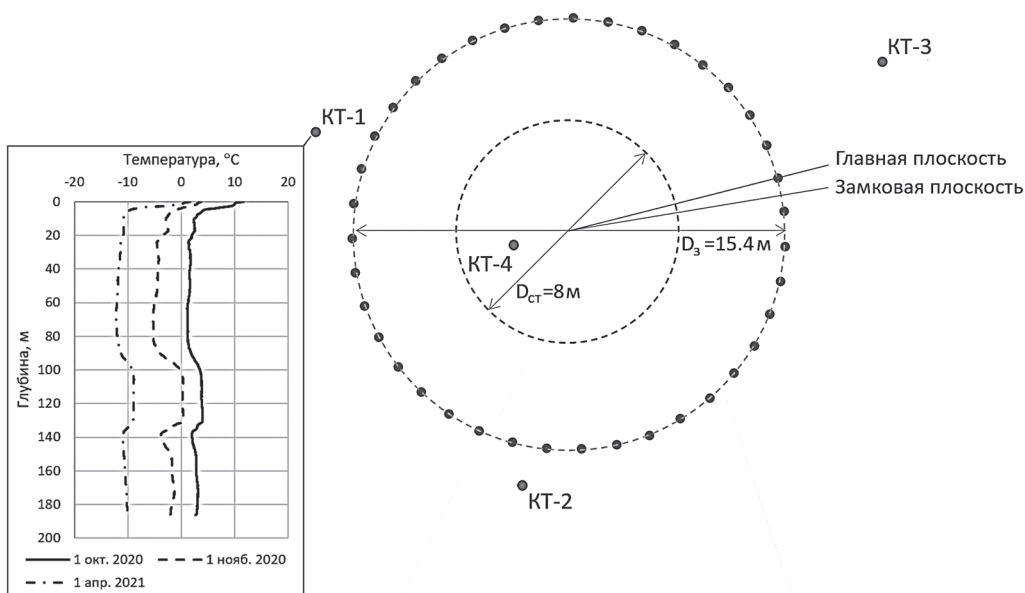


Рис. 1. Схематичное изображение контура замораживающих колонок и контрольных скважин

Fig. 1. Schematic representation of the contour of freeze pipes and monitoring wells

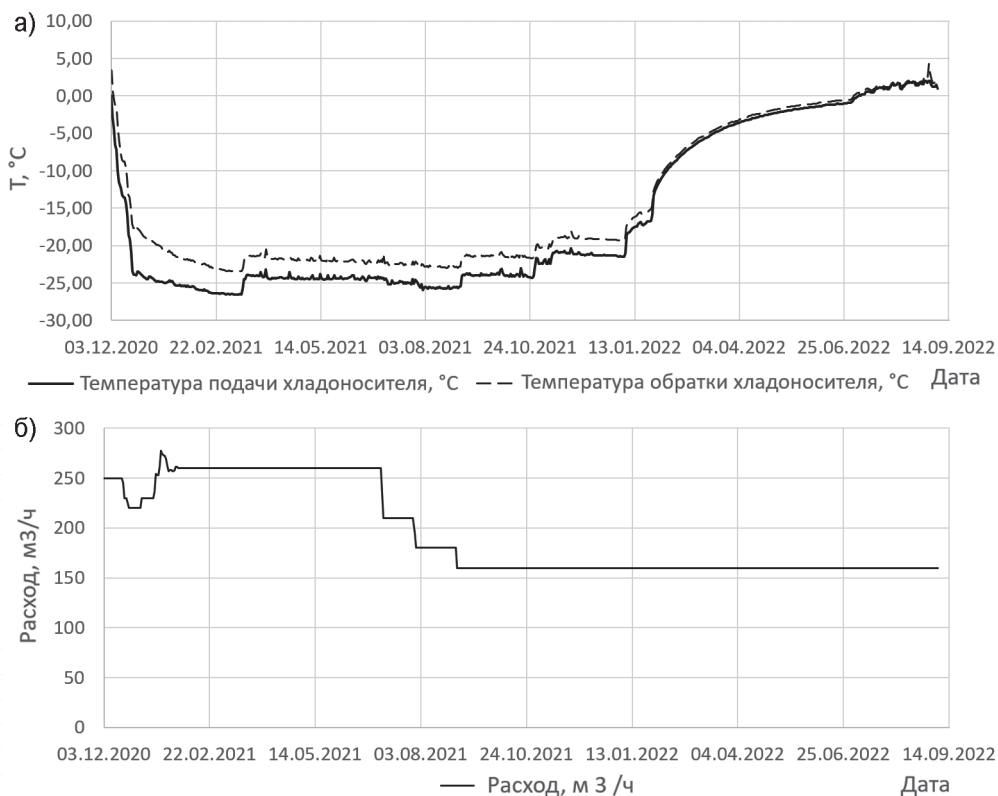


Рис. 2. Временные зависимости температуры (а) и объемного расхода (б) рассола в замораживающих колонках

Fig. 2. Time dependences of temperature (a) and volume flow (b) of brine in freeze pipes

теля, измерявшиеся на входе и выходе рассола из замораживающих колонок. Понижение температуры входящего рассола до проектного значения около  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходило в интервале с 3 по 19 декабря 2020 г. После чего температура до 14 марта 2021 г. продолжала плавно уменьшаться. После 14 марта температура повысилась на  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что связано с переходом на режим пассивного замораживания. В дальнейшем до сентября 2021 г. температура плавно понижалась, что связано с естественными процессами в массиве, его постепенным промораживанием. 8 сентября температура снова резко повысилась на  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что связано с изменением режима работы замораживающей станции.

