

## *Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение*

УДК 536.328

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-543-552>

*Оригинальная статья*

### **Геотермический критерий оценки устойчивости многолетнемерзлых пород слоя годовых теплооборотов**

**А. Ф. Галкин<sup>1</sup>, М. Н. Железняк<sup>1</sup>, А. Ф. Жирков<sup>✉1</sup>, В.И. Балута<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Российская Федерация*

<sup>✉</sup>[zhirkov\\_af@mail.ru](mailto:zhirkov_af@mail.ru)

#### **Аннотация**

Начиная с девяностых годов прошлого столетия существенно возросла изменчивость климата, стали проследиваться различные климатические аномалии. На территории криолитозоны и примыкающих регионов наметилась устойчивая тенденция к повышению температуры воздуха, что негативно сказывается на состоянии многолетнемерзлых пород. В связи с этим актуальной становится оценка термической устойчивости многолетнемерзлых пород при современном изменении климата. Предложен геотермический критерий ( $G_k$ ) для оценки степени влияния изменения климата на температурный режим пород слоя годовых теплооборотов.  $G_k$  выражается через безразмерный температурный симплекс  $t^* = (t_i/T_c)$  и критерий Фурье. Геотермический критерий предназначен для интерпретации данных, полученных методом термометрии в скважинах. Теоретически обоснована целесообразность использования предложенного критерия на практике, показаны его достаточная универсальность и принципиальная возможность применения для интерпретации данных многолетних натурных наблюдений за формированием температурного режима пород в слое годовых теплооборотов.

**Ключевые слова:** геотермический критерий, изменение климата, температура грунтов, многолетнемерзлые породы, деятельный слой, слой годовых теплооборотов, криолитозона

**Финансирование.** Работы выполнены в рамках бюджетного проекта «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (НИОКТР № 122011800062-5); расширение подходов и верификация данных осуществлены за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10032 «Разработка методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем».

**Для цитирования:** Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф., Балута В.И. Геотермический критерий оценки устойчивости многолетнемерзлых пород слоя годовых теплооборотов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):543–552. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-543-552>

*Original article*

### **Geothermal criterion for assessing the stability of frozen soils in seasonally active permafrost**

**Aleksandr F. Galkin<sup>1</sup>, Mikhail N. Zheleznyak<sup>1</sup>, Aleksandr F. Zhirkov<sup>✉1</sup>, Victor I. Baluta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>✉</sup>[zhirkov\\_af@mail.ru](mailto:zhirkov_af@mail.ru)

#### **Abstract**

Since the 1990s, climate variability has significantly increased, revealing various climatic anomalies. A clear trend of rising air temperatures has been observed in the permafrost zone and its adjacent areas, adversely affecting the state of frozen soils. Consequently, it is becoming increasingly important to assess the thermal stability of frozen soils in light of current climate change. As a result, it is becoming increasingly crucial to evaluate the thermal stability of these

frozen soils in the context of ongoing climate change. A geothermal criterion ( $G_k$ ) is suggested to assess the impact of climate change on the temperature regime of frozen soils in areas with seasonally active permafrost. ( $G_k$ ) is represented through a dimensionless temperature simplex  $t^* = (t_i/T_c)$  and the Fourier criterion. It is intended to analyze experimental data from geothermal permafrost research collected via borehole thermometry. The theoretical basis for the practical use of this proposed criterion has been established, showing its broad applicability and significant potential for interpreting data from long-term in-situ observations of temperature regime development in frozen soils with seasonally active permafrost.

**Keywords:** geothermal criterion, climate change, soil temperature, permafrost, active layer, seasonally-active permafrost, permafrost zone

**Funding.** This study was conducted within the framework of the budgeted project “Thermal field and cryogenic layer of the North-East of Russia. Features of formation and dynamics” (No. 122011800062-5); Expanding approaches and verifying data was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-61-10032, Development of Hybrid Intelligence Methods for Solving Problems of Infrastructure Assessment in the Far North on the Basis of High-Performance Computing Systems”.

**For citation:** Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Baluta V.I. Geothermal criterion for assessing the stability of frozen soils in seasonally active permafrost. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):543–552. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-543-552>

## Введение

Изучение геотемпературного поля Земли в криолитозоне является основной фундаментальной задачей геокриологии. Институтом мерзловедения уже более полувека проводятся системные исследования температурного режима различных районов криолитозоны методом скважинной термометрии. Результаты изложены в фундаментальных трудах П.И. Мельникова, В.Т. Балобаева, П.А. Соловьева, И.А. Некрасова, В.В. Баулина, Е.М. Катасонова, С.М. Фотиева, В.Р. Алексеева, М.Н. Железняк и других известных ученых [1–5]. Большой объем экспериментальных данных о температурном режиме пород слоя годовых теплооборотов (СГТО) приведен в работах А.В. Павлова [6]. Накоплено огромное количество измерений, сведенных в единые базы, которые постоянно пополняются и являются уникальным хранилищем данных, полученных многолетними трудами нескольких поколений российских мерзловедов. Эти базы содержат справочную информацию по скважинам и их теплофизические характеристики и могут быть использованы для проведения расчетов теплового потока, прогноза трансформации зоны распространения многолетнемерзлых горных пород, при палеогеографических реконструкциях, а также научном обосновании инженерно-геологических условий при проектировании и строительстве различных промышленных линейных сооружений, разработки месторождений и добычи полезных ископаемых [7, 8].

