



МОДЕЛИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ НЕЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

М.А. НАУМОВ^{1,*}, И.К. ФОМЕНКО¹, В.Р. ВОЛОШИН¹, Э.С. ГРЕЧИЩЕВА², Д.Н. ГОРОБЦОВ¹

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт
оснований (НИИОСП) им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»»
6, ул. 2-я Институтская, Москва 109428, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с возрастающей актуальностью решения инженерно-геокриологических задач численными или аналитическими методами в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов все чаще возникают вопросы в определении входящих параметров. В современной практике допускается возможность определения теплофизических свойств грунтов не только лабораторным способом. Поиск универсальных зависимостей, наиболее точно описывающих теплофизические свойства мерзлых грунтов, становится важной задачей современных исследований. Данная работа посвящена рассмотрению моделей оценки теплопроводности грунтов, которые позволяют учесть физические свойства, минеральный состав и содержание незамерзшей воды дисперсных грунтов. Эти методики получили широкое распространение прежде всего в зарубежной практике и в современных программах моделирования теплофизических задач.

Цель. Рассмотрение методики использования моделей теплопроводности, учитывающих физические свойства, минералогический состав и содержание незамерзшей воды мерзлых дисперсных грунтов для оценки их эффективности.

Материалы и методы. Проанализированы две модели оценки теплопроводности дисперсных мерзлых грунтов. Выполнен статистический анализ их эффективности на основе выборки из двадцати экспериментально определенных значений теплопроводности песчаных и глинистых незасоленных, незаторфованных мерзлых грунтов.

Результаты. Эффективность использования моделей теплопроводности находится на удовлетворительном уровне. Ожидаемые значения теплопроводности в мерзлом состоянии предсказываются с большей точностью по сравнению с принятым в отечественной практике методом. Определены наиболее предпочтительные методы учета теплопроводности частиц.

Заключение. Использование в приведенных моделях комплекса физических свойств, минерального состава, содержания незамерзшей воды имеет явные преимущества. Необходимо дальнейшее изучение данного вопроса, расширяющее количество сравниваемых моделей и выборку грунтов. Показана важность учета минералогического состава при оценке теплопроводности дисперсных мерзлых грунтов.

Ключевые слова: теплопроводность, многолетнемерзлые грунты, минералогический состав, теплофизические характеристики, физические свойства, дисперсные грунты

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы благодарят научный коллектив НИИОСП им. Н.М. Герсевича за предоставленные качественные данные теплофизических свойств грунтов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Наумов М.А., Фоменко И.К., Волошин В.Р., Гречищева Э.С., Горобцов Д.Н. Модели теплопроводности дисперсных незасоленных мерзлых грунтов. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2025;67(4):130—141. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-130-141> EDN: [VFCDOE](https://www.edn.ru/)

Статья поступила в редакцию 13.08.2025
Принята к публикации 10.09.2025
Опубликована 22.12.2025

* Автор, ответственный за переписку

THERMAL CONDUCTIVITY MODELS OF DISPERSED NON-SALINE FROZEN SOILS

MIKHAIL A. NAUMOV^{1,*}, IGOR K. FOMENKO¹, VALERIY R. VOLOSHIN¹, ERIKA S. GRECHISHCHEVA²,
DENIS N. GOROBTSOV¹

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *JSC Reseach Center of Construcruction
6, Vtoraya Institutskaya str., Moscow 109428, Russia*

ABSTRACT

Background. The growing relevance of using numerical or analytical methods for solving engineering and geocryological problems in the permafrost zone is increasingly raising questions about determining input parameters. In the present-day practice, thermal properties of soils can be determined using numerical methods in addition to laboratory tests. The search for universal dependencies that most accurately describe the thermophysical properties of frozen soils is becoming an important task of modern research. This study considers models for assessing thermal conductivity of soils, taking into account the physical properties, mineral composition and water content of dispersed soils. These models have become widely used, primarily in foreign practice and contemporary software for thermophysical simulation.

Aim. To consider a method for using thermal conductivity models taking into account the physical properties, mineralogical composition and water content of frozen dispersed soils with the purpose of assessing their effectiveness.

Materials and methods. Two models for assessing the thermal conductivity of dispersed frozen soils are analyzed. A statistical analysis of their effectiveness is performed based on a sample of twenty experimentally determined thermal conductivity values of sandy and clayey non-saline, non-peaty frozen soils.

Results. The efficiency of using thermal conductivity models is at a satisfactory level. The expected values of thermal conductivity in a frozen state are predicted with greater accuracy compared to the method adopted in domestic practice. The most preferred methods considering the thermal conductivity of particles are determined.

Conclusion. A combination of physical properties, mineralogical composition, and unfrozen water content in the given models has clear advantages. A further study of this issue is necessary to expand the number of compared models and soil sample. The importance of considering the mineralogical composition in the assessment of thermal conductivity for dispersed frozen soils is demonstrated.

Keywords: thermal conductivity, permafrost soils, mineralogical composition, thermophysical characteristics, physical properties, dispersed soils

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: the authors thank the scientific team Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures for providing high-quality data on the thermal properties of soils.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Naumov M.A., Fomenko I.K., Voloshin V.R., Grechishcheva E.S., Gorobtsov D.N. Thermal conductivity models of dispersed non-saline frozen soils. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2025;67(4):130—141. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-130-141> EDN: VFCD0E

Manuscript received 13 August 2025

Accepted 10 September 2025

Published 22 December 2025

* Corresponding author

Теплофизические свойства грунтов являются ключевыми исходными параметрами для численного моделирования теплотехнических задач, играют важную роль в обеспечении точности и достоверности получаемых результатов [6], что имеет большое значение для практики проектирования сооружений в криолитозоне, определяет его принцип, а также конструктивные особенности.

