

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 2 / 2023, Vol. 15, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/61SAVN223.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Галкин, А. Ф. Оттаивание грунта при изменении льдистости по глубине деятельного слоя / А. Ф. Галкин, Н. А. Плотников // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/61SAVN223.pdf>

For citation:

Galkin A.F., Plotnikov N.A. Thawing of the soil when the iciness changes in the depth of the active layer. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(2): 61SAVN223. Available at: <https://esj.today/PDF/61SAVN223.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Исследования выполнены при финансовой поддержке государственного задания на НИОКТР 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика»

УДК 536.21:625.87

Галкин Александр Фёдорович

ФГБУН «Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова
Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия
Главный научный сотрудник
Доктор технических наук, профессор
E-mail: afgalkin@mail.ru

Плотников Николай Афанасьевич

ФГБУН «Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова
Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия
Аспирант
E-mail: plotnikov-nikolay96@mail.ru

Оттаивание грунта при изменении льдистости по глубине деятельного слоя

Аннотация. Температурный режим грунтов основания в пределах деятельного слоя во многом определяет надежность и безопасность эксплуатации инженерных сооружений в зоне многолетней мерзлоты. Целью работы являлась количественная оценка степени влияния изменяющейся в пределах деятельного слоя льдистости грунтов криолитозоны на глубину их сезонного оттаивания. Получены аналитические зависимости решения однофазной плоской задачи Стефана при переменной льдистости грунта по координате. Решение получено в виде функциональной зависимости критерия Фурье от числа Стефана и безразмерных симплексов, характеризующих степень изменения льдистости и глубину оттаивания грунта. Зависимость изменения льдистости грунта от расстояния считалась линейной. Получена формула для определения относительной ошибки в определении глубины оттаивания грунтов основания при усреднении льдистости по глубине. Приведены результаты сравнительных расчетов по полученным формулам с классической расчетной зависимостью, не учитывающей изменение льдистости грунта. Показано, что относительная расчетная ошибка при определении глубины оттаивания не зависит от критериев Фурье и Стефана и полностью определяется двумя характерными симплексами: безразмерной глубиной оттаивания и степенью изменения льдистости в пределах деятельного слоя. Результаты вариантных расчетов представлены в виде 2D и 3D графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние начальной льдистости грунта и степени её изменения на глубину оттаивания оснований инженерных сооружений. Установлено, в частности, что для небольших значений безразмерной глубины оттаивания (до

1,0) неравномерность льдистости грунта практически не оказывает влияния на конечный результат, при любых значениях числа Стефана. С увеличением значения безразмерной глубины оттаивания до 2,0, зависимость расчетного числа Фурье от степени изменения льдистости уже более существенна и не может быть проигнорирована, как в случае увеличения, так и уменьшения льдистости по глубине деятельного слоя. Причем, чем больше значение критерия Стефана, тем эта зависимость выражена сильнее.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота; прогноз; глубина оттаивания; льдистость; ошибка; грунт; температура; теплопроводность