Многочисленными исследованиями доказана неразрывная связь между температурным режимом пород криолитозоны и устойчивостью при-

родных ландшафтов, нарушаемой негативным влиянием криогенеза [2, 3, 9–13]. При этом установлено, что процессы криогенеза значительно усиливаются и приводят к нарушению экологического равновесия при антропогенном воздействии на природные ландшафты. Так, в [10] отмечается, что в последние годы в связи с изменениями климата и антропогенными нарушениями на территории Якутии происходит активизация криогенных процессов, и показано, что любое антропогенное воздействие может привести к деградации вечной мерзлоты и ухудшению социально-экономической ценности мерзлотных ландшафтов. Поэтому проблема изучения тенденций развития криогенных ландшафтов имеет не только экологическую, но и социально-экономическую, культурную и историческую актуальность. Решению проблемы снижения отрицательного влияния таких проявлений криогенеза, как пучение, морозобойное растрескивание грунтов, наледообразование и др., на инженерные сооружения уделяется большое внимание в научном и инженерном сообществе как в нашей стране, так и за рубежом [14–21]. Негативное влияние изменения температурного режима деятельного слоя (ДС) грунтов на инженерные сооружения связано, прежде всего, с существенной зависимостью прочностных свойств дисперсных пород от температуры [22–25]. Поэтому точное знание диапазона возможных изменений температурного режима грунтов ДС при антропогенном воздействии и изменении климата является актуальной задачей фундаментальной геокриологии и инженерного мерзловедения.

Известны различные подходы для оценки влияния изменения (потепления) климата на темпе-

ратурный режим пород криолитозоны. Обычно они основаны на определении либо связи изменения температур на заданной глубине (в течение длительного периода времени – годовые циклы) со среднегодовой температурой атмосферного воздуха, либо изменения глубины деятельного слоя в различные периоды климатического цикла, или же на анализе уравнения теплового баланса в теплый и холодный периоды года [3, 26–29]. Например, П.П. Гаврильевым [26] предложен комплексный критерий оценки состояния и устойчивости криогенных агроландшафтов, позволяющий прогнозировать степень негативного влияния различных факторов. В [28, 29] в качестве критерия использован предложенный Н.А. Цытовичем параметр, характеризующий отношение глубины оттаивания к глубине промерзания грунта в различные годы. Если критерий больше единицы, то делается качественный вывод об отепляющем влиянии климата на породы СГТО. Если параметр меньше единицы, то влияние климата является охлаждающим. При этом авторы не учитывали, что критерий предложен не для криолитозоны, в которой он всегда будет равен единице. Поэтому правомерность такого подхода для оценки тепловых процессов в деятельном слое криолитозоны при изменении климата нуждается в отдельном обосновании. В [27] в качестве критерия использован температурный фактор: изменение абсолютной температуры пород на различных глубинах от поверхности. Такой метод, несмотря на его объективность, достаточно трудоемок для обработки больших массивов данных геотермических наблюдений и не позволяет однозначно сделать сравнительные качественные выводы для различных районов криолитозоны.

Целью настоящей работы являлась разработка критерия для оценки степени влияния изменения климата на температурный режим пород слоя годовых теплооборотов в различных регионах с помощью интерпретации экспериментальных данных геотермических исследований многолетнемерзлых пород, полученных методом термометрии в скважинах.

### Материалы и методы

Температурное поле грунтов деятельного слоя при известной температуре поверхности можно определить следующим образом [30]:

$$\theta_x = (1 - x/\delta)^2, \quad \delta = 2\sqrt{3F_0}, \quad (1)$$

$$\theta_x = (T_x - T_e)/(t_{\text{п}} - T_e), \quad (2)$$

где  $x$  – безразмерная координата, ед.;  $\delta$  – безразмерный радиус теплового влияния поверхности, ед.;  $F_0$  – критерий (число) Фурье, ед.;  $T_x, t_{\text{п}}, T_e$  – температура пород на глубине  $x$ , температура поверхности грунта, температура на глубине зоны теплового влияния поверхности (глубине годовых теплооборотов) соответственно, °С.

Разделим условно весь календарный год на два климатических периода: с положительной ( $t_{\text{п}} \geq T_{\text{пл}}$ ) и отрицательной ( $t_{\text{п}} \leq T_{\text{пл}}$ ) температурой поверхности грунта, то есть теплый и холодный периоды года. Здесь  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления льда в грунте, °С. Глубина деятельного слоя  $s$ , на которой температура грунта равна температуре плавления льда, может быть определена по формуле, полученной из (1) и (2):

$$s = 2(1 + \sqrt{\theta_{\text{л}}})\sqrt{3F_{0\text{л}}}, \quad (3)$$

$$\theta_{\text{л}} = (T_{\text{пл}} - T_e)/(t_{\text{л}} - T_e). \quad (4)$$

Безразмерную минимальную температуру на глубине  $s$  в конце зимнего периода можно найти по формуле (1), подставляя вместо безразмерной координаты  $x$  значение, полученное по формуле (3):

$$\theta_3 = [1 - (1 + \sqrt{\theta_{\text{л}}})\sqrt{F_{0\text{л}}/F_{03}}]^2, \quad (5)$$

$$\theta_3 = (T_3 - T_e)/(t_3 - T_e). \quad (6)$$

Для скального массива  $F_{0\text{л}} = \tau_{\text{л}}$  и  $F_{03} = \tau_3$ , а уравнение (5) примет более простой вид

$$\theta_3 = [1 - (1 + \sqrt{\theta_{\text{л}}})\sqrt{\tau_{\text{л}}/\tau_3}]^2, \quad (7)$$

здесь  $\tau_{\text{л}}, \tau_3$  – длительность теплового и холодного периода года соответственно, ч.