Такие же резкие повышения температуры происходили 28 октября 2021 г., 7 января 2022 г. С конца января 2022 г. началось постепенное повышение температуры хладагента (стадия размораживания), в результате чего к июлю 2022 г. он достиг температуры  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Расход рассола в замораживающем контуре в течение всего рассматриваемого периода замораживания также претерпевал изменения. В начальный период с 25 ноября по 28 января он варьировался в интервале от 220 до 278  $\text{m}^3/\text{ч}$ , после чего поддерживался на уровне 260  $\text{m}^3/\text{ч}$ .

С 5 июля 2021 г. он уменьшается сначала до 210  $\text{m}^3/\text{ч}$ , а потом до 180 и 160  $\text{m}^3/\text{ч}$  (рис. 2, б).

### Интерпретация поля температуры в породном массиве

Имеющиеся данные экспериментальных исследований использовались для настройки параметров математической модели замораживаемого породного массива. Породный массив в рассматриваемом случае представляет собой совокупность горизонтальных слоев пород с примерно однородными теплофизическими свойствами. Горизонтальные слои пород имеют толщины от 10 м и выше. При рассмотрении срединных горизонтальных сечений этих слоев пород уместно принять гипотезу о незначительном вкладе вертикальных теплоперетоков и рассмотреть теплопередачу в горизонтальной плоскости каждого из слоев в рамках следующей математической модели:

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \right] \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_{un} (1 - i) + \lambda_{fr} i, \quad (2)$$

$$H(T) = \begin{cases} \rho c_{un} (T - T_{lq}) + \rho_w n L, & T_{lq} \leq T \\ \rho_w n L \cdot (1 - i), & T_{sd} \leq T < T_{lq} \\ \rho c_{fr} (T - T_{sd}), & T < T_{sd} \end{cases}, \quad (3)$$

$$i(T) = \begin{cases} 1, & T < T_{sd} \\ (T_{lq} - T) / (T_{lq} - T_{sd}), & T_{sd} \leq T < T_{lq} \\ 0, & T_{lq} \leq T \end{cases}, \quad (4)$$

$$\left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} - \alpha (T_{fb}(t) - T) \right]_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (5)$$

$$T|_{\Omega_{out}} = T_0, \quad (6)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (7)$$

где  $H$  — удельная энтальпия обводненного породного массива, Дж/м<sup>3</sup>;  $r, \varphi$  — полярные координаты, м;  $t$  — физическое время, с;  $\lambda_{un}, \lambda_{fr}$  — теплопроводности массива в зонах охлаждения и льда соответственно, Вт/(м·°С);  $c_{un}, c_{fr}$  — удельные теплоемкости массива в зонах охлаждения и льда соответственно, Дж/(кг·°С);  $\rho$  — плотность массива, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{lq}$  — температура начала кристаллизации поровой воды, °С;  $T_{sd}$  — температура начала плавления порового льда, °С;  $i$  — объемная льдистость породного массива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $L$  — удельная теплота кристаллизации воды, Дж/кг;  $n$  — пористость массива;  $\rho_w$  — плотность поровой воды, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{fb}(t)$  — температура рассола в замораживающих колонках, °С;  $T_0$  — температура непотревоженного породного массива на удалении от контура замораживания, °С;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на границе с замораживающими скважинами, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\Omega_{fb} = \cup \Omega_{fb_i}$  — границы со всеми замораживающими скважинами,  $i = 1, \dots, N$ ;  $\Omega_{out}$  — внешняя граница области моделирования;  $n$  — координата вдоль нормали к границе  $\Omega_{fb}$ , м.

Учет фазовых превращений поровой воды в этой модели осуществлялся посредством задания функции удельной энтальпии  $H(T)$  (3). Скачок этой функции в окрестности температур фазового перехода определяется величиной скрытой теплоты фазового перехода в единице объема обводненного породного массива. Предполагалось, что скачок достаточно мал по сравнению с характерной разницей температур  $T_0 - T_{fb}$  в задаче. Именно это позволило рассматривать линейные зависимости (2) и (4).