Теплопроводность грунта характеризует его способность переносить тепловую энергию и численно равна потоку тепла, проходящего через единицу площади грунта в единицу времени при температурном градиенте, равном единице, и определяется соотношением твердой, жидкой и газообразной составляющих, их химико-минеральным составом, структурными и текстурными особенностями, влажностью, фазовым состоянием воды и температурой [2—4].

В настоящее время существуют множество экспериментальных методик определения теплопроводности грунтов, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки применения [9].

Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта зависит от температуры за счет уменьшения содержания незамерзшей воды при понижении температуры. Наиболее интенсивные изменения происходят в диапазоне отрицательных температур, характеризующемся фазовыми переходами воды в лед, величина которого зависит прежде всего от гранулометрического состава грунта, степени засоленности и содержания органического вещества [4, 5, 7].

В литературных источниках существует достаточное количество данных о влиянии минералогического состава скальных грунтов на значения теплопроводности [1], однако же для дисперсных грунтов таких исследований мало. Обусловлено это второстепенным влиянием минералогического состава дисперсных грунтов по отношению к их физическим характеристикам, однако в некоторых работах отмечается значительная зависимость теплопроводности от минерального

состава [1]. При схожих физических характеристиках песков, в одном случае с содержанием кварца 86,3 % (остальную долю составляют полевые шпаты), в другом случае с содержанием кварца 22,8 % (полевые шпаты составляют 52 %), разница в значениях теплопроводности составляет около 180 %. Так, теплопроводность кварцевого песка составляет 5,04 Вт/(м·°С) в мерзлом состоянии, 3,19 Вт/(м·°С) — в талом. Теплопроводность полевошпатового песка — 2,78 Вт/(м·°С) в мерзлом состоянии, 1,85 Вт/(м·°С) — в талом [3]. Обусловлено это высокой теплопроводностью кварца — минерала с самым большим коэффициентом теплопроводности из наиболее часто встречаемых минералов, слагающих дисперсные грунты (в среднем составляет 7,8 Вт/(м·°С) [1, 3]. Теплопроводность же полевого шпата примерно равна от 2,50 Вт/(м·°С) [1, 3].

Материалы и методы

На сегодняшний момент в практике инженерно-геологических изысканий актуальными справочными данными для оценки теплопроводности дисперсных грунтов является таблица Б.8 СП 25.13330-2020 [8]. Данная таблица является обобщением для некоторых разновидностей грунтов, выделенных по классификационным показателям. В ее основе лежит взаимосвязь значений теплопроводности от плотности скелета грунта и его суммарной влажности. Использование данной таблицы, конечно, имеет явные недостатки [2], главные среди которых: отсутствие учета генезиса и возраста грунтов; отсутствие привязки к определенному региону; отсутствие верхних и нижних пределов диапазона значений теплопроводности и др.

В нашей стране, помимо вышеотмеченной справочной таблицы, уделялось достаточно мало внимания разработке универсальных формул для оценки теплопроводности. Тем не менее стоит отметить работы Р.И. Гаврильева, который предложил зависимости, позволяющие оценить теплопроводность дисперсных грунтов, горных пород, почв и надпочвенных покровов [3].

В зарубежной литературе приводится ряд методов определения теплопроводности дисперсных грунтов в талом и мерзлом состоянии, получивших широкое распространение и позволяющих прогнозировать изменение теплопроводности от температуры, водонасыщенности, минерального состава и др. В литературе они описываются как модели теплопроводности, и на данный момент существует более двадцати различных методов оценки [12]. В рамках данной статьи будут рассмотрены две наиболее распространенные модели: модель Johansen [13] и модель Farouki [11].

Метод Johansen разработан для определения теплопроводности грунтов на основе теплопроводности грунта в сухом и водонасыщенном состоянии с использованием эмпирических коэффициентов и применим для грунтов при степени водонасыщенности более 20 %. В общем виде теплопроводность определяется по следующей зависимости:

$$\lambda = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}}) k_e + \lambda_{\text{dry}}, \quad (1)$$

где λ — теплопроводность грунта, Вт/(м·°С); λ_{sat} — теплопроводность водонасыщенного грунта Вт/(м·°С); λ_{dry} — теплопроводность сухого грунта Вт/(м·°С), а k_e — число Керстена, д.е.

$$\lambda_{\text{dry}} = \frac{0,135\rho_d + 64,7}{\rho_s - 0,947\rho_d}, \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{sat}} = (\lambda_s)^{1-n} (\lambda_w)^n \text{ — для талого грунта,} \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{sat}} = (\lambda_s)^{1-n} (\lambda_i)^{n-\theta_u} (\lambda_w)^{\theta_u} \text{ — для мерзлого} \quad (4)$$

грунта,

$$\lambda_s = \lambda_q \lambda_0^{1-q}. \quad (5)$$

Число Керстена вычисляется по следующим формулам:

$$k_e = 0,7 \log(S_r) + 1,0 \text{ — для талого грунта} \quad (6)$$

с содержанием глинистых частиц <5 %;

$$k_e = \log(S_r) + 1,0 \text{ — для талого грунта} \quad (7)$$

с содержанием глинистых частиц >5 %;

$$k_e = S_r \text{ — для мерзлого грунта,} \quad (8)$$

где ρ_d — плотность сухого грунта кг/м³; ρ_s — плотность частиц грунта, кг/м³; n — пористость д.е.; λ_s — теплопроводность частиц грунта Вт/(м·°С); q — содержание кварца, д.е.; λ_w — теплопроводность воды Вт/(м·°С); λ_i — теплопроводность льда

Вт/(м·°С); θ_u — объемное содержание незамерзшей воды, д.е.; S_r — степень водонасыщенности, д.е.

