



## СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105>

УДК 536:24:622.413

**Влияние способа учета абсолютных источников тепла на точность прогноза температуры в подземных сооружениях криолитозоны**А. Ф. Галкин<sup>1</sup>   , В. Ю. Панков<sup>2</sup>  <sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация [afgalkin@mail.ru](mailto:afgalkin@mail.ru)**Аннотация**

Прогноз теплового режима выработок и окружающего их массива горных пород является необходимым элементом проектирования подземных сооружений криолитозоны, в частности, при обосновании и выборе надежных способов и средств крепления породных обнажений, обеспечивающих безопасную эксплуатацию подземных сооружений в течение всего нормативного срока. Даже изменение температуры дисперсных мерзлых пород в диапазоне отрицательных значений (ниже температуры плавления льда в породе) приводит к уменьшению их прочностных характеристик, а следовательно, и к снижению устойчивости выработок. Целью исследований было сравнение двух способов учета абсолютных источников тепла (как точечных источников и как равномерно распределенных по длине выработки источников) при прогнозе теплового режима в горных выработках подземных сооружений. Получены расчетные зависимости для определения температурных отклонений при различных способах учета абсолютных источников. Для общности анализа расчетные зависимости получены в безразмерном (критериальном) виде. Проведены варианты расчетов, результаты которых представлены в виде графиков, позволяющих наглядно оценить влияние способа учета источников тепла на точность прогноза температуры воздуха в подземном сооружении. Установлены основные качественные и количественные особенности формирования теплового режима в выработках при различных способах учета абсолютных источников тепла. В частности, показано, что при переходе от отрицательного теплового режима в выработке к положительному неправильный учет действия абсолютных источников тепла может привести к изменению глубины оттаивания дисперсных пород почти на 30 % (в 1,26 раза). В то же время установлено, что при положительном тепловом режиме для начальной температуры воздуха в сооружении больше 7,5 °С принципиальной разности для инженерных расчетов в способе учета абсолютных источников тепла нет.

**Ключевые слова**

подземное сооружение, криолитозона, безопасность, тепловой режим, прогноз, источник тепла, способ учета, температура

**Для цитирования**Galkin A.F., Pankov V. Yu. Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):207–214. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105>

## MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozone**A. F. Galkin<sup>1</sup>   , V. Yu. Pankov<sup>2</sup>  <sup>1</sup>*P.I. Melnikov Geocryology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*<sup>2</sup>*North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation* [afgalkin@mail.ru](mailto:afgalkin@mail.ru)**Abstract**

Forecasting the thermal regime of mine workings and the surrounding rock mass is a necessary element of the design of underground structures in cryolithic zone. This is particularly necessary when substantiating and selecting reliable methods and means of rock supporting, in order to ensure safe operation of underground structures during the entire standard service life. Changes in the temperature of discontinuous permafrost



rocks in the range of negative values (below the ice point in the rock) can lead to a decrease in their strength characteristics, and consequently to a decrease in the stability of workings. The aim of the research was to compare two ways of considering absolute heat sources (point sources and sources uniformly distributed along the length of a mine working) when forecasting the thermal regime in mine workings of underground structures. The dependencies used to determine temperature differences in various methods of considering absolute heat sources were established. For the sake of generality, the dependencies were produced in dimensionless (criterial) form. The variants were calculated, and the results are presented in the form of graphs. The aim is to visually present the influence of the method of heat sources when considering the accuracy of air temperature prediction in an underground facility. Key qualitative and quantitative features of the formation of thermal regime in workings at different methods of considering absolute heat sources were established. It was shown in particular that during the transition from a negative temperature in a working to a positive one, incorrect consideration of the action of absolute heat sources can lead to an almost 30 % (1.26 times) difference (i.e., error) in the calculated depth of thawing of discontinuous rocks. It was also established that at a positive temperature, when the initial air temperature in a structure is more than 7.5 °C, there is no fundamental difference in engineering calculations results depending on the method of considering of absolute heat sources.