Естественно, что данный критерий мы приводим только для оценки возможности его использования на практике и степени представительности, т. е. возможности по количественным значениям критерия делать качественные выводы и определять существующие закономерности. Анализ выражений (6) и (7) показывает, что в количественном плане удобнее пользоваться не величиной  $\theta_3$ , а ее обратным значением. Кроме того, для удобства использования экспериментальных данных, с учетом того, что поверхностный покров имеет большое разнообразие, вместо параметра  $t_3$  целесообразно использовать среднюю зимнюю температуру атмосферного воздуха  $t_{\text{в}}$ . С учетом этих допущений предлагаемый безразмерный геотермический критерий оценки можно представить в виде

$$G_k = (t_{\text{в}} - T_e)/(T_3(s) - T_e), \quad (8)$$

где  $G_k$  – безразмерный геотермический критерий (число), ед.;  $T_3(s)$  – минимальная температу-

ра пород на максимальной глубине протаивания (глубине деятельного слоя), °С.

Определим порядок численных значений геотермического критерия. Возьмем характерные средние значения для района Центральной Якутии (г. Якутск):  $t_b = -16,0$  °С;  $T_e = -4,0$  °С;  $T_3 = -11,0$  °С. Численное значение геотермического критерия будет равно

$$G_k = \frac{-16 - (-4)}{-11 - (-4)} = \frac{12}{7} = 1,71.$$

Допустим, что в зимний период года средняя температура повысилась на 2,0 °С и составила -14,0 °С. Температура на глубине ДС тоже повысилась и составила -10,0 °С. Геотермический критерий (число) изменился и стал равным

$$G_k = \frac{-14 - (-4)}{-10 - (-4)} = \frac{10}{6} = 1,67.$$

То есть уменьшение значения геотермического критерия (числа)  $G_k$  свидетельствует о «растеплении» пород ДС. В то же время отметим, что разница между значениями чисел не очень большая, составляет всего 2,3 % и говорить о представительности критерия пока нельзя. Можно упростить критерий и все параметры, от которых он зависит, сделать косвенными. Например, в расчетах принимать только два параметра: минимальную температуру на глубине деятельного слоя и температуру на глубине СГТО. Тогда можно записать

$$G_k = \frac{-11}{(-4)} = 2,75, \quad G_k = \frac{-10}{(-4)} = 2,5,$$

$$G_k = \frac{-9}{(-4)} = 2,25.$$

В этом случае при изменении на 1,0 °С геотермическое число  $G_k$  изменяется на 9,1 %, на 2,0 °С – на 18,2 %. Очевидно, что в такой интерпретации геотермический критерий достаточно представительный. Таким образом, для оценки изменения температурного режима грунтов при изменении климатических параметров целесообразно геотермический критерий  $G_k$  представить в виде

$$G_k = T_3(s)/T_e. \quad (9)$$

Так как параметр  $T_e$  для каждого конкретного региона является величиной постоянной, то точность критерия будет напрямую определяться точностью измерения минимальной зимней температуры на глубине ДС. В принципе, температура на глубине деятельного слоя не обязательно должна быть минимальной. Учитывая большую

тепловую инерционность породного массива, для сравнения и вычисления геотермического критерия может быть использована температура в точке, близкой к глубине ДС в конце зимнего сезона. Главное, чтобы замеры проводились на одной глубине и в одно и то же время (день) в разные годы, т. е. были сравнимы. Расчетную температуру на глубине деятельного слоя можно определить по следующей формуле, полученной из (5) и (6):

$$G_k = (t_b - T_e)/(T_3(s) - T_e),$$

$$T_3(s) = T_e + (t_3 - T_e) [1 - (1 + \sqrt{\theta_{\text{л}}})\sqrt{F_{0\text{л}}/F_{03}}]^2. \quad (10)$$

Используя выражение (9), найдем формулу для численного определения предлагаемого геотермического критерия

$$G_k = 1 + (t_3^* - 1)[1 - (1 + \sqrt{\theta_{\text{л}}})\sqrt{F_{0\text{л}}/F_{03}}]^2, \quad (11)$$

$$\theta_{\text{л}} = (T_{\text{пл}}^* - 1)/(t_{\text{л}}^* - 1), \quad (12)$$

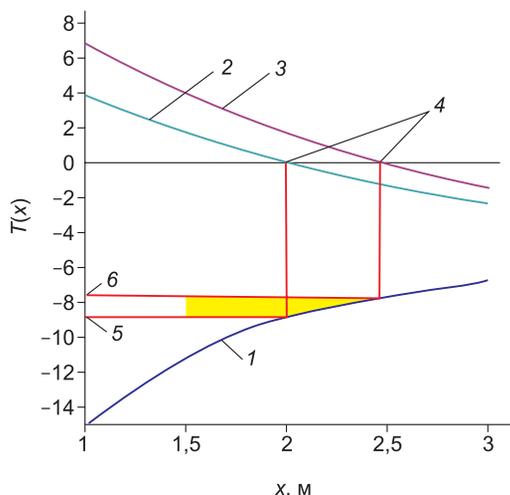
здесь введены следующие симплексы:  $T_{\text{пл}}^* = \left(\frac{T_{\text{пл}}}{T_e}\right)$ ;

$$t_{\text{л}}^* = \left(\frac{t_{\text{л}}}{T_e}\right); \quad t_3^* = \left(\frac{t_3}{T_e}\right).$$

Таким образом получаем, что расчетный геотермический критерий (геотермическое число)  $G_k$  зависит от безразмерного температурного симплекса  $t^* = (t_i/T_e)$  и критерия Фурье. Симплекс  $T_{\text{пл}}^*$  с достаточной для инженерных оценок точностью может быть принят равным нулю. Выражения (11) и (12) показывают, что на самом деле предлагаемый критерий для оценки температурного режима ДС, несмотря на простоту, априори учитывает все особенности теплообмена грунта с атмосферой. И позволяет по экспериментально определенным всего в двух точках температурам не только сделать количественную оценку, но и установить количественные и качественные закономерности изменения температурного режима грунтов деятельного слоя при изменении климата в регионе путем сравнения значений критерия в разные годы наблюдений.

