

УДК 551.343.74

О зависимости процесса промерзания грунтов от влажности

В. И. Штыков¹, А. Б. Пономарев¹, Ю. Г. Янко²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Агрофизический научно-исследовательский институт, Россия, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарев А. Б., Янко Ю. Г. О зависимости процесса промерзания грунтов от влажности // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 22–31. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-22-31

Аннотация

Цель: температуры начала замерзания грунтов при наступлении заморозков интересуют строителей. Ранее было установлено, что на промерзание грунтов влияют многие факторы, однако недостаточно проводилось исследований по влиянию на процесс промерзания отдельных факторов. В статье рассматривается влияние влажности грунтов на температуры их переохлаждения и замерзания.

Методы: исследования проводились в микрохолодильнике при трех режимах промораживания.

Результаты: было установлено, что при постоянном встряхивании температура переохлаждения повышалась, а температура замерзания не изменялась. Получены графические зависимости температур переохлаждения и замерзания грунтов от исходной влажности. Степень уплотнения грунтов не оказывала влияния на эти температуры. Температуры переохлаждения и замерзания грунтов зависят в большей степени от дисперсности грунтов, чем от содержания в них органических веществ.

Практическая значимость: результаты работы имеют значение для строительства, так как расширяют представления об особенностях механизма замерзания грунтов.

Ключевые слова: переохлаждение грунта, грунт, замерзание грунта, режимы охлаждения, почвенная вода, температура переохлаждения, влажность.

Введение

В предзимний и ранневесенний периоды переходы от положительных к отрицательным температурам и наоборот происходят неоднократно. Строителей интересует, при каких величинах отрицательных температур начнется замерзание грунтов. Среди наиболее ранних исследований по температурам переохлаждения и замерзания грунтов следует отметить работы П. И. Андрианова [1] и А. А. Ананяна [2], в которых основное внимание было обращено на причины переохлаждения. В более поздних работах [3, 4] было установлено, что кинетика льдообразования в грунтах зависит от многих факто-

ров: разновидности, структуры поверхности и порового пространства, состава и вязкости порового раствора, вибрации, градиента температур и т. д. Было установлено, что скорость изменения величины отрицательной температуры вблизи внешней поверхности грунта уменьшает продолжительность его переохлаждения и увеличивает максимальную температуру переохлаждения. Влияние скорости понижения температуры на переохлаждение поровой влаги в грунтах рассматривалось также другими авторами [5–8]. Появились работы, посвященные новым методам определения количества

незамерзшей воды [9]. А. А. Коноваловым [10] была исследована взаимосвязь температуры переохлаждения с прочностью грунта в замерзшем состоянии. В связи с обилием факторов, влияющих на процессы промерзания грунтов, существенные затруднения возникают при разработке математического моделирования процессов [11, 12].

Цель исследования

Из выполненных ранее работ по температурам переохлаждения грунтов следует, что последние зависят от многих факторов и появилась необходимость в проведении исследований по оценке зависимости температур переохлаждения и замерзания грунтов от отдельных факторов. В данной статье рассмотрены результаты исследований по зависимости температур переохлаждения и замерзания грунтов от влажности. Этот вопрос представляет как теоретический, так и практический интерес для проектирования транспортных объектов в северных климатических условиях [13–15].

Объекты и методы исследования

Температуры переохлаждения и замерзания грунтов исследовались при различных режимах охлаждения и исходной влажности с использованием микрохолодильника. Изменение режимов охлаждения осуществлялось регулятором напряжения, обеспечивающим плавную регулировку напряжения от 50 до 250 В. Температуру внутри образца, а также в пространстве между стенкой пробирки и охлаждаемым стаканом микрохолодильника измеряли с помощью медь-константановых термопар и микроамперметра.

При измерении нулевые спаи термопар располагали в сосуде Дьюара с мелко измельченным льдом объемом 1,5 л, кото-

рый имел дополнительную теплоизоляцию в виде пенопластового корпуса с крышкой. Образцы грунта при различном увлажнении и уплотнении закладывали в стеклянную пробирку диаметром 10 и высотой 60 мм. Образец имел объем около 5 см³, чтобы по возможности уменьшить неравномерность охлаждения по объему. Примерно по центру образца прокалывали отверстие для ввода рабочего спая термопары. За 30–40 минут до начала опыта микрохолодильник включали в сеть. Загрузку пробирки с образцом проводили после установления в микрохолодильнике постоянной отрицательной температуры, величина которой определяет режим охлаждения. Каждый из образцов охлаждали при трех режимах при температурах в микрохолодильнике –32, –24 и –170 °С.