### Keywords

underground structure, cryolithozone, safety, thermal regime, forecast, heat source, method of considering, temperature

### For citation

Galkin A.F., Pankov V.Yu. Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):207–214. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105>

## Введение

Надежность и безопасность инженерных сооружений в криолитозоне во многом определяются климатическими условиями и изменчивостью свойств грунтов и горных пород под действием внешних факторов: природных [1–3] и антропогенных [4–6]. Это относится как к наземным [7–9], так и к подземным инженерным сооружениям [10–12]. В научном сообществе, изучающем процессы взаимодействия инженерных сооружений с мерзлыми грунтами, давно утвердилось мнение, что главные технические и технологические параметры, определяющие безопасную эксплуатацию подземных сооружений в криолитозоне (как горного профиля, так и не связанного с горным производством), напрямую зависят от теплового режима выработок в период их строительства [13–15] и эксплуатации [16–18]. Прежде всего это объясняется зависимостью прочностных характеристик большинства мерзлых осадочных вмещающих пород от температуры [19–21]. Даже изменение температуры пород в диапазоне отрицательных значений ниже температуры плавления льда ( $T \leq T_{пл}$ ) приводит к уменьшению их прочностных характеристик, а следовательно, и к снижению устойчивости выработок [22–24]. Многие виды дисперсных горных пород, например, льдонасыщенные песчаники вообще имеют нулевую прочность при положительных температурах [13, 16, 17]. Поэтому прогноз теплового режима выработок и окружающего их массива горных пород является необходимым элементом проектирования подземных сооружений криолитозоны. В частности, при обосновании и выборе надежных способов и средств крепления породных обнажений, обеспечивающих безопасную эксплуатацию подземных сооружений в течение всего нормативного срока [14, 25, 26]. Тепловой режим шахт, рудников

и подземных сооружений определяется действием двух групп источников тепла: абсолютных и относительных [13, 17, 27]. В данном случае уместно привести качественную характеристику групп этих источников, которую дал А. Ф. Воропаев [17]. «К первой группе относятся абсолютные источники тепла, которые отдают тепло и нагревают воздух на одинаковую величину при одних и тех же количествах развивающегося тепла независимо от собственно температуры воздуха. Ко второй группе относятся относительные источники тепла, от которых переход тепла и нагревание воздуха происходит вследствие разности температур – температурного напора». К относительным источникам тепла можно отнести такие источники, как поверхность горных выработок, трубопроводы различного назначения, транспортируемое полезное ископаемое и т.п. К группе абсолютных источников тепла относятся потери энергии в электросетях, осветительные приборы, работающие машины и механизмы и т.п. Существует достаточное количество научных исследований, в которых рассмотрены различные аспекты влияния абсолютных источников тепла [28–30], в том числе дизельной техники [29, 31, 32], на формирование теплового режима в подземных сооружениях различного назначения. Как правило, абсолютные источники тепла при построении математических моделей для прогноза теплового режима в подземном сооружении рассматриваются либо как точечные, либо как равномерно распределенные по длине выработки.

Целью настоящих исследований было сравнение двух способов учета абсолютных источников теплового выделения при прогнозе теплового режима горных выработок подземных сооружений: а) как точечных источников; б) как равномерно распределенных по длине выработки источников.

## Методы

С учетом ранее полученных зависимостей [17, 27, 33] для прогноза температуры воздуха в горных выработках различного назначения с использованием понятия коэффициента нестационарного теплообмена [34–36] исходные формулы для расчетов можно записать в следующем виде.

Разность температур в конечной точке при разных способах учета абсолютных источников тепла

$$\Delta t = t_{k1} - t_{k2} = Q_2[Z(Kr + 1) - 1],$$
$$Z = \exp(-Kr). \quad (1)$$

Температура в конце горной выработки при распределенном по длине источнике тепла

$$t_{k1} = T_e + (t_0 - T_e + Q_1)Z. \quad (2)$$

Температура в конце горной выработки при действии точечного источника тепла

$$t_{k2} = T_e + Q_2 + (t_0 - T_e + Q_2)Z. \quad (3)$$

Входящие в формулы (1)–(3) параметры определяются по следующим зависимостям:

$$Q_1 = \frac{q}{GC_p}; \quad Q_2 = \frac{q}{FK_\tau}; \quad Kr = \frac{FK_\tau}{GC_p}, \quad (4)$$

где  $t_{k1}$ ,  $t_{k2}$  – температура воздуха в конце выработки при распределенном (1) и точечном (2) источнике тепла, °С;  $T_e$  – естественная температура горных пород, °С;  $t_0$  – начальная (на входе в выработку) температура воздуха, °С;  $q$  – мощность источника тепла, Вт;  $G$  – массовый расход воздуха в выработке, кг/с;  $C_p$  – удельная теплоемкость влажного воздуха, Дж/кгК;  $F$  – площадь поверхности горной выработки, м<sup>2</sup>;  $K_\tau$  – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>К;  $Kr$  – критерий Кремнева.