Согласно методу Johansen в приведенных выше уравнениях теплопроводность кварца λ_q принимается равной 7,7 Вт/(м·°С), а теплопроводность других минералов принимается как $\lambda_0 = 2,0$ Вт/(м·°С) при $q > 0,2$ и $\lambda_0 = 3,0$ Вт/(м·°С) при $q \leq 0,2$.

При различном содержании кварца в грунте теплопроводность частиц грунта определяется по следующим формулам [13]:

$$\lambda_s = 7,7^q (2,0)^{1-q} \text{ при } q > 0,20, \quad (9)$$

$$\lambda_s = 7,7^q (3,0)^{1-q} \text{ при } q < 0,20. \quad (10)$$

В методе, предложенным Farouki, теплопроводность грунтов оценивается на основе средневзвешенного значения теплопроводности составляющих грунта (лед, вода, воздух, твердые частицы):

$$\lambda_{\text{unfrozen}} = \frac{\theta_w \lambda_w + F_a (n - \theta_w) \lambda_a + F_s (1 - n) \lambda_s}{\theta_w + F_a (n - \theta_w) + F_s (1 - n)}, \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{frozen}} = \frac{\theta_i \lambda_i + \theta_u \lambda_w + F_a (n - \theta_w) \lambda_a + F_s (1 - n) \lambda_s}{\theta_w + F_a (n - \theta_w) + F_s (1 - n)}, \quad (12)$$

$$F_a = \frac{1}{3} \left\{ \frac{2}{1 + g_a \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_w} - 1 \right)} + \frac{1}{1 + g_c \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_w} - 1 \right)} \right\}, \quad (13)$$

$$F_s = \frac{1}{3} \left\{ \frac{2}{1 + 0,125 \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_w} - 1 \right)} + \frac{1}{1 + 0,75 \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_w} - 1 \right)} \right\}, \quad (14)$$

$$g_a = 0,035 + 0,298 S_r, \quad (15)$$

$$g_c = 1 - 2g_a, \quad (16)$$

где $\lambda_{\text{unfrozen}}$ — теплопроводность незамерзшего грунта; Вт/(м·°С), λ_{frozen} — теплопроводность мерзлого грунта Вт/(м·°С); λ_w — теплопроводность воды, Вт/(м·°С); λ_a — теплопроводность воздуха, Вт/(м·°С); λ_s — теплопроводность твердых частиц, Вт/(м·°С); λ_i — теплопроводность льда, Вт/(м·°С); θ_w — объемное содержание воды, д.е.; θ_i — объемное содержание льда, д.е.; θ_u — объемное содержание незамерзшей воды, д.е.; F_a и F_s — коэффициенты формы твердых частиц грунта и воздуха; g_a и g_c — поправочные коэффициенты; S_r — степень водонасыщенности, д.е.

Из вышеперечисленных формул особое внимание следует обратить на два параметра: содержание незамерзшей воды и содержание кварца.

В настоящее время активно развиваются методы лабораторного определения содержания незамерзшей воды. В случае отсутствия экспериментальных данных оценка содержания незамерзшей воды в грунте может осуществляться рядом эмпирических методик, однако рассмотрение этой обширной темы выходит за рамки данной статьи.

Минералогический состав дисперсных грунтов определяется очень редко и в основном для научных целей, поэтому использование в данных формулах содержания кварца без определения минералогического состава вносит неопределенность в получаемый результат и обуславливает сложность их применения в практике инженерно-геологических изысканий на данный момент. Далее будут рассмотрены способы косвенной оценки минерального состава при использовании моделей.

Исходными данными для проведения расчетов будет являться выборка мерзлых незасоленных и незаторфованных глинистых и песчаных грунтов озерно-аллювиального генезиса, отобранных на участке строительства в Ямало-Ненецком автономном округе (табл. 1).

Теплопроводность грунтов определялась методом цилиндрического зонда (модель прибора — KD2Pro) при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ для мерзлого состояния и $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ для талого состояния. Экспериментальные значения теплопроводности представляют собой усредненные результаты, полученные в трех и более опытах.

При использовании данных моделей влажность за счет незамерзшей воды учитывалась по следующей формуле (для температуры грунта $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) [8]:

$$W_w = k_w W_p, \quad (17)$$

где k_w — эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от числа пластичности и температуры грунта; W_p — влажность грунта на границе пластичности, д.е.