В действительности же фазовый переход поровой влаги для многих слоев пород может протекать в достаточно широком температурном интервале, что обычно связано с влиянием связанных

Таблица 1

**Теплофизические свойства слоев пород**  
**Thermophysical properties of soil layers**

Слой	Интервал глубин, м	$T_0, ^\circ\text{C}$	$w, \text{кг/кг}$	$\lambda_{\text{гр}}, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda_{\text{ун}}, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$c_{\text{гр}}, \text{Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$c_{\text{ун}}, \text{Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Песок	2,1–18	9,5	0,117	3,9	2,8	908	1096	2110
Супесь	82,9–97,3	8,5	0,167	3,27	2,36	996	1131	2250
Глина	141,5–154,8	8,88	0,177	1,51	1,16	993	1259	2160

вод [19, 20] и минерализацией поровой воды [21, 22].

Решение системы уравнений (1) – (7) осуществлялось с использованием метода конечных разностей в программе Frozen Wall, разработанной в Горном институте при участии авторов статьи. Радиус внешней границы расчетной области для каждого из слоев составлял 51 м, радиус замораживающих колонок был принят равным 0,073 м. Для решения использовалась регулярная неоднородная сетка со сгущением вблизи замораживающих колонок. Использовалась явная схема по времени первого порядка и схема второго порядка точности (центральная разность) по пространству [23].

**Результаты расчетов и их обсуждение**

Начальные значения всех теплофизических свойств породного массива, использованных при расчетах, брались на основании лабораторных исследований образцов пород. В табл. 1 представлены использованные при расчетах теплофизические свойства для трех выбранных нами слоев пород – песка, супеси и глины. В целом в интервале замораживания 185 м присутствует 17 различных слоев пород, однако в этой статье мы проводим подробный анализ только для трех из них.

Рассчитанные распределения температуры представлены на рис. 3 для двух времен, отсчитываемых с момента на-

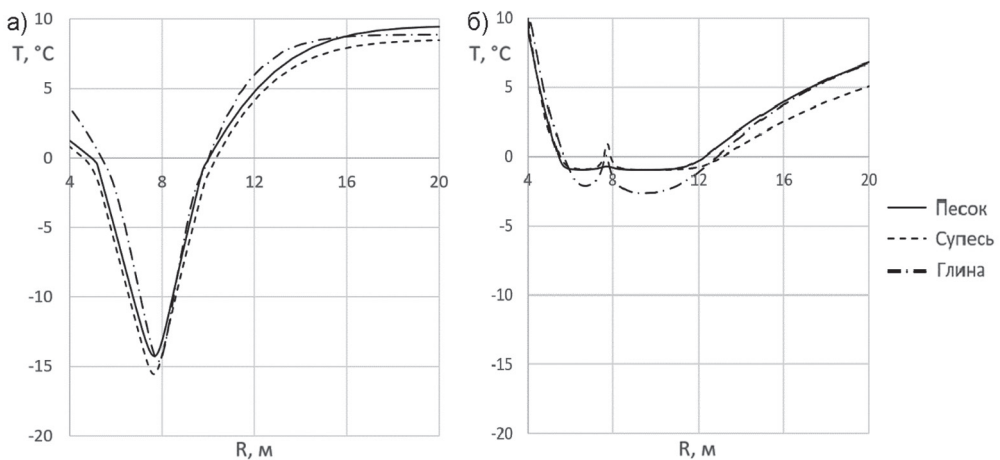


Рис. 3. Радиальные распределения температуры вдоль срединного среза ЛПО (замковая плоскость) в моменты времени 4 месяца (а) и 20 месяцев (б)

Fig. 3. Radial temperature distributions along the median section of the FW (locking plane) at time points of 4 months (a), and 20 months (b)



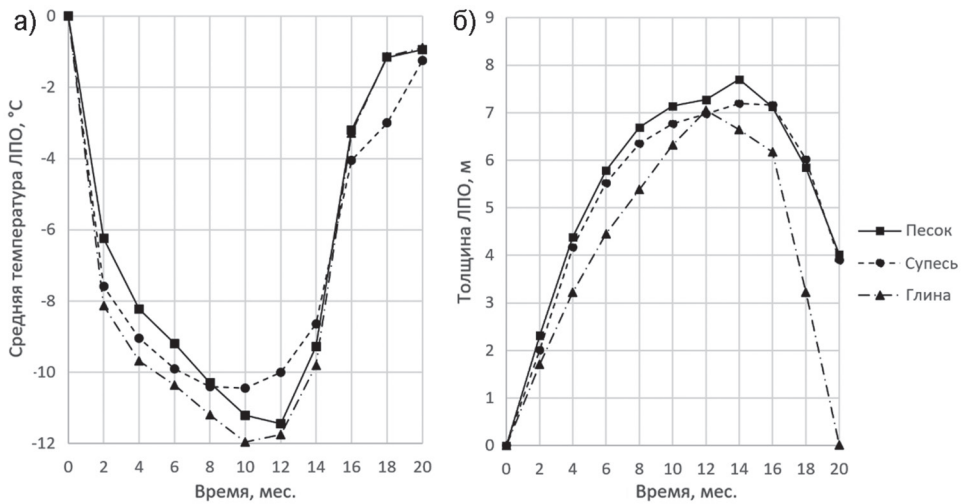


Рис. 4. Временные зависимости средней температуры (а) и толщины (б) ЛПО для трех различных слоев пород

Fig. 4. Time dependences of the average temperature (a) and thickness (b) of the FW for three different soil layers

чала замораживания. Если на стадии активного замораживания пород разница температур и градиент температур в зоне ЛПО максимальны, то с течением времени за счет постепенного промораживания пород градиент уменьшается, а после снижения холодильной мощности замораживающей станции в фазе пассивного замораживания разница температур в зоне ЛПО также быстро убывает. Это влияет на среднюю температуру ЛПО и, следовательно, на среднюю прочность замороженных пород.