### Результаты и обсуждение

Рассмотрим характер изменения температуры по глубине в слое годовых теплооборотов при изменении средней температуры воздуха в теплый и холодный периоды года. Для наглядности нами принят широкий диапазон изменения исходных данных, чтобы кривые на графиках не сливались. На рис. 1 показано изменение температуры пород при увеличении среднелетней

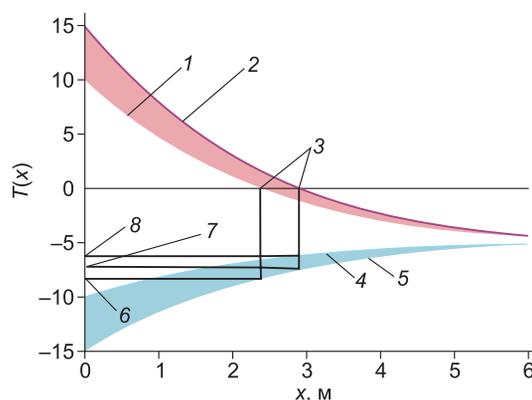


**Рис. 1.** Изменение минимальной зимней температуры на глубине деятельного слоя при повышении среднелетней температуры: 1 – температурный профиль в конце зимнего периода; 2 – температурный профиль в конце теплого периода; 3 – температурный профиль при повышении среднелетней температуры с +4,0 до +7,0 °С; 4 – глубина деятельного слоя, м; 5, 6 – минимальная температура на глубине деятельного слоя при среднелетней температуре +4,0 и +7,0 °С соответственно

**Fig. 1.** The change in the minimum winter temperature at the depth of the active layer with an increase in the average summer temperature: 1. Temperature profile at the end of the winter period; 2. Temperature profile at the end of the warm period; 3. Temperature profile with an increase in average summer temperature from +4.0 to +7.0 °C; 4. Depth of the active layer (m); 5, 6. Minimum temperature at the depth of the active layer with an average summer temperature of +4.0 and +7.0 °C, respectively

температуры на 3,0 °С. Учитывая, что темп охлаждения пород в зимний период мало зависит от температурного режима в конце летнего периода, кривая изменения температуры по глубине показана неизменной для первого и второго годов охлаждения массива.

Глубина деятельного слоя в первый год наблюдений составила 2,0 м. На второй год, при повышении среднелетней температуры на 3,0 °С, глубина оттаивания составила почти 2,5 м. При этом минимальная зимняя температура на глубине ДС составила –9,0 и –7,5 °С соответственно. Очевидно влияние повышения летней температуры воздуха на зимнюю температуру на глубине ДС, которая повысилась на 1,5 °С. Хотя сам зимний температурный профиль принят нами постоянным в течение двух рассматриваемых лет, в действительности, кривая зимнего профиля будет располагаться несколько выше кривой 1, а следовательно, и повышение температуры пород на глубине ДС будет еще больше. (На рисун-

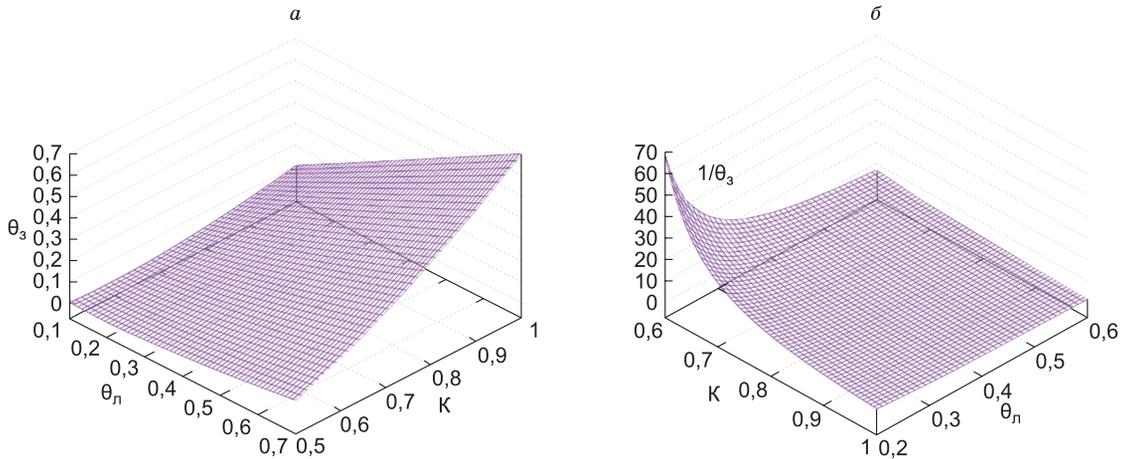


**Рис. 2.** Изменение температуры на глубине деятельного слоя при изменении среднелетней и средnezимней температуры: 1 – температурный профиль в конце теплого периода первого года; 2 – температурный профиль в конце теплого периода на второй год при повышении среднелетней температуры с +10,0 до +15,0 °С; 3 – глубина деятельного слоя, м; 4, 5 – температурный профиль в конце зимнего периода; 6–8 – минимальная температура на глубине деятельного слоя при различных значениях среднелетней и средnezимней температуры

**Fig. 2.** The change in temperature at the depth of the active layer with a change in the average summer and average winter temperatures: 1. Temperature profile at the end of the warm period in the first year; 2. Temperature profile at the end of the warm period in the second year, reflecting an increase in the average summer temperature from +10.0 to +15.0 °C; 3. Depth of the active layer (m); 4, 5. Temperature profile at the end of the winter period; 6–8. Minimum temperature at the depth of the active layer under different average summer and winter temperature conditions

ке вторая кривая не показана, так как в данном масштабе она практически сливается с первой кривой).