Ввиду отсутствия сведений о минералогическом составе рассматриваемых образцов для оценки способа учета минерального состава на теплопроводность частиц и, следовательно, на общую величину теплопроводности были проведены расчеты для моделей следующими способами [10, 11, 13—16]:

$$1) \lambda_s = \lambda_{\text{sand}}^{f_{\text{sand}}} \lambda_{\text{silt}}^{f_{\text{silt}}} \lambda_{\text{clay}}^{f_{\text{clay}}}, \quad (18)$$

$$2) \lambda_s = (8,8f_{\text{sand}} + 2,92f_{\text{clay}})/(f_{\text{sand}} + f_{\text{clay}}), \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \lambda_s &= 7,7^q(2,0)^{1-q} \text{ при } q > 20\% ; \\ \lambda_s &= 7,7^q(3,0)^{1-q} \text{ при } q \leq 20\% , \end{aligned} \quad (20)$$

где q — содержание кварца, определяемое тремя способами:

$$3) q = 0,5f_{\text{sand}}, \quad (21)$$

$$4) q = 0,5(f_{\text{sand}} + f_{\text{silt}}), \quad (22)$$

$$5) q = f_{\text{sand}}, \quad (23)$$

$$6) \lambda_s = \text{const} = 2,45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}). \quad (24)$$

В приведенных формулах (18)—(24): f_{sand} — содержание песчаных частиц, %; f_{silt} — содержание пылеватых частиц, %; f_{clay} — содержание глинистых частиц, %; $\lambda_{\text{sand}} = 7,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$, $\lambda_{\text{silt}} = 2,74 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$, $\lambda_{\text{clay}} = 1,93 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ — теплопроводность песчаных, пылеватых и глинистых частиц соответственно.

Для каждого способа учета теплопроводности частиц были определены статистические критерии, которые позволяют оценить эффективность моделей на основе общей выборки грунтов:

- 1) коэффициент детерминации R^2 ;
- 2) корень из среднеквадратической ошибки (RMSE), определяемый по формуле:

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (M_j - P_j)^2}{n}}, \quad (25)$$

- 3) среднее отклонение (AD), определяемое как:

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (M_j - P_j), \quad (26)$$

где M_j — экспериментально определенное значение теплопроводности; P_j — ожидаемое моделью значение теплопроводности, n — количество определений.

Результаты и обсуждение

Результаты статистического анализа значений теплопроводности грунтов в мерзлом и талом состоянии приведены в табл. 2, 3.

В дополнение к рассматриваемым моделям были определены статистические параметры сходимости экспериментальных результатов с табличными значениями СП 22.13330 (табл. 4).

Графики, отражающие распределение полученных значений теплопроводности приведены на рисунках 1—4.

Таблица 1. Основные физические характеристики рассматриваемых образцов грунта
 Table 1. Main physical characteristics of the soil samples under consideration

№	Наименование грунта	Содержание частиц 2,0—0,05 мм, %	Содержание частиц 0,05—0,002 мм, %	Содержание частиц менее 0,002 мм, %	Влажность суммарная, %	Влажность за счет незам. воды (при T=-15°C), %	Плотность сухого грунта, г/см ³	Пористость, %	Степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой, д.е.	Степень засоленности, %	К-т теплопроводности в мерзлом состоянии, Вт/(м·°C)	К-т теплопроводности в талом состоянии, Вт/(м·°C)
		$d_{2-0,05}$	$d_{0,05-0,002}$	$d_{<0,002}$	W_{tot}	W_w	ρ_d	n	S_r	D_{sal}	λ_f	λ_{th}
1	Супесь пылеватая нелдистая	38,0	51,3	10,7	17,7	4,0	1,61	40	0,76	0,06	2,08	1,46
2	Супесь пылеватая слабодистая	25,9	63,4	10,7	18,4	3,6	1,63	39	0,81	0,10	2,48	1,71
3	Супесь пылеватая льдистая	25,2	65,0	9,8	37,9	4,5	1,23	54	0,94	0,12	2,22	1,27
4	Супесь пылеватая слабодистая	40,7	49,6	9,7	29,1	4,5	1,45	46	0,98	0,08	3,40	1,92
5	Супесь пылеватая нелдистая	25,2	58,1	16,7	17,7	4,4	1,61	40	0,76	0,06	2,14	1,48
6	Супесь песчанистая слабодистая	54,7	37,2	8,1	17,6	3,7	1,66	38	0,82	0,08	2,62	1,80
7	Суглинок пылеватый легкий слабодистый	35,1	54,7	10,2	24,0	7,4	1,47	45	0,82	0,07	2,15	1,51
8	Суглинок пылеватый легкий слабодистый	17,3	68,8	13,9	30,5	7,9	1,46	46	1,00	0,07	2,40	1,58
9	Суглинок пылеватый легкий слабодистый	24,7	51,1	24,2	24,1	6,8	1,51	43	0,88	0,09	2,42	1,81
10	Суглинок пылеватый легкий слабодистый	27,4	47,3	25,3	23,2	7,0	1,59	40	0,96	0,12	2,22	1,56
11	Суглинок легкий нелдистый	24,6	53,0	22,4	14,7	7,1	1,67	38	0,66	0,14	1,94	1,41
12	Суглинок пылеватый легкий нелдистый	25,1	48,5	26,4	19,2	7,1	1,74	35	0,98	0,11	2,33	1,74
13	Суглинок пылеватый легкий слабодистый	26,2	57,9	15,9	30,5	7,6	1,46	46	1,00	0,08	2,38	1,49
14	Суглинок легкий слабодистый	24,6	61,8	13,6	30,7	7,9	1,38	49	0,93	0,09	2,17	1,50
15	Глина пылеватая легкая нелдистая	5,3	38,1	56,6	36,5	17,7	1,32	52	0,95	0,06	1,74	1,27
16	Песок мелкий однород- ный слабодистый	94,0	4,0	2,0	21,3	0,0	1,63	39	0,98	0,01	3,63	1,92
17	Песок мелкий однород- ный слабодистый	94,0	5,0	1,0	20,5	0,0	1,62	40	0,92	0,02	3,91	2,15
18	Песок пылеватый неоднородный слабодистый	77,5	16,6	5,9	22,2	0,0	1,64	39	1,00	0,03	3,11	1,94