Само понятие толщины ЛПО, рассчитанной по изотермам начала фазового перехода воды в лед, как критерий оценки несущей способности ЛПО в данном случае теряет свою однозначность: толщина ЛПО в момент времени 16 месяцев больше, чем в момент времени 4 месяца (рис. 4, б), однако средняя прочность замороженных пород для момента времени 16 месяцев оказывается в несколько раз ниже средней прочности замороженных пород в момент времени 4 месяца. Об этом можно судить по рис. 4, а, на котором представлена

средняя температура ЛПО, а также по эмпирическим зависимостям прочностных и деформационных характеристик от температуры, полученных по данным лабораторных испытаний исследуемых образцов пород. Более подробная информация о лабораторном определении параметров исследуемых пород представлена в [10].

По данной причине для достоверной оценки несущей способности ЛПО в дополнение к критерию толщины ЛПО необходимо использовать другие критерии — например, среднюю температуру ЛПО [24, 25]. Использование двух переменных во времени критериальных значений переменных не очень удобно, а потому нами был предложен новый критерий, идея которого заключается в том, чтобы напрямую вычислять предельную несущую способность ЛПО  $R$  в каждый заданный момент времени. Под предельной несущей способностью ЛПО мы понимаем максимальную величину нагрузки, оказываемой на его внешнюю стенку горным давлением и гидростатическим давлением. Данная



характеристика может быть рассчитана так, чтобы интегрально учитывать всю неоднородность прочностных и физико-механических свойств в объеме замороженных пород. Это было показано в нашей предыдущей работе [15], в которой предложено рассчитывать предельную несущую способность ЛПО по критерию прочности исходя из модифицированной формулы С.С. Вялова для расчета толщины ЛПО в неоднородном поле температур:

$$P = \frac{\bar{\Lambda}_{mean}}{\Lambda - 1} \varepsilon - \frac{\Lambda(\Lambda + 1)}{96(\Lambda - 1)^3} \Delta_c \varepsilon^3, \quad (8)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{b}{a}\right)^{\Lambda-1} - 1, \quad (9)$$

где  $a$  — радиус внутренней границы ЛПО, м;  $b$  — радиус внешней границы ЛПО, м;  $P$  — внешнее давление, Па;  $\Delta_c$  — разница между максимальным и минимальным сцеплениями пород в ЛПО с неоднородным распределением температур, Па;  $\Lambda$  и  $\Lambda_{mean}$  — коэффициенты в линейном законе Кулона–Мора [26], записанном относительно максимального  $\sigma_1$  и минимального  $\sigma_3$  главных напряжений.

По аналогии с (8) в настоящей работе введена также предельная несущая способность ЛПО  $P^*$  (Па) по условию предельного деформированного состояния (предельно допустимых перемеще-

ний внутренней стенки ЛПО до возведения крепи):

$$P^* = \frac{1}{h(1-\xi)} \int_a^b A(r) \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \left(\frac{au_a}{rh}\right)^m dr \quad (10)$$

Здесь  $A(r)$  — модуль нелинейной деформации, МПа;  $m$  — показатель нелинейности зависимости напряжений от деформаций;  $\alpha$  — показатель нелинейности по времени;  $h$  — высота заходки, м;  $u_a$  — предельно допустимые перемещения внутренней стенки ЛПО, м;  $\xi$  — коэффициент, характеризующий защемление торцов ледопородного цилиндра.

Эта формула получена из классической формулы С.С. Вялова [16] путем выражения из нее величины нагрузки на внешнюю стенку ЛПО. Также дополнительно было принято, что модуль нелинейной деформации является функцией радиальной координаты  $r$ . Данная зависимость выражается опосредованно через температуру, которая является в основном функцией радиальной координаты. Исключение составляет малая зона в окрестности контура замораживающих колонок, где имеет место существенная зависимость температуры от окружной координаты  $\varphi$ .