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработок различной симметрии может быть определен по известным в горной теплофизике выражениям, приведенным в работах [17, 27].

Формула для расчета относительной ошибки, которую можно допустить при прогнозе температуры, имеет следующий вид:

$$e = \left(1 - \frac{t_{k1}}{t_{k2}}\right) 100 \%. \quad (5)$$

При этом, следуя известным постулатам для инженерных расчетов, будем считать, что если выполняется условие  $e \leq 10 \%$ , то принципиального значения способ учета абсолютных источников тепла в горных выработках при прогнозе теплового режима не имеет.

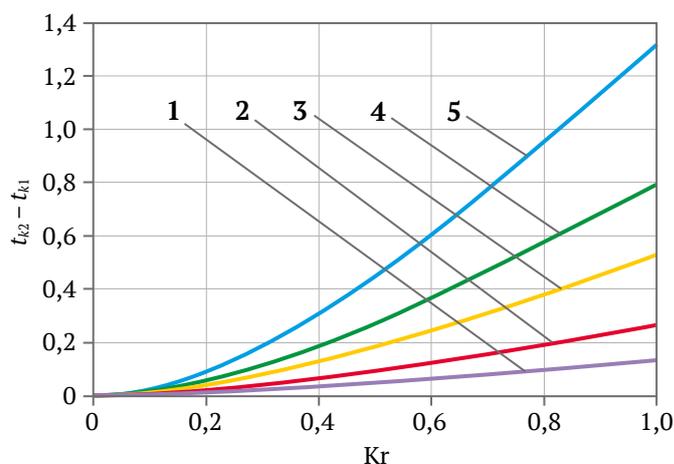
## Обсуждение результатов

Анализ полученных расчетных зависимостей показывает, что при первом способе учета (точечный источник) мы формально изменяем начальную температуру воздуха, подаваемую в выработку. Учет же абсолютных источников как равномерно распределенных по длине сооружения (второй способ учета) в математической модели эквивалентен изменению естественной температуры горных пород. Таким об-

разом, формально задача состоит в оценке степени влияния естественной температуры горных пород и начальной температуры воздуха в сооружении на точность прогноза температуры в конце горной выработки. Простое сравнение формул (2) и (3) позволяет сделать очевидный вывод о том, что равенство значений температур в конце горной выработки при разных способах учета действия абсолютных источников возможно только в том случае, если мощность источника нулевая. То есть, чем меньше мощность источника, тем меньше искомая разность температур воздуха в конце выработки. Количественный анализ должен помочь ответить на вопрос: «При какой мощности абсолютных источников способ их учета при прогнозе температуры не приведет к ошибке, большей, чем допустимая ошибка в инженерной практике?». Для ответа на данный вопрос по приведенным формулам были проведены варианты расчетов, результаты которых представлены в виде 2D и 3D графиков на рис. 1–4. На рис. 1 представлена зависимость разности температур в конце расчетного участка при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости критерия Кремнева  $Kr$  при различной мощности источника  $Q_2$ .

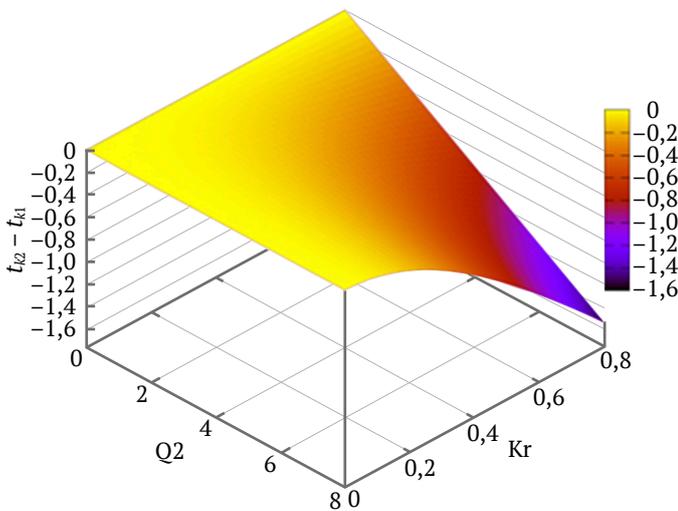
Как видно из графиков, разность температур в рассматриваемом диапазоне исходных данных не превышает 1,5 °С. Причем наблюдается следующая закономерность. Чем меньше мощность источника и значение критерия Кремнева, тем меньше разность температур. То есть тем меньше зависимость конечного результата от способа учета абсолютных источников тепла.