Результаты

Переход при отрицательных температурах почвенной воды в лед, или процесс замерзания, характеризуется температурными кривыми, представленными на рис. 1. При этом начальный участок кривых от 00 до температурного скачка характеризует явление переохлаждения воды в грунтах, предшествующее их замерзанию. Температурный скачок свидетельствует о начале замерзания грунта. Температурой переохлаждения грунта в настоящей статье мы называем наименьшую температуру в нем, которая достигается к моменту наступления температурного скачка. За температуру начала замерзания грунта принимается наивысшая и наиболее устойчивая температура, устанавливающаяся в образце вслед за температурным скачком [1].

На рис. 1 одна из кривых, соответствующая минимальной температуре охлаждения, показана полностью, а остальные только до

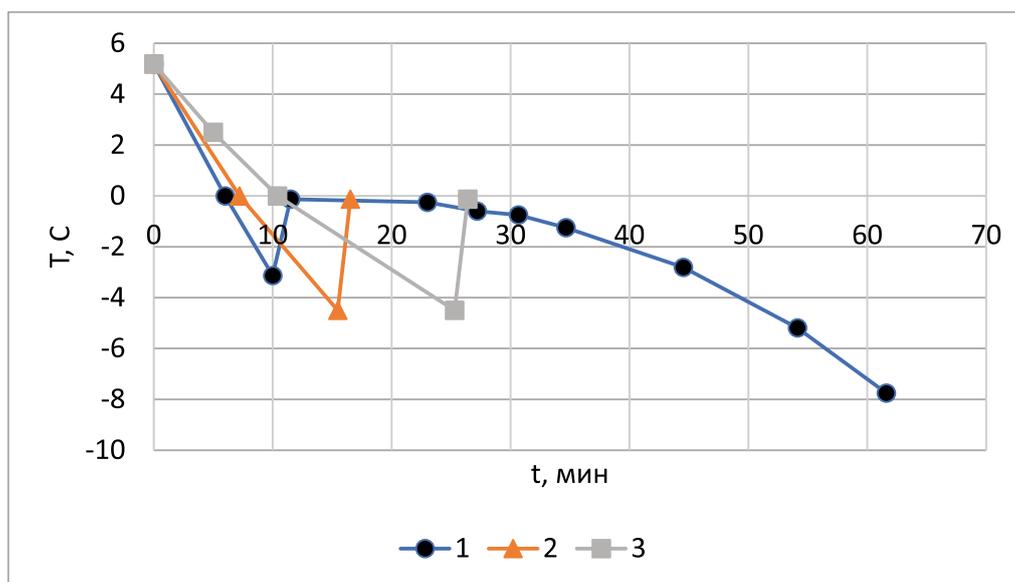


Рис. 1. Кривые замерзания торфяника. Температуры в микрохолодильнике: 1: $-32,40$; 2: $-24,40$; 3: $-17,10$; весовая влажность — 178% ; объемный вес — $0,38 \text{ г/см}^3$

температуры замерзания. При рассмотрении полной кривой замерзания, в частности ее правой части, начиная с точки, отвечающей температуре замерзания, видно, что процесс замерзания характеризуется спектром температур. Объясняется это тем, что, во-первых, сначала замерзает менее связанная влага и, во-вторых, с уменьшением содержания внутрипорового раствора в жидкой фазе увеличивается его концентрация. Причины переохлаждения грунтов исследовали П. И. Андрианов [1] и А. А. Ананян [2].

Большинство опытов с целью сокращения времени, необходимого для их проведения, проводили при довольно низких температурах внутри микрохолодильника. Для определения же времени, в течение которого грунт способен находиться в переохлажденном состоянии, в нескольких опытах в микрохолодильнике создавали температуру на несколько десятых градуса более вы-

сокую, чем температура переохлаждения исследуемого грунта. При этом грунт оставался в переохлажденном состоянии до конца опыта, в нашем случае до 2,5 суток. Мы не ставили перед собой цель провести более длительные эксперименты, так как температура воздуха, а следовательно и грунта, в весенний период резко меняется даже в течение суток. При проведении опытов было выявлено, что замораживание в условиях постоянного встряхивания повышает температуру переохлаждения, но не оказывает влияния на температуру замерзания. Уплотнение же грунтов, имеющих одну и ту же влажность по массе, не оказывает влияния ни на то ни на другое.

Довольно четко прослеживается зависимость температур переохлаждения и замерзания грунтов от влажности. На рис. 2 приведены графики, характеризующие зависимость температур переохлаждения минеральных грунтов от исходной влажности.