Зависимость температуры от радиальной координаты  $r$  для замковой плоскости ЛПО (как наиболее пессимистичный случай) принималась по резуль-

Таблица 2

**Линейные аппроксимации температурных функций предельно-длительных значений прочностных свойств, а также деформационных характеристик мерзлых пород**  
**Linear approximations of temperature functions of maximum long-term values of strength properties, as well as deformation characteristics of frozen soils**

Слой	Структурное сцепление, МПа	Тангенс угла внутреннего трения	Прочность на одноосное сжатие, МПа	Коэффициент нелинейной деформации, МПа
Песок	0,814–0,121 Т	0,436–0,0047 Т	0,842–0,326 Т	5,749–1,407 Т
Супесь	0,729–0,117 Т	0,304–0,0046 Т	0,476–0,381 Т	6,790–1,451 Т
Глина	0,447–0,119 Т	0,080–0,0072 Т	1,095–0,276 Т	8,377–0,348 Т

татам численного расчета по модели (1) – (8). Зависимость модуля нелинейной деформации от температуры взята из данных лабораторных испытаний исследуемых образцов пород (табл. 2). При этом показатели нелинейности  $m$  и  $\alpha$  принимались постоянными. Их значения для различных типов пород также определялись в ходе лабораторных испытаний. Для песка параметр  $m$  равен 0,47, для супеси – 0,43, для глины – 0,33. Показатель нелинейности по времени для песка составляет 0,14, для супеси – 0,11, а для глины – 0,16.

Полученные временные зависимости предельной несущей способности ЛПО по формулам (8) и (10) представлены на рис. 5. Высота заходки принималась равной 5 м. На рис. 5, а представлены кривые, рассчитанные по формуле (8), а на рис. 5, б – по формуле (10).

Из рис. 5 видно, что в целом за 12 месяцев для всех рассмотренных слоев грунта несущая способность ЛПО увеличивалась. При этом максимальные значения предельной внешней нагрузки по формулам были достаточно большими

и через четыре месяца превышали фактическую внешнюю нагрузку. Для песка внешняя нагрузка составила 0,17 МПа, для супеси – 1,36 МПа, для глины – 1,54 МПа. Эти величины рассчитывались как сумма двух составляющих: литостатического давления и давления столба воды на уровне подошвы каждого рассматриваемого слоя пород. Излишнее перемораживание пород было в основном связано с длительным поддержанием достаточно низких температур хладонносителя на стадии пассивного замораживания с целью обеспечения требуемых толщин ЛПО в слое песчаника в интервале глубин 130,0–145,0 м, где было выявлено фильтрационное течение подземных вод.

Предельные значения внешней нагрузки для песка по формуле (10) оказались намного ниже, чем по формуле (8). Для глины ситуация противоположная. Для супеси обе формулы дали сопоставимые величины для предельной внешней нагрузки. При последующем анализе состояния ЛПО в каждом слое пород в расчет должна приниматься ми-

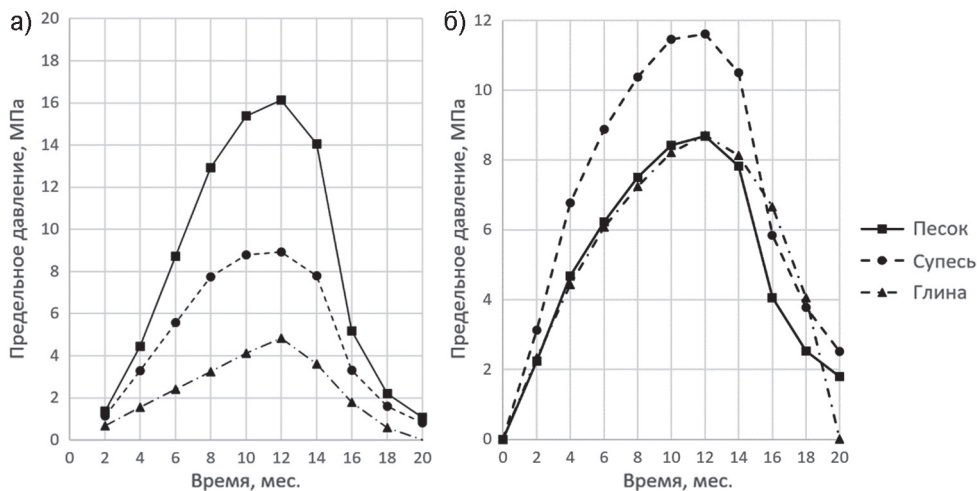


Рис. 5. Временные зависимости предельного давления, которое способно выдержать ЛПО, рассчитанного по формулам (8) и (10)

Fig. 5. Time dependences of the maximum pressure that the FW can withstand, calculated using formulas (8) and (10)

нимальная величина из рассчитанных по формулам (8) и (10). Таким образом, оценка состояния ЛПО на всем временном промежутке его существования может быть сделана в рамках единственного и однозначного критерия — предельной несущей способности ЛПО.

Примечательно, что уменьшение предельной несущей способности ЛПО впервые наблюдается в момент времени 14 месяцев. При этом представленная на рис. 4, б толщина ЛПО для слоев песка и супеси начинает существенным образом меняться намного позднее, в момент времени 18 месяцев. Существенное снижение температуры хладоносителя, начинающееся на 14-й месяц с момента начала замораживания (см. рис. 2), не сразу оказывает эффект на положение изотермы начала замерзания поровой воды. Такой эффект запаздывания связан с конечной скоростью передачи теплоты через породный массив [27].