На рис. 2 приведены обобщающие данный вывод 3D графики зависимости разности температур воздуха в конце расчетного участка при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости от приведенной мощности источника  $Q_2$  и критерия Кремнева –  $Kr$ .

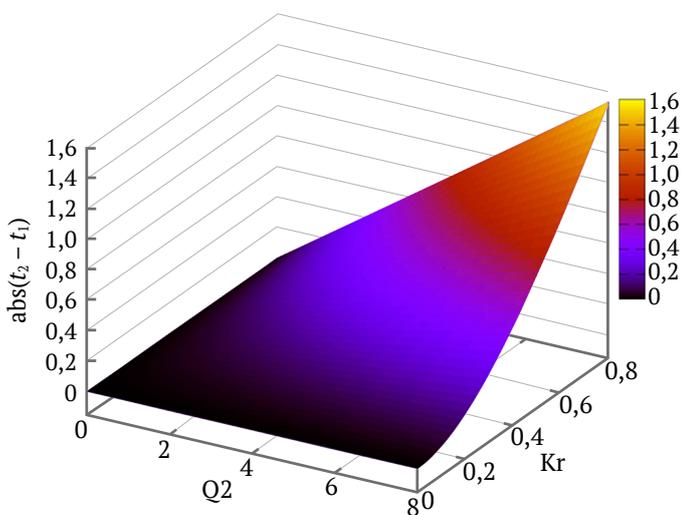


**Рис. 1.** Разность температур воздуха, °С, в конце расчетного участка выработки при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости критерия Кремнева  $Kr$  при различном значении приведенной мощности источника  $Q_2$ :  
1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 2,0; 4 – 3,0; 5 – 5,0

Из графиков на рис. 2 следует, что при учете источника тепла как рассредоточенного по длине мы всегда занижаем температуру воздуха в конце горной выработки. Причем от значений мощности действующих в выработке источников  $Q_2$  и условий теплообмена воздуха с горными породами это не зависит. То есть возникающая ошибка не может быть отнесена в расчетный запас. Абсолютное же значение разности температур (рис. 3) не очень значительно во всем рассмотренном, характерном для подземных сооружений криолитозоны, диапазоне изменения исходных параметров моделирования теплового режима.



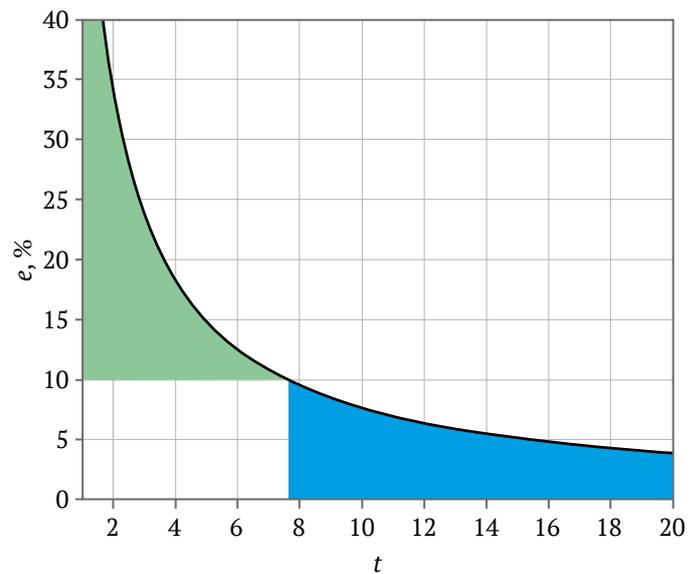
**Рис. 2.** Разность температур воздуха, °С, в конце расчетного участка при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости от приведенной мощности источника  $Q_2$  и критерия Крэмнева



**Рис. 3.** Абсолютное значение разности температуры воздуха, °С, в конце расчетного участка в зависимости от приведенной мощности источника  $Q_2$  и критерия Крэмнева