Введение

Годовая (сезонная) термо-влажностная динамика грунтов деятельного слоя во многом определяет надежность и безопасность эксплуатации инженерных сооружений в криолитозоне. Это связано с зависимостью прочности мерзлых пород от температуры и влажности (льдистости). В работах [1–3] приведены результаты исследований влияния изменения влажностного режима грунтов на надежность эксплуатации линейных инженерных сооружений криолитозоны. Аналогичные исследования приведены в работах [4–6] для автомобильных и железных дорог северных регионов РФ и Китая [7–9]. Особую актуальность данное направление исследований приобретает при строительстве линейных инженерных сооружений на участках с залеганием подземных льдов в зоне теплового влияния поверхности (гелиотермозоне). Большое внимание этому научному направлению, имеющему важное прикладное значение, уделяется в связи со строительством новых нефте- и газопроводов в криолитозоне, в районах со сложными геокриологическими условиями [10–12]. Исследованию закономерностей взаимовлияния тепловых и механических свойств мерзлых и оттаивающих пород уделяется достаточно большое внимание, как в нашей стране, так и за рубежом. Анализ основных работ известных специалистов по данному научному направлению (С.С. Вялов, Н.А. Цытович, И.Н. Вотяков, Е.П. Шушерина, О. Андерленд, Д. Андерсен, С. Хеймс и другие) приведен в работе [13]. Известно, например, что прочность мерзлых дисперсных пород (песчаник) при изменении температуры изменяется по закону, близкому к $\sqrt{\text{abs}(T)}$. То есть, при повышении температуры с $-6,0^{\circ}\text{C}$ до $-3,0^{\circ}\text{C}$ прочность на сжатие уменьшается в 1,4 раза. Этот пример, мы привели, чтобы показать важность учета теплового фактора при проектировании технических объектов в криолитозоне. Зависимость прочностных характеристик от влажности имеет более сложный характер и существенно зависит от температурного фактора, который определяет наличие незамерзшей воды [14–15]. Наряду со свойствами горных пород большое значение при проектировании объектов криолитозоны имеет и собственно глубина деятельного слоя, которая определяет выбор надежных технических решений [16–18]. В работах [19–21] приведены результаты исследований по оценке влияния различных исходных параметров, в том числе льдистости грунтов, на глубину деятельного слоя. При этом считалось, что льдистость грунта величина постоянная и не изменяется по координате. Основные результаты наших предыдущих исследований по влиянию льдистости грунта на глубину сезонного оттаивания грунта заключаются в следующем [21]. «Исследовано влияние влажности (льдистости) грунтовых оснований автомобильных дорог в различных климатических зонах на изменение глубины оттаивания в теплый период года. Результаты численных расчетов представлены в виде графиков и таблицы, которые позволяют наглядно оценить влияние льдистости грунта и степени его изменения в период эксплуатации дороги на глубину оттаивания дорожного основания. Установлено, в частности, что степень изменения глубины оттаивания при одинаковом значении увеличения льдистости в разных диапазонах (например, с 0,1 до 0,2 и с 0,3 до 0,4) для рассмотренного типичного случая грунтового основания криолитозоны, уменьшается почти в 1,3 раза.

Показано, что, чем больше начальная льдистость грунта, тем степень уменьшения глубины оттаивания при изменении льдистости на постоянную величину будет меньше. Построен 3D график для определения глубины оттаивания грунтов деятельного слоя дорожного основания в диапазоне возможного изменения льдистости в период эксплуатации автомобильной дороги. Наличие графика позволяет оперативно оценить возможные варианты изменения глубины оттаивания и принять правильное, обоснованное техническое решение при проектировании. Например, обосновать необходимость использования специального теплозащитного слоя в дорожной одежде». Настоящая работа является логическим продолжением ранее проведенных исследований по изучению влияния льдистости грунтов на проявление негативных криогенных процессов в криолитозоне.

Целью работы являлось исследование влияние изменения льдистости грунта по вертикальной координате на глубину оттаивания, а также оценка ошибки прогноза при усреднении льдистости грунта по глубине деятельного слоя.

Метод

Допустим, что влажность (льдистость) грунта изменяется по глубине линейно, т. е. справедливы следующие соотношения:

$$W(x) = a + bx \quad W|_{x=0} = W_0 \quad W|_{x=\delta} = W_k. \quad (1)$$

$$W(x) = W_0 + (\text{grad } W) \cdot x. \quad (2)$$

Где W — льдистость грунта, д. е.; W_0 — льдистость грунта на поверхности деятельного слоя, д. е.; W_k — льдистость грунта на глубине зоны теплового влияния поверхности, д. е.; δ — глубина зоны теплового влияния, м [22]; x — координата, м.