### **Заключение**

Основные результаты проведенного исследования заключаются в следующем:

- Показано, что классические критерии оценки состояния замороженных

пород — толщина и средняя температура ЛПО — сильно меняются при переходе от активного замораживания к пассивному, а также при последующем переходе к стадии размораживания пород. По данной причине использование двух критериев для анализа состояния ЛПО оказывается не очень удобным.

- Предложен новый критерий оценки состояния ЛПО — предельная несущая способность ЛПО, под которой понимается максимальная внешняя нагрузка, которую способно выдержать ЛПО, не разрушаясь и не деформируясь в течение заданного промежутка времени (обычно около суток). Она должна сравниваться с фактической внешней нагрузкой, действующей на ЛПО, которая рассчитывается исходя из горного и гидростатического давлений на рассматриваемой глубине замораживания.

- Проведен расчет временного изменения предельной несущей способности ЛПО с использованием данных температурного мониторинга искусственного замораживания пород при строительстве скипового ствола Дарасинского калийного рудника в Республике Беларусь.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Fan W., Yang P. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage // *Transportation Geotechnics*. 2019, vol. 20, article 100250. DOI: 10.1016/j.trgeo.2019.100250.

2. Hentrich N., Franz J. About the application of conventional and advanced freeze circle design methods for the Ust-Jaiwa freeze shaft project / *Vertical and Decline Shaft Sinking: Good Practices in Technique and Technology*. International Mining Forum. Leiden, CRC Press/Balkema. 2015, pp. 89–104.

3. Амосов П. В., Лукичев С. В., Наговицын О. В. Влияние пористости породного массива и температуры хладоносителя на скорость создания сплошного ледопородного ограждения // *Вестник Кольского научного центра РАН*. — 2016. — № 4 (27). — С. 43–50.

4. Wu T., Zhou X., Zhang L., Zhang X., He X., Xu Y. Theory and technology of real-time temperature field monitoring of vertical shaft frozen wall under high-velocity groundwater conditions // *Cold Regions Science and Technology*. 2021, vol. 189, article 103337. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103337.

5. Волохов Е. М., Мукминова Д. З. Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирова-

ния ледопородного ограждения // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 826 — 839. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5.

6. Pimentel E., Papakonstantinou S., Anagnostou G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2012, vol. 28, pp. 57 — 69. DOI: 10.1016/j.tust.2011.09.005.

7. Levin L. Y., Semin M. A., Zaitsev A. V. Solution of an inverse Stefan problem in analyzing the freezing of groundwater in a rock mass // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018, vol. 91, pp. 611 — 618. DOI: 10.1007/s10891-018-1782-3.

8. Semin M., Golovaty I., Levin L., Pugin A. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction. A case study of the Darasinsky potash mine // Cleaner Engineering and Technology. 2024, vol. 18, article 100710. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100710.

9. Zhang B., Yang W., Wang B. Plastic design theory of frozen wall thickness in an ultradeep soil layer considering large deformation characteristics // Mathematical Problems in Engineering. 2018, vol. 2018, article 8513413. DOI: 10.1155/2018/8513413.

10. Семин М. А., Бровка Г. П., Пугин А. В., Бублик С. А., Желнин М. С. Исследование влияния неоднородности поля температур на прочность ледопородных ограждений стволов шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 79 — 93. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_79.

11. Nikolaev P., Jivkov A. P., Margetts L., Sedighi M. Modelling artificial ground freezing subjected to high velocity seepage // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024, vol. 221, article 125084. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125084.

12. Tounsi H., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: application in mining engineering // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, no. 10, pp. 3889 — 3907.

13. Liu Y., Li K. Q., Li D. Q., Tang X. S., Gu S. X. Coupled thermal—hydraulic modeling of artificial ground freezing with uncertainties in pipe inclination and thermal conductivity // Acta Geotechnica. 2022, vol. 17, no. 1, pp. 257 — 274.

14. Yang Y., Lei D., Chen Y., Cai C., Hou S. Coupled thermal-hydro-mechanical model of deep artificial freezing clay // Cold Regions Science and Technology. 2022, vol. 198, article 103534.

15. Levin L., Semin M., Golovaty I. Analysis of the structural integrity of a frozen wall during a mine shaft excavation using temperature monitoring data // Frattura ed Integrità Strutturale. 2023, vol. 17, no. 63, pp. 1 — 12.

16. Vyalov S. S., Zaretsky Y. K., Gorodetsky S. E. Stability of mine workings in frozen soils // Engineering Geology. 1979, vol. 13, no. 1-4, pp. 339 — 351.

17. He H., Dyck M. F., Horton R., Li M., Jin H., Si B. Distributed temperature sensing for soil physical measurements and its similarity to heat pulse method // Advances in Agronomy. 2018, vol. 148, pp. 173 — 230.

18. Stutsel B. M., Callow J. N., Flower K. C., Biddulph T. B., Issa N. A. Application of distributed temperature sensing using optical fibre to understand temperature dynamics in wheat (*triticum aestivum*) during frost // European Journal of Agronomy. 2020, vol. 115, article 126038.