Как видно из графика на рис. 3, для характерных условий эксплуатации подземных сооружений в криолитозоне разность температур не превышает 1,6 °С. Это значение можно было бы считать вполне приемлемым, укладывающимся в точность инженерного прогноза. Однако следует учитывать, что эта разность не всегда может быть отнесена в расчетный запас. Например, при выборе способа и средства крепления выработок одним из определяющих расчетных параметров является глубина оттаивания горных пород. Глубина оттаивания и температура воздуха связаны между собой зависимостью, близкой к квадратичной. То есть, например, при переходе с отрицательного на положительный тепловой режим в сооружении за счет действия абсолютных источников тепла изменение температуры воздуха в сооружении на 1,6 °С (при прочих равных условиях) приведет к увеличению глубины оттаивания в 1,26 раза. Это превышает допустимую в инженерной практике величину в 10 %. Поэтому в подобных случаях надо ориентироваться на расчетную величину, полученную при моделировании абсолютных источников как точечных, поскольку в этом случае выбор способа учета источников является определяющим для получения правильного и надежного конечного результата расчета проектного параметра. Естественно, что все сказанное зависит от начальной температуры воздуха в подземном сооружении. На рис. 4 показана область начальных температур, при которой ошибка в расчете глубины оттаивания не превысит допустимого значения (выделено синим цветом на рисунке).

То есть, если начальная температура воздуха в сооружении меньше или равна приблизительно 7,5 °С, то способ учета абсолютных источников имеет значение для точности прогноза температуры. В противном случае – нет.



**Рис. 4.** Ошибка в определении глубины оттаивания мерзлых пород вокруг подземного сооружения в зависимости от начальной температуры воздуха  $t$ , °С



### Заключение

Основные выводы, практическая значимость проведенного исследования и направление будущих исследований. Проведена качественная и количественная оценка влияния способа учета абсолютных источников тепла на температуру воздуха в горных выработках при прогнозе теплового режима подземных сооружений криолитозоны. Рассмотрены два возможных способа учета абсолютных источников тепла при математическом моделировании тепловых процессов в горных выработках: как точечных источников и как равномерно распределенных по длине выработки источников. Приведены формулы для определения температуры воздуха в конце горной выработки в зависимости от способа учета абсолютных источников. Для общности анализа расчетные формулы представлены в виде функциональных зависимостей от критерия Кремнева и приведенной суммарной мощности абсолютных источников тепла. Выполненный качественный анализ полученных зависимостей показал, что первый способ учета (точечный источник) эквивалентен изменению начальной температуры воздуха, подаваемого в выработку. Учет же абсолютных источников как равномерно распределенных по длине сооружения (второй способ учета) в математической модели эквивалентен изменению естественной температуры горных пород. Количественный анализ показал, в частности, что чем меньше мощность источника и значение критерия Кремнева, тем мень-

ше зависимость конечного результата (температуры воздуха в конце горной выработки) от способа учета абсолютных источников при прогнозе теплового режима. В качестве примера рассмотрено влияние способа учета абсолютных источников на точность прогноза глубины оттаивания дисперсных мерзлых пород вокруг выработки. Показано, что при переходе от отрицательного теплового режима в выработке к положительному неправильный учет действия абсолютных источников тепла может привести к изменению глубины оттаивания дисперсных пород почти на 30 % (в 1,26 раза). Это может оказать существенное влияние на выбор параметров крепления горных выработок, пройденных в дисперсных мерзлых породах, который напрямую зависит от температурного режима горных пород. В то же время установлено, что при положительном тепловом режиме для начальной температуры воздуха в сооружении больше 7,5 °С принципиальной разности для инженерных расчетов в способе учета абсолютных источников тепла нет. В целом же установлено, что для характерных условий строительства и эксплуатации подземных сооружений криолитозоны, например, золотодобывающих подземных рудников, принципиальной разницы в способах учета абсолютных источников тепла при прогнозе теплового режима нет. Отклонения в определении температуры воздуха в конце горной выработки при различных способах учета, как правило, не превышают допустимых в инженерной практике значений.