На рис. 2 показаны варианты изменения минимальной зимней температуры при изменении как среднелетней, так и средnezимней температуры. Причем принято, что они могут как повышаться, так и понижаться. Показателем потепления и охлаждения климата является среднегодовая температура воздуха. Здесь возможны следующие варианты (при длине зимнего периода 7 и летнего 5 месяцев): –2,5°С (–15,0; +15,0); –4,6 °С (–15,0; +10,0); –1,7 °С (–10,0; +10,0); +0,04 °С (–10,0; +15,0). Если считать за базовый вариант со среднегодовой температурой, равной –2,5°С, то возможно как понижение, так и повышение среднегодовой температуры, в зависимости от изменения температуры в теплый и холодный периоды года. Естественно, что будет изменяться и температура в зимний период на глубине ДС. Начальная точка для базовой среднегодовой



**Рис. 3.** Изменение безразмерной температуры в зимний период на глубине деятельного слоя в зависимости от параметра К. Поясн. см. в тексте

**Fig. 3.** The change in dimensionless temperature during winter at the depth of the active layer depending on the parameter K. Поясн. см. в тексте

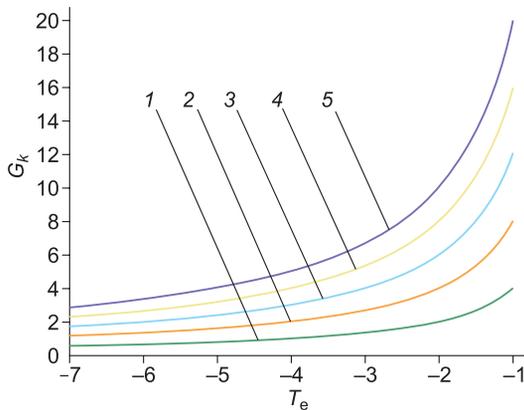
температуры составляет  $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При понижении среднелетней температуры с  $+15,0$  до  $+10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (среднегодовая температура  $-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) минимальная зимняя температура на глубине ДС понизится до  $-8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Степень изменения составит 1,14 – значительно меньше степени изменения среднегодовой температуры (1,84). При повышении среднелетней температуры с  $-15,0$  до  $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (среднегодовая температура воздуха  $+0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

минимальная зимняя температура на глубине ДС составит  $-6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Степень изменения по сравнению с базовой составит 1,21, в то время как степень изменения среднегодовой температуры воздуха почти в два раза выше. Эти условные гипотетические количественные примеры мы привели для того, чтобы подтвердить известную истину, что температура горных пород является более стабильным показателем по сравнению с температурой воздуха и для комплексной оценки степени изменения климата необходимы критерии как изменения среднегодовой температуры воздуха, так и изменения температуры горных пород СГТ.

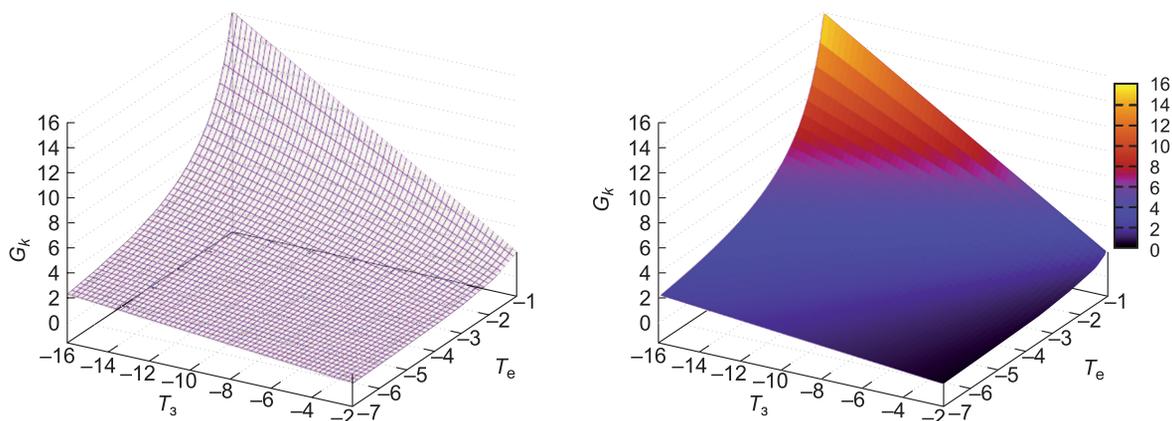
Для наглядности по полученным формулам были проведены вариантные расчеты, которые представлены в виде графиков на рисунках 3–5. На рис. 3 показано изменение безразмерной температуры в зимний период ( $\theta_3$ ) (а) и ее обратной величины ( $1/\theta_3$ ) (б) на глубине ДС в зависимости от параметра  $K = (F_{0л}/F_{0з})$  при разном значении среднелетней безразмерной температуры ( $\theta_n$ ).

По известному отношению чисел Фурье легко определить их значение в теплый и холодный периоды года. Например, для скальных пород отношение чисел Фурье эквивалентно отношению длительности летнего и зимнего периодов. Тогда справедливы формулы  $\tau_3 = 12/(K + 1)$ ,  $\tau_л = 12 - \tau_3$ . Здесь  $K = (\tau_л/\tau_3)$ . Например, при  $K = 1$  длительность зимнего периода равна летнему  $\tau_л = \tau_3 = 6$  месяцев; при  $K = 0,5$  длительность зимнего периода составляет  $\tau_3 = 8$  месяцев,



**Рис. 4.** Изменение геотермического критерия в зависимости от температуры пород на глубине СГТО ( $T_e$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) при различных температурах на глубине деятельного слоя в зимний период ( $T_з$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ): 1 –  $-4,0$ ; 2 –  $-8,0$ ; 3 –  $-12,0$ ; 4 –  $-16,0$ ; 5 –  $-20,0$ .