Продолжение таблицы 1

№	Наименование грунта	Содержание частиц 2,0—0,05 мм, %	Содержание частиц 0,05—0,002 мм, %	Содержание частиц менее 0,002 мм, %	Влажность суммарная, %	Влажность за счет незам. воды (при T=-15°C), %	Плотность сухого грунта, г/см ³	Пористость, %	Степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой, д.е.	Степень засоленности, %	К-т теплопроводности в мерзлом состоянии, Вт/(м·°C)	К-т теплопроводности в талом состоянии, Вт/(м·°C)
		$d_{2-0,05}$	$d_{0,05-0,002}$	$d_{<0,002}$	W_{tot}	W_w	ρ_d	n	S_r	D_{sal}	λ_f	λ_{th}
19	Песок пылеватый неоднородный слабодыстый	81,7	16,7	1,6	20,4	0,0	1,57	41	0,85	0,04	2,92	2,01
20	Песок пылеватый неоднородный слабодыстый	76,7	18,4	4,9	24,4	0,0	1,45	46	0,86	0,03	3,31	1,81

Таблица 2. Эффективность моделей теплопроводности для мерзлого грунта
Table 2. Efficiency of thermal conduction models for frozen soil

№	Метод учета теплопроводности частиц	Метод Johansen			Метод Farouki		
		R ²	RMSE	AD	R ²	RMSE	AD
1	$\lambda_s = \lambda_{sand} f_{sand} \lambda_{silt} f_{silt} \lambda_{clay} f_{clay}$	0,82	0,384	0,07	0,81	0,264	-0,07
2	$\lambda_s = (8,8f_{sand} + 2,92f_{clay}) / (f_{sand} + f_{clay})$	0,78	1,012	0,94	0,70	0,649	0,57
3	$q = 0,5f_{sand}$	0,75	0,420	-0,25	0,67	0,496	-0,28
4	$q = 0,5(f_{sand} + f_{silt})$	0,75	0,378	-0,20	0,69	0,459	-0,25
5	$q = f_{sand}$	0,80	0,420	-0,08	0,78	0,333	-0,18
6	$\lambda_s = const = 2,45 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$	0,63	0,787	-0,66	0,20	0,716	-0,49

Таблица 3. Эффективность моделей теплопроводности для талого грунта
Table 3. Efficiency of thermal conductivity models for thawed soil

№	Метод учета теплопроводности частиц	Метод Johansen			Метод Farouki		
		R ²	RMSE	AD	R ²	RMSE	AD
1	$\lambda_s = \lambda_{sand} f_{sand} \lambda_{silt} f_{silt} \lambda_{clay} f_{clay}$	0,71	0,283	0,10	0,71	0,267	0,12
2	$\lambda_s = (8,8f_{sand} + 2,92f_{clay}) / (f_{sand} + f_{clay})$	0,68	0,740	0,70	0,62	0,720	0,69
3	$q = 0,5f_{sand}$	0,54	0,191	-0,09	0,43	0,191	-0,06
4	$q = 0,5(f_{sand} + f_{silt})$	0,65	0,161	-0,07	0,56	0,164	-0,03
5	$q = f_{sand}$	0,69	0,291	0,00	0,66	0,264	0,03
6	$\lambda_s = const = 2,45 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$	0,41	0,429	-0,38	0,01	0,359	-0,22

Таблица 4. Оценка сходимости результатов экспериментальных исследований и табличных значений
(СП 25.13330.2020)

Table 4. Evaluation of the convergence of the results of experimental studies and tabular values (SP 25.13330.2020)

№	Состояние грунта	R ²	RMSE	AD
1	Мерзлое	0,67	0,721	0,631
2	Талое	0,39	0,237	-0,03

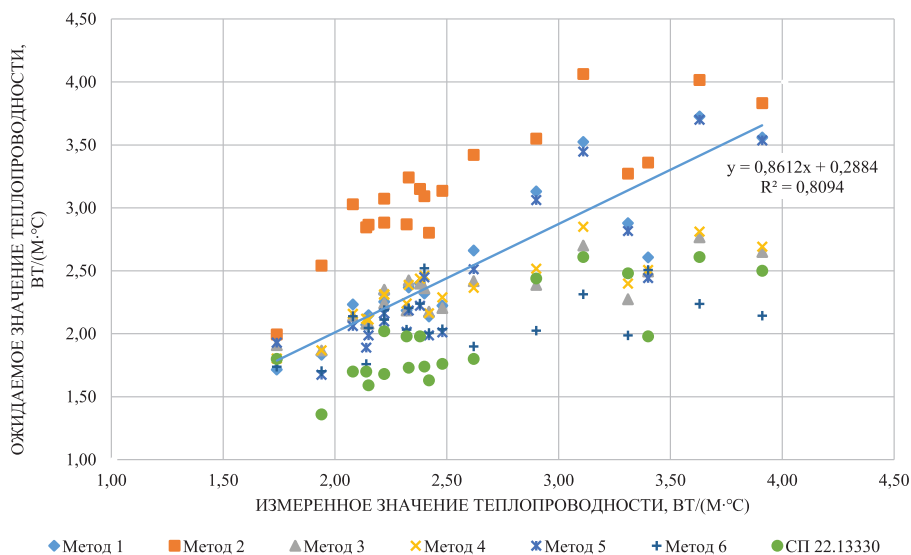


Рис. 1. Значения теплопроводности из модели Farouki для грунтов в мерзлом состоянии в зависимости от способа учета теплопроводности частиц. Уравнение линии тренда отображено для наилучшего метода 1
Fig. 1. Thermal conductivity values from the Farouki model for frozen soils, depending on the method of accounting for the thermal conductivity of particles. The trend line equation is shown for the best method 1