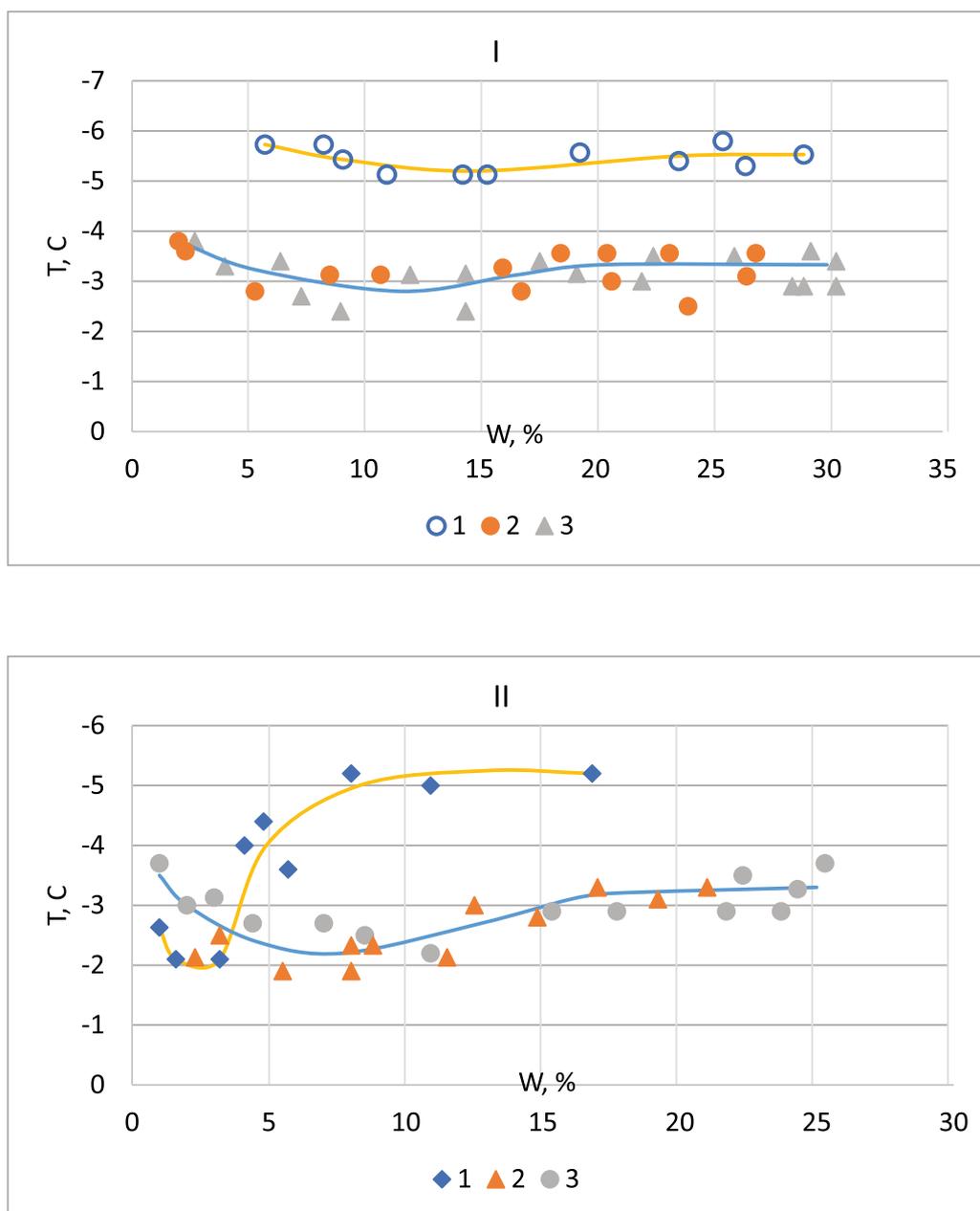


Рис. 2. Зависимость температур переохлаждения грунтов от влажности
I. 1 — подпахотный слой, ОПХ Северного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (СевНИИГиМ), поле 6; 2 — то же, дальнее поле; 3 — то же, поселок им. Э. Тельмана. Ленинградская обл.;
II. Песок: 1 — крупнозернистый, 2 — среднезернистый, 3 — мелкозернистый

Несмотря на различие в механическом составе исследованных грунтов, все кривые имеют много общего: на левом своем конце они обращены выпуклостью вниз. С увеличением влажности температура переохлаждения сначала повышается, затем, достигнув максимального значения, начинает понижаться и, наконец, принимает постоянное значение. В соответствии с [2] характер приведенных кривых можно объяснить следующим образом. При влажности грунта ниже максимальной гигроскопической влажности вода в нем сосредоточена в основном на поверхности частиц, которые оказывают сильное влияние на структуру воды, что является препятствием для ее кристаллизации.