### Список литературы

1. Zhirkov A., Permyakov P., Wen Z., Kirillin A. Influence of rainfall changes on the temperature regime of permafrost in Central Yakutia. *Land*. 2021;10(11):1230. <https://doi.org/10.3390/land10111230>
2. Станиловская Ю.В., Мерзляков В.П., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Оценка опасности полигонально-жильных льдов для линейных сооружений. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2014;(4):367–378.
3. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Well drilling in permafrost regions: Dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019;38(2):3351. <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351>
4. Gao Q., Wen Z., Feng W. et al. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan plateau. *Cold Regions Science and Technology*. 2020;178:103–116. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103116>
5. Zheleznyak M., Kirillin A., Zhirkov A. et al. Permafrost distribution and temperature in the Elkon Horst, Russia. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021;13(2):107–122. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2021.20027>
6. Wen Z., Wang D., Ma W. et al. Thermal interaction between a thermokarst lake and a nearby embankment in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;155:214–224. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.08.010>
7. Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Varlamov S.P. Numerical modeling of railway embankment deformations in permafrost regions, Central Yakutia. In: Petriaev A., Konon A. (eds.) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 50*. Singapore: Springer; 2020. Pp. 93–103. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_11)
8. Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Шац М.М., Сивцев М.А. Численное моделирование изменения мерзлотных условий взлётно-посадочной полосы аэропорта Олекминск. *Маркшейдерия и недропользование*. 2021;(5):22–32.
9. Пермяков П.П., Жирков А.Ф., Железняк М.Н. Учет процесса внутрипочвенной конденсации при моделировании теплообмена в мерзлых грунтах. *Инженерно-физический журнал*. 2021;94(5):1260–1270. (Перев. вер.: Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Account for the process of underground condensation in modeling heat and moisture exchange in frozen soils. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(5): 1232–1241. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02404-8>)
10. Kutasov I.M., Eppelbaum L.V. The effect of thermal properties changing (at ice-water transition) on the radius of permafrost thawing. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;151:156–158.



11. Железняк М.Н., Шац М.М. Теплофизическая характеристика алмазного месторождения «Айхал» (Якутия). *Недропользование XXI век*. 2022;(1):98–103. URL: <https://nedra21.ru/archive/160/2864/>
12. Николаева М.В., Стручкова Г.П. Прогнозирование теплового взаимодействия участка подземного трубопровода с льдистыми грунтами. *Технологии нефти и газа*. 2018;(4):56–60.
13. Дядькин Ю.Д. *Основы горной теплофизики*. М.: Недра; 1968. 256 с.
14. Скуба В.Н. *Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты*. Новосибирск: Наука; 1974. 118 с.
15. Шерстов В.А. *Повышение устойчивости выработок россыпных шахт Севера*. Новосибирск: Наука; 1980. 56 с.
16. Кузьмин Г.П. *Подземные сооружения в криолитозоне*. Новосибирск: Наука; 2002. 176 с.
17. Воропаев А.Ф. *Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах*. М.: Недра; 1968. 249 с.
18. Вернигор В.М., Морозов К.В., Бобровников В.Н. О подходах к проектированию теплового режима рудников в условиях многолетнемерзлых пород. *Записки Горного института*. 2013;205:139–140. URL: [https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5508?setLocale=ru\\_RU](https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5508?setLocale=ru_RU)
19. Zhang S., Teng J., He Z. et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils. *Géotechnique*. 2016;66(11):927–940. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.016>
20. Teng J., Shan F., He Z. et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. *Géotechnique*. 2019;69(3):251–259. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.208>
21. Xu G., Qi J., Wu W. Temperature Effect on the compressive strength of frozen soils: a review. recent advances in geotechnical research. In: Wu, W. (eds.) *Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer, Cham.; 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19)
22. Niu F., Li A., Luo J. et al. Soil moisture, ground temperatures, and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*. 2017;133:7–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.007>
23. Хименков А.Н., Гагарин В.Е. Подходы к изучению деформаций в многолетнемерзлых грунтах. *Арктика и Антарктика*. 2022;(2):36–65. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.2.38229>
24. Вахрин И.С., Кузьмин Г.П., Спектр В.В. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов естественного сложения. *Успехи современного естествознания*. 2020;(8):37–42. <https://doi.org/10.17513/use.37455>
25. Галкин А.Ф. Повышение устойчивости горных выработок в криолитозоне. *Записки Горного института*. 2014;207:99–102. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5392>
26. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Formation of thermal regime in a permafrost area mine. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (eds) *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 247*. Springer, Cham; 2022. Pp. 205–213. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_21)
27. Щербань А.Н., Кремнев О.А. *Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт*. Киев: АН УССР; 1959. 430 с.
28. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Влияние закладочных работ на формирование теплового режима в горных выработках в условиях рудников ОАО «Норильский никель». *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. 2012;(2):110–114.
29. Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Особенности формирования теплового режима россыпных шахт криолитозоны при ведении добычных работ с применением самоходной техники. *Горный журнал*. 2015;(4):29–32. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06>
30. Казаков Б.П., Зайцев А.В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких шахт и рудников. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014;(10):91–97.
31. Галкин А.Ф., Дормидонтов А.В., Курта И.В., Короткова К.Б. Влияние дизельных машин на температурный режим горных выработок. *Естественные и технические науки*. 2018;(5):84–86.
32. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Изменение температуры в камерах подземных сооружений при работе дизельных установок. *Вопросы безопасности*. 2022;(4):27–33. <https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938>
33. Черняк В.П., Щербань А.Н. Методы прогноза теплового режима глубоких шахт. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1977;(2):88–92.
34. Щербань А.Н., Черняк В.П., Брайчева Н.А. Решение системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для расчета температуры рудничного воздуха. *Доклады Академии наук Украинской ССР. Серия А: Физико-математические и технические науки*. 1975;(9):843–847.
35. Добрянский Ю.П. *Расчеты на ЭВМ тепловлажностных режимов подземных выработок*. Киев: Наукова думка; 1991. 122 с.
36. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Forecasting of thermal regime in an oil mine. In: Mottaeva A. (eds.) *Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 180*. Springer, Cham; 2022. Pp. 39–46. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_4)