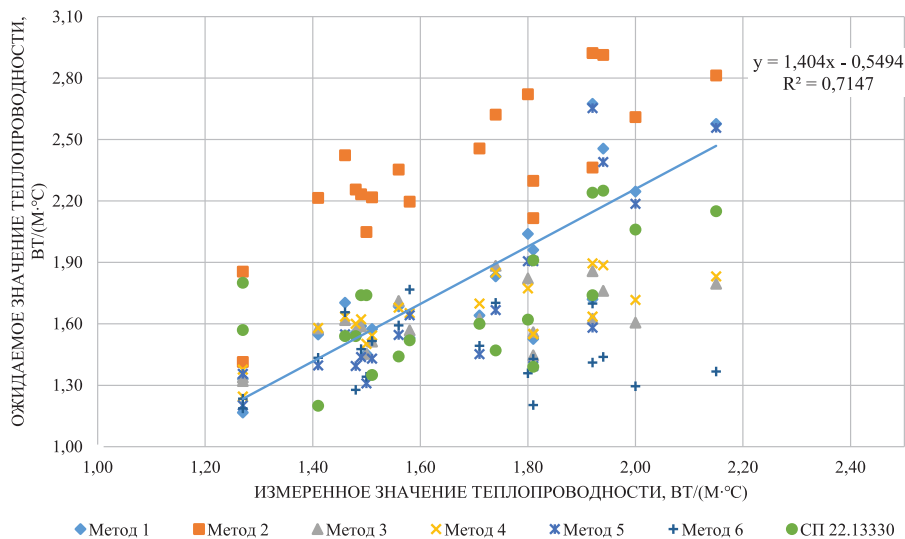


Рис. 2. Значения теплопроводности из модели Farouki для грунтов в талом состоянии в зависимости от способа учета теплопроводности частиц. Уравнение линии тренда отображено для наилучшего метода 1
Fig. 2. Thermal conductivity values from the Farouki model for thawed soils, depending on the method of accounting for the thermal conductivity of particles. The trend line equation is shown for the best method 1

Заключение

В результате анализа можно сделать следующие выводы: модели Johansen и Farouki демонстрируют примерно одинаковую эффективность, в целом находящуюся на удовлетворительном уровне. Наилучшим способом учета теплопроводности частиц являются метод 1, а также метод 5.

Рассматриваемые модели лучше предсказывают значения теплопроводности в мерзлом, нежели в талом состоянии.

Использование табличных значений СП 25.13330 может давать значительную погрешность в определении теплопроводности в мерзлом состоянии и меньшую погрешность в талом состоянии (на схожем уровне с рассматриваемыми моделями).

Наибольшие расхождения в ожидаемых значениях теплопроводности характерны для песков, что подтверждает значимость экспериментального определения их минералогического состава ввиду

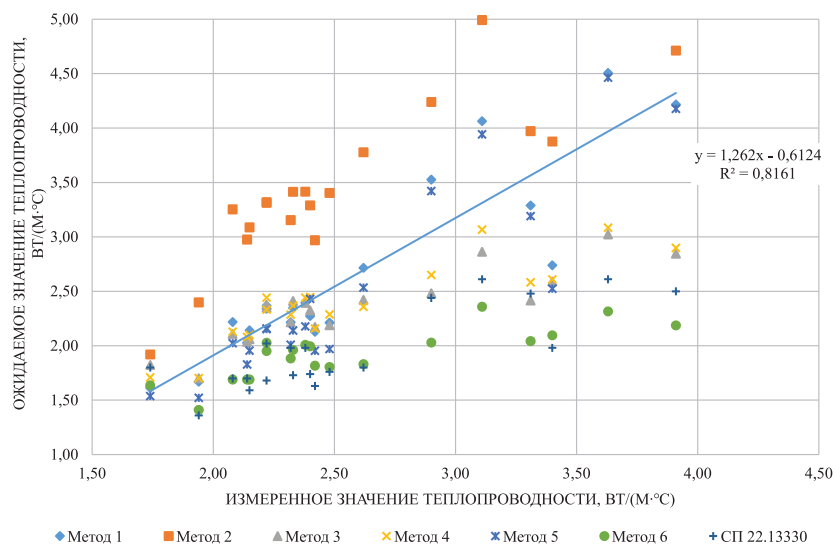


Рис. 3. Значения теплопроводности из модели Johansen для грунтов в мерзлом состоянии в зависимости от способа учета теплопроводности частиц. Уравнение линии тренда отображено для наилучшего метода 1
Fig. 3. Thermal conductivity values from the Johansen model for frozen soils, depending on the method of accounting for particle thermal conductivity. The trend line equation is shown for the best method 1