Здесь принято, что « $\text{grad } W$ » это градиент льдистости по глубине грунта в зоне теплового влияния поверхности.

$$\text{grad } W = \tilde{g}; \tilde{g} = \frac{W_k - W_0}{\delta} \quad \tilde{g} = W(x)|_{x=s} = W_0 + \tilde{g} \cdot s, \quad (3)$$

s — глубина оттаивания, м; \tilde{g} — градиент льдистости по глубине зоны теплового влияния, °C/м.

Глубина оттаивания грунта может быть найдена из условия Стефана, которое в данном случае запишем в следующем виде:

$$W(x) \frac{ds}{d\tau} = - \frac{\lambda}{\rho L} \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (4)$$

Где λ — коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/м·К; ρ — плотность мерзлого грунта, кг/м³; τ — время, с; T — температура грунта, °C; L — скрытая теплота плавления льда, Дж/кг.

Используя общепринятое допущение о линейном профиле изменения температуры по глубине деятельного слоя при граничных условиях первого рода, решение задачи (1)–(4) получено в следующем безразмерном виде:

$$Fo = St[3S^2 + 2S^3(W - 1)]/6. \quad (5)$$

При получении данного выражения были использованы следующие безразмерные параметры: $Fo = a\tau/\delta^2$; $St = LW_0/C_p t$; $St'' = LW_k/C_p t$; $S = s/\delta$; $W = W_k/W_0$.

Здесь Fo — число (критерий) Фурье; St — число (критерий) Стефана; δ — характерный размер, равный глубине зоны теплового влияния м; C_p — удельная теплоемкость грунта, Дж/кг·К; a — коэффициент температуропроводности грунта, м²/с; s — глубина оттаивания, м.

Если параметр W больше единицы, то льдистость грунта с глубиной увеличивается, если меньше, то уменьшается. По формуле (5) была проведена оценка влияния изменения льдистости грунта на глубину оттаивания основания. Если параметр W равен единице (льдистость грунта не зависит от координаты и является величиной постоянной), то формула (5) преобразуется в классическую формулу Стефана для определения глубины оттаивания грунта при начальной температуре, равной температуре плавления льда:

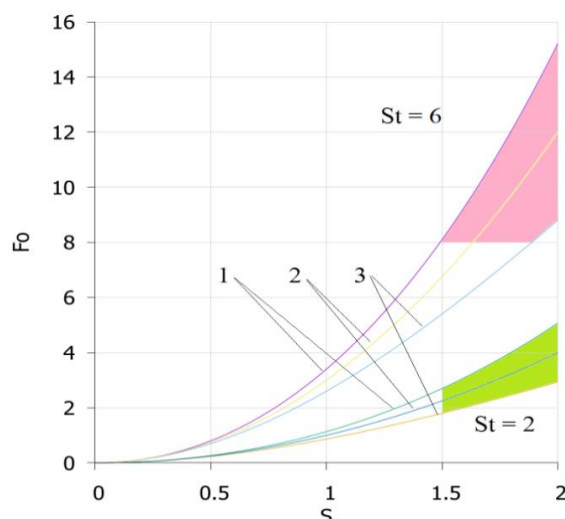
$$Fo = S^2 St / 2 \text{ или } S = \sqrt{2Fo / St}. \quad (6)$$

Очевидно, что формула (6) является частным случаем формулы (5). Представляет интерес оценка возможности использования формулы (6) в инженерных расчетах при усредненном значении льдистости (постоянной величине) по глубине деятельного слоя грунта. Ошибка (в процентах), которую мы допустим заменяя формулу (5) на (6), может быть найдена из следующего выражения:

$$e = \text{abs}[2S(W - 1)/3] \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Результаты и обсуждение

Прежде всего, следует отметить, что ошибка, которая возникает при расчете глубины оттаивания от допущения о постоянном значении льдистости грунта в деятельном слое, зависит только от двух симплексов W и S и не зависит от критериев Фурье и Стефана, которые, собственно, и определяют глубину оттаивания грунта. Это объясняется тем, что ошибка у нас величина относительная и измеряется в процентах от абсолютной величины. В данном случае в процентах от глубины оттаивания грунта при допущении о постоянной льдистости в пределах деятельного слоя.