19. Kong B., He S., Xia T., Ding Z. Research on microstructure of soft clay under various artificial ground freezing conditions based on NMR // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 4, article 1810.

20. Hou S., Yang Y., Cai C., Chen Y., Li F., Lei D. Modeling heat and mass transfer during artificial ground freezing considering the influence of water seepage // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022, vol. 194, article 123053.

21. Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.

22. Liu J., Yang P., Yang Z. J. Electrical properties of frozen saline clay and their relationship with unfrozen water content // Cold Regions Science and Technology. 2020, vol. 178, article 103127.

23. Богомяков А. В., Пугин А. В. Совершенствование математической модели тепломассопереноса в замораживаемом породном массиве, реализованной в программе FrozenWall // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 2. — С. 164 — 174.

24. Трупаков Н. Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. — М.: Углетехиздат, 1954. — 896 с.

25. Han T., Xue Y., Luo T., Zhang T. Prediction and analysis of formation and development characteristics of frozen soil wall: A case study on the chengjiao east ventilation shaft repair // *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 5, article 3209. DOI: 10.3390/app13053209.
26. Ma B., Teng J., Li H., Zhang S., Cai G., Sheng D. A new strength criterion for frozen soil considering pore ice content // *International Journal of Geomechanics*. 2022, vol. 22, no. 7, article 04022107.
27. Wang R., Yang C., Ni L., Yao Y. Experimental study on heat transfer of soil with different moisture contents and seepage for ground source heat pump // *Indoor and Built Environment*. 2020, vol. 29, no. 9, pp. 1238–1248. **IAAB**

## REFERENCES

1. Fan W., Yang P. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage. *Transportation Geotechnics*. 2019, vol. 20, article 100250. DOI: 10.1016/j.trgeo.2019.100250.
2. Hentrich N., Franz J. About the application of conventional and advanced freeze circle design methods for the Ust-Jaiwa freeze shaft project. *Vertical and Decline Shaft Sinking: Good Practices in Technique and Technology*. *International Mining Forum*. Leiden, CRC Press/Balkema. 2015, pp. 89–104.
3. Amosov P. V., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. Influence of rock mass porosity and coolant temperature on the rate of creation of a continuous ice-rock barrier. *Herald of the Kola Science Center of RAS*. 2016, no. 4 (27), pp. 43–50. [In Russ].
4. Wu T., Zhou X., Zhang L., Zhang X., He X., Xu Y. Theory and technology of real-time temperature field monitoring of vertical shaft frozen wall under high-velocity groundwater conditions. *Cold Regions Science and Technology*. 2021, vol. 189, article 103337. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103337.
5. Volokhov E. M., Mukminova D. Z. Deformations assessment during subway escalator tunnels construction by the method of artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 826–839. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5.
6. Pimentel E., Papakonstantinou S., Anagnostou G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012, vol. 28, pp. 57–69. DOI: 10.1016/j.tust.2011.09.005.
7. Levin L. Y., Semin M. A., Zaitsev A. V. Solution of an inverse Stefan problem in analyzing the freezing of groundwater in a rock mass. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018, vol. 91, pp. 611–618. DOI: 10.1007/s10891-018-1782-3.
8. Semin M., Golovaty I., Levin L., Pugin A. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction. A case study of the Darasinsky potash mine. *Cleaner Engineering and Technology*. 2024, vol. 18, article 100710. DOI: 10.1016/j.clet.2023.100710.
9. Zhang B., Yang W., Wang B. Plastic design theory of frozen wall thickness in an ultradeep soil layer considering large deformation characteristics. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018, vol. 2018, article 8513413. DOI: 10.1155/2018/8513413.
10. Semin M. A., Brovka G. P., Pugin A. V., Bublik S. A., Zhelmin M. S. Effects of temperature field nonuniformity on strength of frozen wall in mine shafts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 79–93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_79.
11. Nikolaev P., Jivkov A. P., Margetts L., Sedighi M. Modelling artificial ground freezing subjected to high velocity seepage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024, vol. 221, article 125084. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125084.
12. Tounsi H., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Thermo-hydro-mechanical modeling of artificial ground freezing: application in mining engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, no. 10, pp. 3889–3907.
13. Liu Y., Li K. Q., Li D. Q., Tang X. S., Gu S. X. Coupled thermal – hydraulic modeling of artificial ground freezing with uncertainties in pipe inclination and thermal conductivity. *Acta Geotechnica*. 2022, vol. 17, no. 1, pp. 257–274.
14. Yang Y., Lei D., Chen Y., Cai C., Hou S. Coupled thermal-hydro-mechanical model of deep artificial freezing clay. *Cold Regions Science and Technology*. 2022, vol. 198, article 103534.