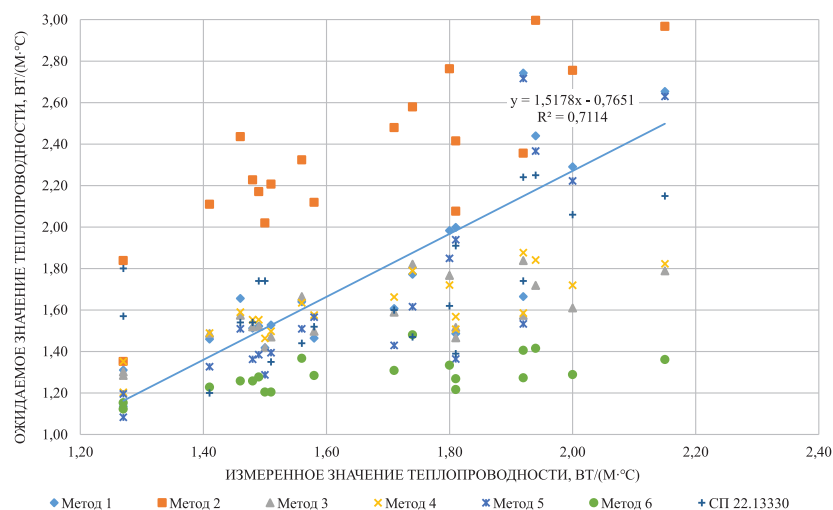


Рис. 4. Значения теплопроводности из модели Johansen для грунтов в талом состоянии в зависимости от способа учета теплопроводности частиц. Уравнение линии тренда отображено для наилучшего метода 1
Fig. 4. Thermal conductivity values from the Johansen model for thawed soils, depending on the method for accounting for particle thermal conductivity. The trend line equation is shown for the best method 1

наибольшей изменчивости содержания кварца в этих грунтах.

В целом, конечно, используемая выборка грунтов является достаточно небольшой для полноценного вывода об эффективности рассматриваемых моделей. На статистические данные сходимости моделей значительное влияние оказали несколько образцов (№ 4, 15, 17), имеющие очень отличные значения теплопроводности от ожидаемых. Однако можно сделать вывод, что данные модели демонстрируют лучшую

сходимость, чем табличные значения СП 25.13330. Использование в моделях ряда физических свойств конкретного образца грунта: степени водонасыщения, плотности скелета, содержания незамерзшей воды, общей влажности и льдистости, пористости, гранулометрического или минералогического состава — имеет явные преимущества.

Дальнейшее изучение данного вопроса, расширяющее количество сравниваемых моделей, выборку грунтов (включая заторфованные и засоленные), является весьма актуальной задачей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаев В.В., Будымка В.Ф., Домбровский М.А., Сергеева Т.А. Теплофизические свойства горных пород. М.: Недра, 1987. 156 с.
2. Горобцов Д.Н. Научно-методические основы исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГРИ, 2011. 198 с.
3. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 280 с.
4. Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Булдович С.Н., Мотенко Р.Г. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. Учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Геоинфо», 2016. 512 с.
5. Наумов М.А., Фоменко И.К. Использование характеристики кривой влажности для определения теплопроводности грунтов. Мат-лы междунар. науч.-практич. конф. «Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях». М.: Изд-во Российского университета транспорта, 2024. С. 156—160.
6. Пустовойт Г.П., Гречищева Э.С., Голубин С.И., Аврамов А.В. Влияние способа получения исходных данных на прогнозные теплотехнические расчеты при проектировании в криолитозоне. Криосфера Земли. 2018, Т. XXII. № 1. С. 51—57
7. Савельев Б.А. Физико-химическая механика мерзлых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
8. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88. — М.: Минстрой России, 2020.
9. Чеверев В.Г., Сафронов Е.В., Алексеев А.Г., Гречищева Э.С. Лабораторные методы определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов: аналитический обзор. Инженерная геология, 2022. Т. XVII. № 1. С. 64—72.
10. Cote J., Konrad J.-M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. Can. Geotech. J. 2005. No. 42. P. 443—458.
11. Farouki O.T. Thermal properties of soils: monograph / Cold Regions Research and Engineering Laboratory. — Hanover (NH), 1981. — (Monograph CRREL-MONO-81-1).
12. He H., He D., Jin J., Smits K. M., Dyck M., Wu Q., Lv J. Room for improvement: A review and evaluation of 24 soil thermal conductivity parameterization schemes commonly used in land-surface, hydrological, and soil-vegetation-atmosphere transfer models // Earth-Science Reviews. — 2020. — Vol. 211. — Art. 103419.
13. Johansen O. Thermal conductivity of soils: report / Cold Regions Research and Engineering Laboratory. — Hanover (NH), 1977. — (Technical Report CRREL-TL-637).
14. Tarnawski V.R., Momose T., Leong W.H. Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal conductivity. Geotechnique. 2009. Vol 59. Iss. 4. P. 331—338.
15. Tian Z., Lu Y., Horton R., Ren T. A simplified de Vries-based model to estimate thermal conductivity of unfrozen and frozen soil. European Journal of Soil Science. 2016. No. 67(5). P. 564—572.
16. Zhang M., Lu J., Lai Y., Zhang X. Variation of the thermal conductivity of a silty clay during a freezing-thawing process. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. No. 124. P. 1059—1067.