1 — 1,2; 2 — 1,0; 3 — 0,8

Рисунок 1. Зависимость критерия Фурье от числа Стефана при заданной безразмерной глубине оттаивания грунта для разных значений параметра « W » (составлено авторами)

Для достижения цели исследований по приведенным формулам были проведены варианты расчеты, результаты которых представлены в виде 2D и 3D графиков на рисунках 1–3. На рисунке 1 представлены графики зависимости числа Фурье (Fo) от безразмерной

глубины оттаивания грунта « S » при различной степени изменения льдистости в пределах деятельного слоя, которое характеризуется симплексом « W » для двух характерных значений числа Стефана (St). Как видно из графика, для небольших значений глубин оттаивания (до 1,0) неравномерность льдистости грунта практически не оказывает влияния на конечный результат, как при значении числа Стефана, равном двум, так и при увеличении этого значения в три раза. С увеличением глубины оттаивания до 2,0, зависимость расчетного числа Фурье от степени изменения льдистости уже более существенна и не может быть проигнорирована, как в случае увеличения льдистости по глубине ($W > 1$), так и уменьшения ($W < 1$). При этом, чем больше значение числа Стефана, тем эта зависимость выражена сильнее.

На рисунке 2 представлен 3D график, позволяющий наглядно представить степень зависимости безразмерной глубины оттаивания грунта от критериев Фурье и Стефана при различной степени неравномерности льдистости грунта.

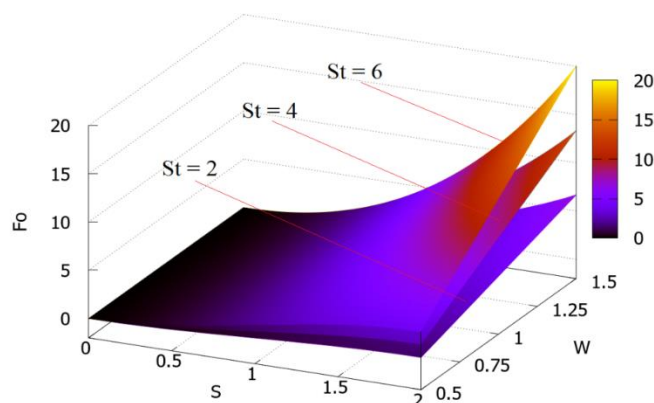


Рисунок 2. Изменение критерия Фурье от параметра « W » и безразмерной глубины оттаивания грунта при различных значениях числа Стефана (составлено авторами)

Анализ графика показывает, что при пропорциональном увеличении (уменьшении) параметра « W » степень изменения числа Фурье одинаковая, но в абсолютных значениях существенно зависит от величины числа Стефана.

На рисунке 3 представлены графики изменения ошибки в расчете времени оттаивания грунта на заданную проектом глубину при расчетах по формулам (5) и (6).

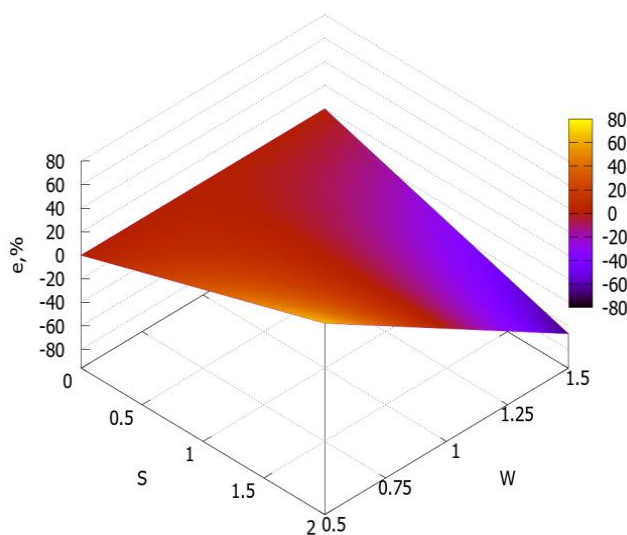


Рисунок 3. Ошибка определения критерия Фурье при не учете изменения льдистости грунта по глубине при заданной безразмерной глубине оттаивания грунта для разных значений параметра « W » (составлено авторами)