Вода сверх максимальной гигроскопической влагоемкости связана рыхло и по своим свойствам близка к свободной, но трансляционное движение молекул в ней, мешающее перестройке ее структуры при замерзании, существенно меньше, чем в свободной воде. Поэтому и температуры переохлаждения грунтов при их влажности, соответствующей содержанию рыхлосвязанной воды, соответственно, выше. При дальнейшем увеличении влажности, например сверх максимальной молекулярной влагоемкости, происходит увеличение трансляционного движения молекул воды, что уменьшает междипольный ориентационный эффект между полярными молекулами воды, понижая температуру переохлаждения. Увеличение содержания в порах грунта свободной воды вплоть до полной влагоемкости не понижает температуры переохлаждения, так как структура воды не претерпевает изменений. При этом влажность, соответствующая максимальной величине температуры переохлаждения, за-

висит от разновидности грунта: крупнозернистый песок — 2,5 %, мелко- и среднезернистый песок — 7,5 %, подпахотный слой ОПХ СевНИИГиМ — 15 %.

Из рассмотрения кривых температур переохлаждения грунтов, а также кривых механического состава видно, что с увеличением степени дисперсности грунта величина влажности последнего, соответствующая максимуму температуры переохлаждения, возрастает. Почва подпахотного слоя из ОПХ СевНИИГиМ по сравнению с исследованными почвами из пахотного слоя содержит большее количество частиц <0,01 мм, и температуры переохлаждения его во всем диапазоне влажности существенно ниже. Таким образом, на величину температур переохлаждения грунтов оказывает большее влияние степень дисперсности грунта, чем содержание в них органических веществ.

В отличие от температур переохлаждения температуры замерзания как для песка, так и для почв пахотного и подпахотного слоев аппроксимируются одной кривой (рис. 3). При этом с уменьшением исходной влажности температуры замерзания почв также понижаются. К сожалению, при малых величинах влажности очень трудно зафиксировать температурный скачок, так как температура замерзания прочносвязанной воды по мере уменьшения ее содержания за счет фазовых переходов изменяется непрерывно и быстро. Кроме того, при уменьшении исходной влажности температуры переохлаждения и замерзания грунтов по величине становятся близкими и, видимо, при дальнейшем ее уменьшении должны совпасть (рис. 4).

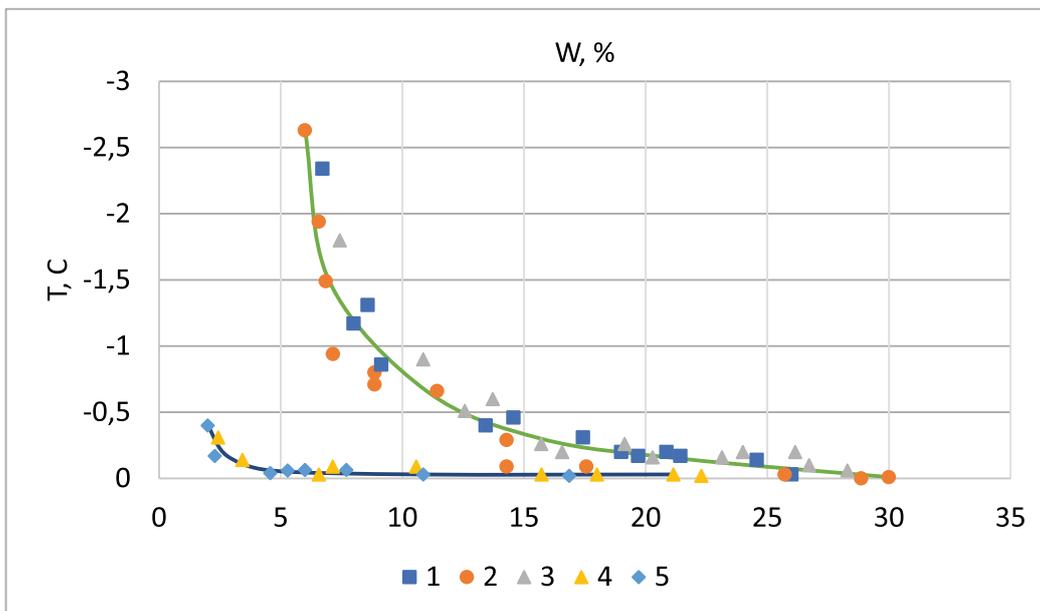


Рис. 3. Зависимость температур замерзания грунтов от влажности.
 Грунты: 1–3 — см. рис. 2; 4 — мелкозернистый песок; 5 — крупнозернистый песок