**Fig. 4.** The change in the geothermal criterion based on the temperature of the rocks at the depth of the seasonally active permafrost ( $T_e$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) at different temperatures at the depth of the active layer in the winter period ( $T_з$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ): 1 –  $-4,0$ ; 2 –  $-8,0$ ; 3 –  $-12,0$ ; 4 –  $-16,0$ ; 5 –  $-20,0$ .



**Рис. 5.** Изменение геотермического критерия в зависимости от температуры пород на глубине СГТО ( $T_e$ , °C) при различных температурах на глубине деятельного слоя в зимний период ( $T_3$ , °C)

**Fig. 5.** The change in geothermal criterion based on the temperature of rocks at the depth of the seasonally active permafrost ( $T_e$ , °C) at different temperatures at the depth of the active layer during winter period ( $T_3$ , °C)

летнего  $\tau_{\text{л}} = 4$  месяца; при  $K = 0,7$  длительность зимнего периода составляет  $\tau_3 = 7$  месяцев, летнего  $\tau_{\text{л}} = 5$  месяца. То есть принятый диапазон изменения параметра  $K$  охватывает все характерные климатические зоны.

На рис. 4 показано изменение геотермического критерия в зависимости от температуры пород на глубине СГТ при различных фиксированных температурах на глубине ДС в зимний период. Характер кривых на рисунке позволяет сделать вывод, что чем ниже минимальная температура на глубине ДС и выше температура на глубине СГТО, тем больше не только абсолютное значение геотермического критерия, но и темп его изменения во всем возможном диапазоне изменения температуры на глубине СГТО (смотри левую и правую части графиков на рисунке). Для подтверждения этого качественного вывода на рис. 5 представлены 3D график изменения геотермического критерия в широком диапазоне изменения температуры пород на глубине слоя годовых теплооборотов  $T_e$  и температуры грунтов на глубине ДС в зимний период  $T_3$ .

Вид плоскости на рисунке демонстрирует степень зависимости геотермического критерия от степени изменения температур на глубинах СГТО и ДС в широком диапазоне их возможных сочетаний. Критерий позволяет по экспериментально определенным (с помощью скважинной термометрии) всего в двух точках температурам не только сделать количественную оценку, но и установить количественные и качественные закономерности изменения температурного режима грунтов ДС при изменении климата в ре-

гионе путем численного сравнения значений критерия в разные годы наблюдений.

### Заключение

Предложен простой геотермический критерий для оценки степени влияния изменения климата на температурный режим деятельного слоя грунтов криолитозоны. Критерий предназначен для интерпретации экспериментальных данных геотермических исследований криолитозоны методом прямой термометрии в скважинах.

Теоретически обоснованы вывод и целесообразность использования предложенного критерия на практике, показаны его достаточная универсальность и принципиальная возможность интерпретации данных многолетних природных наблюдений за формированием температурного режима пород СГТО и ДС. Для проверки принятого подхода и обоснованности применения геотермического критерия на данном этапе исследований экспериментальные данные заменялись теоретическими, полученными расчетным путем по предложенным формулам.

Выполненными исследованиями показано, что предлагаемый критерий для оценки температурного режима деятельного слоя, несмотря на простоту, априори учитывает все особенности теплообмена грунта с атмосферой. И позволяет по экспериментально определенным (с помощью скважинной термометрии) всего в двух точках температурам не только сделать количественную оценку, но и установить количественные и качественные закономерности изменения температурного режима грунтов ДС при изменении

климата в регионе путем сравнения значений критерия в разные годы наблюдений.

Дальнейшие исследования должны включать анализ и интерпретацию имеющихся данных натурных наблюдений за температурным режимом слоя годовых теплооборотов с помощью предлагаемого геотермического критерия. Необходимо также оценить степень надежности предлагаемого критерия оценки с учетом точности измерения температуры и глубины ДС в различных регионах криолитозоны.

### Список литературы / References

1. Железняк М.Н., Чжан Р.В., Шепелёв В.В. и др. Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН на рубеже 60-летия со дня образования. *Криосфера Земли*. 2021;25(1):55–68. <https://doi.org/10.15372/KZ20210104>

Zheleznyak M.N., Zhang R.V., Shepelev V.V., et al. The Melnikov permafrost institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences at the turn of its 60<sup>th</sup> anniversary. *Earth's Cryosphere*. 2021;25(1):55–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/KZ20210104>

2. Балобаев В.Т. Исследование тепловых полей в криолитозоне Якутии (итоги, проблемы, перспективы). В кн.: Каменский Р.М., Шепелёв В.В. (ред.) *Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития, г. Якутск, 9–11 октября 2001 г.* Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН; 2003. С. 4–12.

Balobaev V.T. Study of thermal fields in the permafrost zone of Yakutia (results, problems, prospects). In: Kamensky R.M., Shepelev V.V. (eds.) *Results of geocryological studies in Yakutia in the 20th century and prospects for their further development, Yakutsk, October 9–11, 2001*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS Publishing House; 2003, pp. 4–12. (In Russ.)

3. Balobayev V.T., Skachkov Yu.B., Shender N.I. Forecasting climate changes and the permafrost thickness for Central Yakutia into the year 2200. *Geography and Natural Resources*. 2009;30(2):141–145. <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2009.06.009>

4. Romanovsky V.E., Sazonova T.S., Balobaev V.T., et al. Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia. *Global and Planetary Change*. 2007;56(3-4):399–413. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.022>

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. Павлов А.В. *Мониторинг криолитозоны*. Новосибирск: Гео; 2008. 229 с.

Pavlov A.V. *Monitoring of the permafrost zone*. Novosibirsk: Geo; 2008. 229 p. (In Russ.)

7. Zheleznyak M.N., Zhizhin V.I., Shipitsyna L.I., et al. Database of permafrost conditions of the Aldan ante-

clise of the Siberian craton. *Database registration certificate*. RU 2016620539 dt. 27.04.2016.