## References

1. Zhirkov A., Permyakov P., Wen Z., Kirillin A. Influence of rainfall changes on the temperature regime of permafrost in Central Yakutia. *Land*. 2021;10(11):1230. <https://doi.org/10.3390/land10111230>
2. Stanilovskaya Yu.V., Merzlyakov V.P., Sergeev D.O., Khimenkov A.N. Ice wedge hazard assessment for linear objects. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2014;(4):367–378. (In Russ.)
3. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Well drilling in permafrost regions: Dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019;38(2):3351. <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351>
4. Gao Q., Wen Z., Feng W. et al. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan plateau. *Cold Regions Science and Technology*. 2020;178:103–116. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103116>
5. Zhelezniak M., Kirillin A., Zhirkov A. et al. Permafrost distribution and temperature in the Elkon Horst, Russia. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021;13(2):107–122. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2021.20027>
6. Wen Z., Wang D., Ma W. et al. Thermal interaction between a thermokarst lake and a nearby embankment in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;155:214–224. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.08.010>
7. Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Varlamov S.P. Numerical modeling of railway embankment deformations in permafrost regions, Central Yakutia. In: Petriaev A., Konon A. (eds.) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 50*. Singapore: Springer; 2020. Pp. 93–103. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_11)
8. Zhirkov A., Zheleznyak M., Shats M., Sivtsev M. Numerical simulation change permafrost conditions of the runway airport Olekminsk. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2021;(5):22–32. (In Russ.)
9. Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Account for the process of underground condensation in modeling heat and moisture exchange in frozen soils. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(5):1232–1241. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02404-8> (Orig. ver.: Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Account for the process of underground condensation in modeling heat and moisture exchange in frozen soils. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal*. 2021;94(5):1260–1270. (In Russ.))
10. Kutasov I.M., Eppelbaum L.V. The effect of thermal properties changing (at ice-water transition) on the radius of permafrost thawing. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;151:156–158.
11. Zheleznyak M.N., Shatz M.M. Teplofizikal conditions of diamond deposit of the Aikhal (Yakutia). *Nedropol'zovaniye XXI Vek*. 2022;(1):98–103. (In Russ.) URL: <https://nedra21.ru/archive/160/2864/>
12. Nikolaeva M.V., Struchkova G.P. Forecasting the thermal interaction of underground pipeline with ice grounds. *Tekhnologii Nefti i Gaza*. 2018;(4):56–60. (In Russ.)
13. Dyadkin Yu.D. *Fundamentals of mining thermal physics*. Moscow: Nedra Publ.; 1968. 256 p. (In Russ.)
14. Skuba V.N. *Study of mine workings stability in permafrost conditions*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1974. 118 p. (In Russ.)
15. Sherstov V.A. *Improving stability of mine workings at placer mines in the North*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1980. 56 p. (In Russ.)
16. Kuzmin G.P. *Underground structures in cryolithozone*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2002. 176 p. (In Russ.)
17. Voropaev A.F. *Theory of heat exchange of mine air and rocks in deep mines*. Moscow: Nedra Publ.; 1968. 249 p. (In Russ.)
18. Vernigor V.M., Morozov K.V., Bobrovnikov V.N. On approaches to designing of thermal regime at ore mines under permafrost conditions. *Journal of Mining Institute*. 2013;205:139–140. (In Russ.) URL: [https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5508?setLocale=en\\_US](https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5508?setLocale=en_US)
19. Zhang S., Teng J., He Z. et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils. *Géotechnique*. 2016;66(11):927–940. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.016>
20. Teng J., Shan F., He Z. et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. *Géotechnique*. 2019;69(3):251–259. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.208>
21. Xu G., Qi J., Wu W. Temperature Effect on the compressive strength of frozen soils: a review. recent advances in geotechnical research. In: Wu, W. (eds.) *Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer, Cham; 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19)
22. Niu F., Li A., Luo J. et al. Soil moisture, ground temperatures, and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*. 2017;133:7–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.007>
23. Khimenkov A.N., Gagarin V.E. Approaches to the study of deformations in permafrost soils. *Arctic and Antarctica*. 2022;(2):36–65. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.2.38229>
24. Vakhnin I.S., Kuzmin G.P., Spektr V.V. Haw deformation characteristics of undisturbed soils. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(8):37–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37455>
25. Galkin A.F. Increase of stability of mine workings in the permafrost zone. *Journal of Mining Institute*. 2014;207:99–102. (In Russ.) URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5392>



26. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Formation of thermal regime in a permafrost area mine. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (eds) *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 247*. Springer, Cham; 2022. Pp. 205–213. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_21)
27. Shcherban A.N., Kremnev O.A. *Scientific basis for calculating and regulating thermal regime of deep mines*. Kyiv: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR; 1959. 430 p. (In Russ.)
28. Kazakov B., Zaitsev A., Shalimov A. Influence of backfill operations on the formation of thermal conditions of mine workings in OJSC MMC "Norilsk Nickel". *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2012;(2):110–114. (In Russ.)
29. Kurilko A.S., Khokholov Yu.A., Soloviev D.E. Features of formation of temperature conditions in placer mines equipped with self-propelled machines in permafrost zone. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(4):29–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06>
30. Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Study of the formation of thermal regimes in deep mines. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2014;(10):91–97. (In Russ.)
31. Galkin A.F., Dormidontov A.V., Kurta I.V., Korotkova K.B. Influence of diesel vehicles on the temperature regime of mine workings. *Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki*. 2018;(5):84–86. (In Russ.)
32. Galkin A., Pankov V.Y., Fedorov Y.V. Temperature Change in the Chambers of Underground Structures when operating Diesel Units. *Security Issues*. 2022;(4):27–33. <https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938>
33. Chernyak V.P., Shcherban A.N. Methods for predicting thermal regime of deep mines. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1977;(2):88–92 (In Russ.)
34. Shcherban A.N., Chernyak V.P., Braicheva N.A. Solution of a system of differential equations with variable coefficients to calculate the temperature of mine air. *Doklady Akademii nauk Ukrainy SSR. Seriya A: Fiziko-Matematicheskie i Tekhnicheskie Nauki*. 1975;(9):843–847 (In Russ.)
35. Dobryansky Yu.P. *Computations of heat and humidity regimes of underground workings*. Kyiv: Naukova Dumka Publ.; 1991. 122 p. (In Russ.)
36. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Forecasting of thermal regime in an oil mine. In: Mottaeva A. (eds) *Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 180*. Springer, Cham; 2022. Pp. 39–46. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_4)

### Информация об авторах

**Александр Фёдорович Галкин** – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5924-876X](https://orcid.org/0000-0002-5924-876X), Scopus ID [56559565600](https://scopus.com/authorid/56559565600); e-mail [afgalkin@mail.ru](mailto:afgalkin@mail.ru)

**Владимир Юрьевич Панков** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4933-0265](https://orcid.org/0000-0003-4933-0265), Scopus ID [57216812632](https://scopus.com/authorid/57216812632); e-mail [pankov1956@inbox.ru](mailto:pankov1956@inbox.ru)

### Information about the authors

**Alexander F. Galkin** – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Geothermal Permafrost, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5924-876X](https://orcid.org/0000-0002-5924-876X), Scopus ID [56559565600](https://scopus.com/authorid/56559565600); e-mail [afgalkin@mail.ru](mailto:afgalkin@mail.ru)

**Vladimir Yu. Pankov** – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor of the Department of Automobile Roads and Airfields, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4933-0265](https://orcid.org/0000-0003-4933-0265), Scopus ID [57216812632](https://scopus.com/authorid/57216812632); e-mail [pankov1956@inbox.ru](mailto:pankov1956@inbox.ru)

Поступила в редакцию	01.04.2023	Received	01.04.2023
Поступила после рецензирования	19.06.2023	Revised	19.06.2023
Принята к публикации	20.06.2023	Accepted	20.06.2023