Расположение плоскости на рисунке позволяет сделать вывод о том, что для отдельных случаев изменения льдистости по глубине деятельного слоя, имеющих место (наблюдающихся) на практике, ошибка может достигать существенных значений. Значительно больше значений, допустимых в инженерной практике (обычно меньше 10 %). При этом, при увеличении льдистости по глубине, это приводит к занижению глубины оттаивания грунта за заданный промежуток времени, а при уменьшении льдистости по глубине — к завышению. Как видно из графика на рисунке, чем больше значение параметра «S», тем меньше должно быть значение параметра «W». Характер расположения плоскости на рисунке свидетельствует о том, что для больших глубин оттаивания следует при прогнозных расчетах учитывать степень изменения льдистости по глубине деятельного слоя даже при небольших значениях градиента льдистости.

Заключение

Получено аналитическое решение однофазной задачи Стефана при граничных условиях первого рода, учитывающее градиент льдистости по глубине деятельного слоя. Проведено сравнение результатов расчета глубины оттаивания по полученным формулам с результатами расчетов по классическим формулам, полученным при постоянном значении льдистости в пределах деятельного слоя. Получена формула для определения относительной ошибки в определении глубины оттаивания грунтов основания при усреднении льдистости по глубине. Статья имеет, как научное, так и методическое значение и раскрывает алгоритм оценки влияния усреднения отдельных начальных параметров на конечный результат расчетов величины, используемой при обосновании и выборе технических решений. В данном случае, приведена методика оценки влияния усреднения льдистости грунта, на глубину оттаивания основания инженерного сооружения. Статья может представлять интерес как для научных работников в области инженерного мерзлотоведения, так и для специалистов в области проектирования инженерных сооружений криолитозоны. Методика достижения конкретной цели, сформулированной в статье, может быть полезна аспирантам и студентам, обучающимся по направлениям «Строительство и архитектура» и «Науки о Земле». Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение влияния нелинейного характера распределения льдистости по глубине на точность прогноза глубины оттаивания грунтов оснований инженерных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. — С. 367–378.
2. Шапран В.В., Фазилова З.Т. Факторы, оказывающие влияние на развитие продольных профильных деформаций земляного полотна в криолитозоне // Мир транспорта, 2020, том 18, № 2. С. 82–101.
3. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. — М.: Недра, 1980. 383 с.
4. Сериков С.И., Шац М.М. Морозобойное растрескивание грунтов и его роль в состоянии поверхности и инфраструктуры г. Якутска // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. № 1. С. 56–69. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.04.

5. Шестернев Д.М., Литовко А.В. Комплексные исследования по выявлению деформаций на автомобильной дороге «Амур» // Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: «Геомаркет», 2018. С. 309–314.
6. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне // Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» М.: «Геомаркет», 2018. С. 223–227.
7. Niu F., Li A., Luo J., Lin Z., Yin G., Liu M., Zheng H., Liu H. (2017). Soil moisture, ground temperatures, and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China. *Cold Reg Sci Technol.* 133. 7–14.
8. J. Gao, Q. Ma, R. Jingge (2021) Evaluating the heating performance of a novel heating two-phase closed thermosyphon (HTPCT) in high-speed railway embankments of seasonally frozen regions. *Arabian Journal of Geosciences.* 14(22) DOI: 10.1007/s12517-021-08641-8.
9. Gao Q., Wen Z., Feng W., Brouckov A., Zhang M., Zhirkov A. (2020) Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan plateau. *Cold Regions Science and Technology.* 178, 103–116.
10. Николаева М.В., Стручкова Г.П. Прогнозирование теплового взаимодействия участка подземного трубопровода с льдистыми грунтами // Технологии нефти и газа. 2018. № 4(117). С. 56–60.
11. Eppelbaum, L.V., Kutasov, I.M. (2019) Well Drilling in Permafrost Regions: Dynamics of the Thawed Zone. *Polar Research*, 38, 33–51.
<https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351>.
12. Zhang J., Qu G., Jin H. (2010). Estimates on thermal effects of the China Russia crude oil pipeline in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 64(3), 243–247.
13. Guofang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. (2019). Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review. *Recent Advances in Geotechnical Research*, Springer Series in Geomechanics and Geoen지니어링. 227–236.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19.
14. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. — Новосибирск: Наука, 1975. — 176 с.
15. Teng J., Shan F., He Z., Zhang S., Sheng D. (2018) Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. *Géotechnique.* <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.208>.
16. 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(115). С. 22–32.
17. Galkin, A.F. (2022). Controlling the Thermal Regime of the Road Surface in the Cryolithic Zone. *Transportation Research Procedia.* 63, 1224–1228. doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.128.