15. Levin L., Semin M., Golovaty I. Analysis of the structural integrity of a frozen wall during a mine shaft excavation using temperature monitoring data. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2023, vol. 17, no. 63, pp. 1–12.
16. Vyalov S. S., Zaretsky Y. K., Gorodetsky S. E. Stability of mine workings in frozen soils. *Engineering Geology*. 1979, vol. 13, no. 1-4, pp. 339–351.
17. He H., Dyck M. F., Horton R., Li M., Jin H., Si B. Distributed temperature sensing for soil physical measurements and its similarity to heat pulse method. *Advances in Agronomy*. 2018, vol. 148, pp. 173–230.
18. Stutsel B. M., Callow J. N., Flower K. C., Biddulph T. B., Issa N. A. Application of distributed temperature sensing using optical fibre to understand temperature dynamics in wheat (*triticum aestivum*) during frost. *European Journal of Agronomy*. 2020, vol. 115, article 126038.
19. Kong B., He S., Xia T., Ding Z. Research on microstructure of soft clay under various artificial ground freezing conditions based on NMR. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 4, article 1810.
20. Hou S., Yang Y., Cai C., Chen Y., Li F., Lei D. Modeling heat and mass transfer during artificial ground freezing considering the influence of water seepage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022, vol. 194, article 123053.
21. Ol'khovikov Yu. P. *Krep' kapital'nykh vyrobotok kaliynykh i solyanykh rudnikov* [Support of capital workings of potassium and salt mines], Moscow, Nedra, 1984, 238 p.
22. Liu J., Yang P., Yang Z. J. Electrical properties of frozen saline clay and their relationship with unfrozen water content. *Cold Regions Science and Technology*. 2020, vol. 178, article 103127.
23. Bogomyagkov A. V., Pugin A. V. Improvement of the mathematical model of heat and mass transfer in frozen soils implemented in the FrozenWall program. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023, vol. 334, no. 2, pp. 164–174. [In Russ].
24. Trupak N. G. *Zamorazhivanie gornyykh porod pri prokhozke stvolov* [Freezing rocks during shaft sinking], Moscow, Ugletekhizdat, 1954. 896 c.
25. Han T., Xue Y., Luo T., Zhang T. Prediction and analysis of formation and development characteristics of frozen soil wall: A case study on the chengjiao east ventilation shaft repair. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 5, article 3209. DOI: 10.3390/app13053209.
26. Ma B., Teng J., Li H., Zhang S., Cai G., Sheng D. A new strength criterion for frozen soil considering pore ice content. *International Journal of Geomechanics*. 2022, vol. 22, no. 7, article 04022107.
27. Wang R., Yang C., Ni L., Yao Y. Experimental study on heat transfer of soil with different moisture contents and seepage for ground source heat pump. *Indoor and Built Environment*. 2020, vol. 29, no. 9, pp. 1238–1248.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семин Михаил Александрович<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
зав. лабораторией,

e-mail: [seminma@inbox.ru](mailto:seminma@inbox.ru),

ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,

Головатый Иван Иванович — директор,

ОАО «Беларуськалий»,

Солигорск, Беларусь,

e-mail: [iwan15@yandex.by](mailto:iwan15@yandex.by),

Левин Лев Юрьевич<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

член-корреспондент РАН,

зав. отделом, зам. директора по научной работе,

e-mail: [aerolog\\_lev@mail.ru](mailto:aerolog_lev@mail.ru),

ORCID ID: 0000-0003-0767-9207,

Богомягков Александр Васильевич<sup>1</sup> — младший

научный сотрудник,

e-mail: [bavaerolog@gmail.com](mailto:bavaerolog@gmail.com),

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН.

**Для контактов:** Семин М.А., e-mail: [seminma@inbox.ru](mailto:seminma@inbox.ru).



## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*M.A. Semin*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),

Head of Laboratory,

e-mail: [seminma@inbox.ru](mailto:seminma@inbox.ru),

ORCID ID: 0000-0001-5200-7931,

*I.I. Golovaty*, Director, OJSC «Belaruskali»,

Soligorsk, Belarus, e-mail: [iwan15@yandex.by](mailto:iwan15@yandex.by),

*L.Yu. Levin*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),

Corresponding Member of Russian Academy

of Sciences, Head of Department,

Deputy Director for Scientific Work,

e-mail: [aerolog\\_lev@mail.ru](mailto:aerolog_lev@mail.ru),

ORCID ID: 0000-0003-0767-9207,

*A.V. Bogomyagkov*<sup>1</sup>, Junior Researcher,

e-mail: [bavaerolog@gmail.com](mailto:bavaerolog@gmail.com),

<sup>1</sup> Mining Institute of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia.

**Corresponding author:** M.A. Semin, e-mail: [seminma@inbox.ru](mailto:seminma@inbox.ru).

Получена редакцией 24.01.2024; получена после рецензии 05.04.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 24.01.2024; received after the review 05.04.2024; accepted for printing 10.10.2024.



---

## НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»

---



Харёв А.А.

**Воспоминания Алексея Акимовича Харёва  
об учителе Александре Александровиче Скочинском  
и о кафедре рудничной вентиляции**

**Московского горного института 1940–1962 годов**

Год: 2024

Страниц: 56

ISBN 978-5-98672-582-6

УДК 622 (82-94)