REFERENCES

1. Babaev V.V., Budymka V.F., Dombrovskij M.A., Sergeeva T.A. Thermophysical properties of rocks. Moscow: Nedra, 1987. 156 p. (In Russ.).
2. Gorobtsov D.N. Scientific and methodological foundations for studying the thermophysical properties of dispersed soils: diss. Cand. of geol. and min. sciences. Moscow: MGRI, 2011. 198 p. (In Russ.).
3. Gavriliev R.I. Thermophysical properties of rocks and ground covers of the cryolithozone. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. 280 p. (In Russ.).
4. Kudryavtsev V.A., Garagulya L.S., Buldovich S.N., Motenko R.G. Fundamentals of permafrost forecasting in engineering-geological studies. Study guide. 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: Geoinfo Publishing House, 2016. 512 p. (In Russ.).
5. Naumov M.A., Fomenko I.K. Using the characteristic moisture curve to determine the thermal conductivity of soils. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Design, Construction and Operation of Transport Infrastructure Facilities in Complex Climatic and Engineering-Geological Conditions”. Russian University of Transport. 2024. P. 156—160 (In Russ.).
6. Pustovoit G.P., Grechishcheva E.S., Golubin S.I., Avramov A.V. Influence of the method of obtaining initial data on predictive heat engineering calculations when designing in the cryolithozone. Earth’s Cryosphere. 2018. Vol. XXII. No. 1. P. 51—57 (In Russ.).
7. Saveliev B.A. Physicochemical mechanics of frozen rocks. Moscow: Nedra, 1989. 211 p. (In Russ.).
8. SP 25.13330.2020. Foundations and bases on permafrost soils (In Russ.).
9. Cheverev V.G., Safronov E.V., Alekseev A.G., Grechishcheva E.S. Laboratory methods for determining the thermophysical characteristics of frozen and thawed soils: an analytical review. Engineering Geology. 2022. Vol. XVII. No. 1. P. 64—72 (In Russ.).
10. Cote J., Konrad J.-M. A generalized thermal

- conductivity model for soils and construction materials. *Can. Geotech. J.* 2005. No. 42. P. 443—458.
11. Farouki O. T. Thermal properties of soils: monograph / Cold Regions Research and Engineering Laboratory. — Hanover (NH), 1981. — (Monograph CRREL-MONO-81-1).
 12. He H., He D., Jin J., Smits K.M., Dyck M., Wu Q., Lv J. Room for improvement: A review and evaluation of 24 soil thermal conductivity parameterization schemes commonly used in land-surface, hydrological, and soil-vegetation-atmosphere transfer models. *Earth-Science Reviews*, 103419. 2020.
 13. Johansen O. Thermal conductivity of soils: report / Cold Regions Research and Engineering Laboratory. — Hanover (NH), 1977. — (Technical Report CRREL-TL-637).
 14. Tarnawski V.R., Momose T., Leong W.H. Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal conductivity. *Geotechnique*. 2009. Vol 59. Iss. 4. P. 331—338.
 15. Tian Z., Lu Y., Horton R., Ren T. A simplified de Vries-based model to estimate thermal conductivity of unfrozen and frozen soil. *European Journal of Soil Science*. 2016. No. 67(5). P. 564—572.
 16. Zhang M., Lu J., Lai Y., Zhang X. Variation of the thermal conductivity of a silty clay during a freezing-thawing process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. No. 124. P. 1059—1067.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Наумов М.А. — является основным автором статьи, провел необходимые расчеты, анализ литературных источников, участвовал в написании и редактировании текста статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Фоменко И.К. — поставил цель и задачи исследования, участвовал в редактировании текста статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Волошин В.Р. — проанализировал литературные источники для исследования, участвовал в написании и редактировании текста и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Гречищева Э.С. — руководитель экспериментальных исследований, редактировании текста статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Горобцов Д.Н. — дополнил задачи исследования, участвовал в редактировании текста статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Mikhail A. Naumov — is the main author of the article, performed the necessary calculations, analyzed the literature, participated in writing and editing the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Igor K. Fomenko — set the goal and objectives of the study, participated in editing the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Valeriy R. Voloshin — analyzed the literary sources for the study, participated in writing and editing the text and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Erika S. Grechishcheva — supervised the experimental studies, edited the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Denis N. Gorobtsov — supplemented the research objectives, participated in editing the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Наумов Михаил Александрович* — преподаватель кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: naumovma@mgri.ru
тел.: +7 (916)-938-39-54
SPIN-код: 5048-6082
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6323-384X>

Mikhail A. Naumov* — lecturer Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia
e-mail: naumovma@mgri.ru
tel.: +7 (916)-938-39-54
SPIN-code: 5048-6082
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6323-384X>

Фоменко Игорь Константинович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: ifolga@gmail.com
тел.: +7 (916) 922-45-39
SPIN-код: 9127-1871
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2318-6015>

Волошин Валерий Романович — преподаватель кафедры гидрогеологии имени В.М. Швеца гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: voloshinvr@mgri.ru
тел.: +7 (925)-608-90-84
SPIN-код: 5395-9622
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

Гречищева Эрика Станиславовна — заведующая Сектором лабораторных исследований Центра геокриологических и геотехнических исследований. Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ “Строительство”».
6, стр. 12, 2-я Институтская ул., г. Москва 109428, Россия
e-mail: cryoerika@mail.ru
тел.: +7 (925)-603-34-53
SPIN-код: 9964-7527
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0307-6153>

Горобцов Денис Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: gorobtsovdn@mgri.ru
тел.: +7 (925) 664-59-28
SPIN-код: 1378-8611
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Igor K. Fomenko — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia
e-mail: ifolga@gmail.com
tel.: +7 (916) 922-45-39
SPIN-code: 9127-1871
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2318-6015>

Valeriy R. Voloshin — lecturer, Department of Hydrogeology named V.M. Shvets, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia
e-mail: voloshinvr@mgri.ru
tel.: +7 (925)-608-90-84
SPIN-code: 5395-9622
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1971-3852>

Erika S. Grechishcheva — Head of Department for frozen soil testing, Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov.
6/12, 2nd Institutskaya str., Moscow 109428, Russia
e-mail: cryoerika@mail.ru
tel.: +7 (925)-603-34-53
SPIN-code: 9964-7527
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0307-6153>

Denis N. Gorobtsov — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Head of the Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia
e-mail: gorobtsovdn@mgri.ru
tel.: +7 (925) 664-59-28
SPIN-code: 1378-8611
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author