18. Galkin A.F., Pankov V.Yu. (2022). Thermal Protection of Roads in The Permafrost Zone. / Journal of Applied Engineering Science. 20(2), 395–399. DOI: 10.5937/jaes0-34379.
19. Галкин А.Ф., Курта И.В. Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 2. С. 82–91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.
20. Калиничева С.В., Федоров А.Н. Прогноз изменения температуры мерзлотных ландшафтов при удалении напочвенного покрова // В сборнике: География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока. Якутск, 2022. С. 40–44.
21. Галкин А.Ф., Панков В.Ю. Влияние льдистости грунта на глубину оттаивания дорожного основания // Арктика и Антарктика, 2022. № 2. С. 13–19. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.2.38103.
22. Галкин А.Ф. Глубина зоны теплового влияния автомобильных дорог // Урбанистика. 2022. № 4. С. 1–9. DOI: 10.7256/2310-8673.2022.4.38879.

Galkin Aleksandr Fyodorovich

Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
E-mail: afgalkin@mail.ru

Plotnikov Nikolay Afanas'evich

Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
E-mail: plotnikov-nikolay96@mail.ru

Thawing of the soil when the iciness changes in the depth of the active layer

Abstract. The temperature regime of the foundation soils within the active layer largely determines the reliability and safety of the operation of engineering structures in the permafrost zone. The aim of the work was to quantify the degree of influence of the ice content of cryolithozone soils varying within the active layer on the depth of their seasonal thawing. Analytical dependences of the solution of the single-phase planar Stefan problem with variable ground iciness in coordinate are obtained. The solution is obtained in dimensionless form as a function of the Fourier criterion of the Stefan number and dimensionless simplices characterizing the degree of change in ice content and the depth of thawing of the soil. The dependence of the change in the iciness of the soil on the distance was considered linear. Comparative calculations were carried out using the obtained formulas with the classical calculation dependence, which does not take into account the change in the iciness of the soil. It is established, in particular, that the relative calculation error in determining the depth of thawing does not depend on the Fourier and Stefan criteria and is completely determined by two characteristic simplices: the dimensionless depth of thawing and the degree of change in ice content within the active layer. The results of variant calculations are presented in the form of 2D and 2D graphs, which allow us to visually assess the effect of the initial iciness of the soil and the degree of its change on the depth of thawing of the foundations of engineering structures. It was found, in particular, that for small values of the dimensionless depth of thawing (up to 1.0), the unevenness of the iciness of the soil practically does not affect the final result, for any values of the Stefan number. With an increase in the value of the dimensionless depth of thawing to 2.0, the dependence of the calculated Fourier number on the degree of change in iciness is already more significant and cannot be ignored, both in the case of an increase or decrease in iciness in the depth of the active layer. Moreover, the greater the value of Stefan's number, the more pronounced this dependence is.

Keywords: permafrost; forecast; thaw depth; ice content; error; soil; temperature; thermal conductivity