8. Zheleznyak M.N., Zhizhin V.I., Shipitsyna L.I., et al. Database of permafrost conditions of the Vilyui syncline. *Database registration certificate*. RU 2016620833 dt. 21.06.2016.

9. Шур Ю.Л. *Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст*. Новосибирск: Наука; 1988. 210 с. Shur Yu.L. *Upper horizon of the permafrost and thermo-karst*. Novosibirsk: Nauka; 1988. 210 p. (In Russ.)

10. Железняк М.Н., Федоров А.Н. Устойчивость природных систем и инженерных сооружений в Арктике и Субарктике. *Экономика Востока России*. 2020;12(1):49–55. <https://doi.org/10.25801/SRC.2020.73.31.017>

Zheleznyak M.N., Fedorov A.N. Resilience of engineering constructions and linear transport systems in the arctic and subarctic region. *Economy of the East of Russia*. 2020;(1):49–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.25801/SRC.2020.73.31.017>

11. Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов П.В. Криогенные процессы и изменение устойчивости пород ледового комплекса в Центральной Якутии при современном изменении климата и нарушении поверхности. *Наука и образование*. 2005;(4):84–87.

Gavriliev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V. Cryogenic processes and changes in the stability of rocks of the ice complex in Central Yakutia under modern climate change and surface disturbance. *Nauka i Obrazovanie*. 2005;(4):84–87. (In Russ.)

12. Калиничева С.В., Федоров А.Н. Прогноз изменения температуры мерзлотных ландшафтов при удалении напочвенного покрова. В кн.: Пахомова Л.С., Саввинова А.Н., Кривошапкина О.М. и др. (ред.) *География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока, г. Якутск, 25–26 марта 2022 г.* Якутск: Издательство Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова; 2022. С. 40–44.

Kalinicheva S.V., Fedorov A.N. Forecast of changes in the temperature of permafrost landscapes when the ground cover is removed. In: Pakhomova L.S., Savvinova A.N., Krivoshapkina O.M., et al. (eds.) *Geography and local history in Yakutia and adjacent territories of Siberia and the Far East, Yakutsk, March 25–26, 2022*. Yakutsk: North-Eastern Federal University Publishing House; 2022, pp. 40–44. (In Russ.)

13. Федоров А.Н. Динамика мерзлотных ландшафтов Якутии в условиях современных изменений климата. В кн.: Железняк М.Н., Шепелёв В.В., Чжан Р.В. (ред.) *Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне, г. Якутск, 28–30 сентября 2020*. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2020. С. 28–31.

Fedorov A.N. Dynamics of permafrost landscapes of Yakutia under conditions of modern climate change. In: Zheleznyak M.N., Shepelev V.V., Zhang R.V. (eds.) *Stability of natural and technical systems in the permafrost zone, Yakutsk, September 28–30, 2020*. Yakutsk: Mel-

- nikov Permafrost Institute SB RAS Publishing House; 2020, pp. 28–31. (In Russ.)
14. Гунар А.Ю., Хрусталев Л.Н., Хилимонюк В.З. и др. Методика выбора проектных решений по прокладке линейной части нефтепровода в мерзлоте. *Криосфера Земли*. 2017;21(6):97–108. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(97-108\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(97-108))
- Gunar A.Yu., Khrustalev L.N., Khilimonyuk V.Z., et al. The method of selecting of project solutions for laying the linear part of oil pipeline in permafrost. *Earth's Cryosphere*. 2017;21(6):84–94. [https://doi.org/10.21782/EC1560-7496-2017-6\(84-94\)](https://doi.org/10.21782/EC1560-7496-2017-6(84-94))
15. Шестернев Д.М., Литовко А.В., Чжан А.А. Опыт проектирования и строительства на участке «ледовый комплекс» Амуро-Якутской железнодорожной магистрали. *Наука и образование*. 2017;86(2):28–33.
- Shesternev D.M., Litovko A.V., Chzhang A.A. Individual experience of design and construction at the “ice complex” of Amur-Yakutsk Railway. *Nauka i Obrazovanie*. 2017;(2):28–33. (In Russ.)
16. Чжан А.А., Шестернев Д.М., Чжан Т.Р. Меры по стабилизации температурного поля в основании насыпи Амуро-Якутской железной дороги. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*. 2017;(3):43–53.
- Zhang A.A., Shesternev D.M., Zhang T.R. Measures for temperature field stabilization at the base of the Amur-Yakutsk railway embankment. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2017;(3):43–53. (In Russ.)
17. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal Protection of Roads in The Permafrost Zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022;20(2):395–399. <https://doi.org/10.5937/jaes0-34379>
18. Zhang X., Feng Sh., Chen P., et al. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions. *Oil & Gas Storage and Transportation*. 2013;(6):365–369. <https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2013.04.005>
19. Niu F., Li A., Luo J., et al. Soil moisture, ground temperatures and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China. *Cold Region Sciences and Technology*. 2017;(133):7–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.007>
20. Pankov V.Yu. The problem of mechanical loads on pavement of roads in the cryolithic zone. *E3S Web of Conferences*. 2022;363:1–12. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301039>
21. Цытович Н.А. *Механика мерзлых грунтов*. М.: Высшая школа; 1973. 448 с.
- Tsytoovich N.A. *The Mechanics of Frozen Soils*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1973. 448 p. (In Russ.)
22. Guofang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature effect on the compressive strength of frozen soils: a review. In: Wei Wu (ed.) *Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoen지니어ing*. Cham: Springer; 2019, pp. 227–236. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19)
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>
- Khimenkov A.N., Gagarin V.E. Approaches to the study of deformations in permafrost soils. *Arctic and Antarctic Research*. 2022;(2):36–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.2.38229>
24. Вахрин И.С., Кузьмин Г.П., Спектор В.В. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов естественного сложения. *Успехи современного естествознания*. 2020;(8):37–42. <https://doi.org/10.17513/use.37455>
- Vakhrin I.S., Kuzmin G.P., Spektor V.V. Thaw deformation characteristics of undisturbed soils. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(8):37–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37455>
25. Вялов С.С. *Реологические основы механики мерзлых грунтов*. М.: Высшая школа; 1978. 447 с.
- Vyalov S.S. *Rheology of frozen soil mechanics*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1978. 447 p. (In Russ.)
26. Гаврильев П.П. Критерии оценки состояния и устойчивости криогенных агроландшафтов в современных условиях. *Наука и образование*. 2007;(4):87–92.
- Gavriliev P.P. Criteria for assessing the state and stability of cryogenic agricultural landscapes in modern conditions. *Nauka i Obrazovanie*. 2007;(4):87–92. (In Russ.)
27. Жирков А.Ф., Варламов С.П., Железняк М.Н. Результаты годичного цикла наблюдений температурного режима грунтов в естественных условиях и при нарушении покровов. В кн.: *Материалы пятой конференции геокриологов России. Часть 5. Динамическая геокриология. Геокриологические процессы и явления, г. Москва, 14–17 июня 2016 г.* М.: Университетская книга; 2016. С. 52–58.
- Zhirkov A.F., Varlamov S.P., Zheleznyak M.N. Results of the annual cycle of observations of the temperature regime of soils under natural conditions and when the cover is disturbed. In: *Proceedings of the Fifth Conference of Permafrost Scientists of Russia. Part 5. Dynamic geocryology. Geocryological processes and phenomena, Moscow, June 14–17, 2016*. Moscow: Universitetskaya Kniga; 2016, pp. 52–58. (In Russ.)
28. Чжан А.А., Ашпиз Е.С., Хрусталев Л.Н. и др. Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания. *Криосфера Земли*. 2018; 22(3):67–71. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-3\(67-71\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-3(67-71))
- Zhang A.A., Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., et al. A new way for thermal stabilization of permafrost under railway embankment. *Earth's Cryosphere*. 2018; 22(3): 59–62. [https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-3\(59-62\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-3(59-62))
29. Ашпиз Е.С., Хрусталев Л.Н., Емельянова Л.В. и др. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи. *Криосфера Земли*. 2008;12(2): 84–89.

Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Emelyanova L.V., et al. Using of synthetical thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment. *Earth's Cryosphere*. 2008;12(2):84–89. (In Russ.)

30. Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю. Сравнение теплового потока в горных выработках плоской и сферической симметрии. *Горный информационно-*

*аналитический бюллетень (технический журнал)*. 2020;(10):133–141. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-133-141>

Galkin A. F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Comparison of heat flows in underground openings of plane and spherical symmetry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10): 133–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-133-141>.

#### **Об авторах**

**ГАЛКИН Александр Федорович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, Scopus Author ID: 56559565600, SPIN: 9647-2678, e-mail: [afgalkin@mail.ru](mailto:afgalkin@mail.ru)

**ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus Author ID: 22959266400, SPIN: 2349-4867, e-mail: [fe1956@mail.ru](mailto:fe1956@mail.ru)

**ЖИРКОВ Александр Федотович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, ResearcherID: J-1225-2018, Scopus Author ID: 56226280600, SPIN: 3281-5147, e-mail: [zhirkov\\_af@mail.ru](mailto:zhirkov_af@mail.ru)

**БАЛУТА Виктор Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, SPIN: 1843-3885, e-mail: [vbaluta@keldysh.ru](mailto:vbaluta@keldysh.ru); [vbaluta@yandex.ru](mailto:vbaluta@yandex.ru)

#### **Вклад авторов**

**Галкин А.Ф.** – разработка концепции, методология, проведение статистического анализа, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Железняк М.Н.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Жирков А.Ф.** – редактирование рукописи, визуализация, верификация данных; **Балута В.И.** – проведение исследования, редактирование рукописи, получение финансирования

#### **Конфликт интересов**

Один из авторов – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук Железняк Михаил Николаевич является членом редакционного совета журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

#### **About the authors**

**GALKIN, Aleksandr Fedorovich**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, Scopus Author ID: 56559565600, SPIN: 9647-2678, e-mail: [afgalkin@mail.ru](mailto:afgalkin@mail.ru)

**ZHELEZNYAK, Mikhail Nikolaevich**, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus Author ID: 22959266400, SPIN: 2349-4867, e-mail: [fe1956@mail.ru](mailto:fe1956@mail.ru)

**ZHIRKOV, Aleksandr Fedotovitch**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, ResearcherID: J-1225-2018, Scopus Author ID: 56226280600, SPIN: 3281-5147, e-mail: [zhirkov\\_af@mail.ru](mailto:zhirkov_af@mail.ru)

**BALUTA, Victor Ivanovich**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4399-094>, SPIN: 1843-3885, e-mail: [vbaluta@keldysh.ru](mailto:vbaluta@keldysh.ru); [vbaluta@yandex.ru](mailto:vbaluta@yandex.ru)

#### **Authors' contribution**

**Galkin A.F.** – conceptualization, methodology, formal analysis, investigation, data curation, writing – original draft, visualization; **Zheleznyak M.N.** – writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition; **Zhirkov A.F.** – writing – review & editing, visualization, validation; **Baluta V.I.** – formal analysis, writing – review & editing, funding acquisition

#### **Conflict of interest**

One of the authors, Zheleznyak M.N., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.) is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

*Поступила в редакцию / Submitted 27.09.2024*

*Поступила после рецензирования / Revised 16.10.2024*

*Принята к публикации / Accepted 29.10.2024*