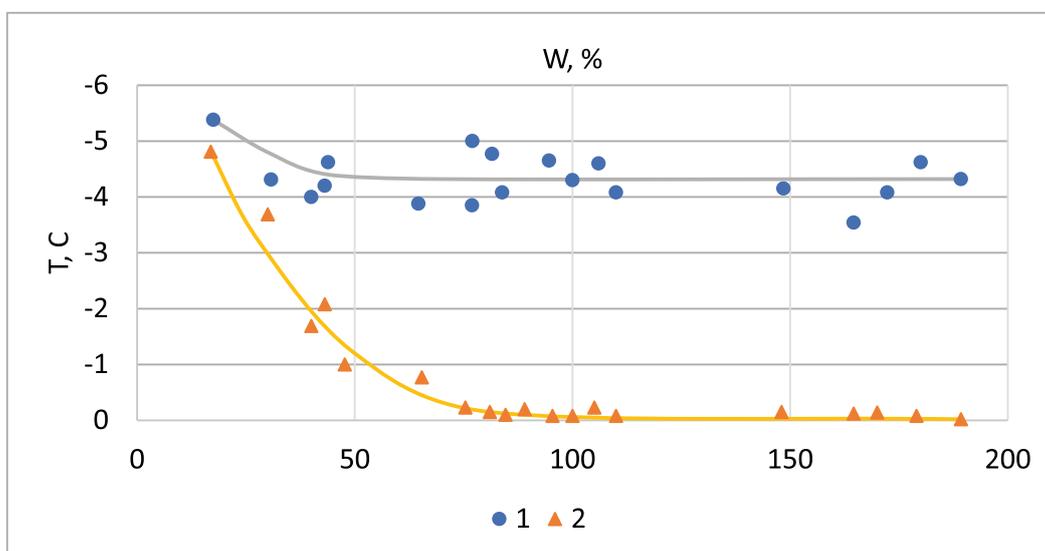


Рис. 4. Зависимость температур переохлаждения (1) и замерзания (2) торфяника от исходной влажности. Зольность 41,35 %

Выводы

1. Уплотнение грунтов, имеющих одну и ту же влажность, не оказывает влияния на температуру их переохлаждения и замерзания.

2. Температуры переохлаждения и замерзания грунтов зависят в большей степени от их дисперсности и исходной влажности, чем от содержания органических веществ.

3. При влажностях грунтов меньших, чем величина, соответствующая максимальному значению температур их переохлаждения, характер изменения кривых переохлаждения и замерзания одинаков, причем с уменьшением влажности температуры переохлаждения и замерзания грунтов понижаются, приближаясь друг к другу по величине.

Библиографический список

1. Андрианов П. И. Температуры замерзания грунтов / Труды Дальневосточной комплексной экспедиции. СОПС АН СССР. Комиссия по изучению вечной мерзлоты. Вып. 1. М.: АН СССР, 1936. С. 17–54.
2. Ананян А. А. Молекулярно-кинетические представления о строении жидкой фазы воды, содержащейся в тонкодисперсных горных породах / Мерзлотные исследования: сб. ст. / геол. фак., кафедра мерзлотоведения. Вып. 7. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. С. 22–36.
3. Гречищев С. Е., Павлов А. В., Шешин Ю. Б. и др. Экспериментальные закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Криосфера Земли. 2004. Т. 8, № 4. С. 41–44.
4. Гречищев С. Е., Павлов А. В., Гречищева О. В. Закономерности предкристаллизационного переохлаждения поровой влаги дисперсных грунтов в градиентном поле температур // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 4. С. 56–58. EDN HVUXQH.
5. Barra, Giuseppina & Matteo, P. & Vittoria, V. & Sesti Osseo, Libero & Cesàro, Attilio. A DSC Study of Thermal Transitions of Apple Systems at Several Water Contents. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. 61. 351–362. 10.1023/A:1010148913394.
6. Liesebach, Jens & Lim, Miang & Rades, Thomas. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC. *Thermochimica Acta — THERMOCHIM ACTA*. 2004. 411. 43–51. 10.1016/j.tca.2003.07.005.
7. Старостин Е. Г., Петров Е. Е., Николаев С. В. Влияние темпа охлаждения на переохлаждение поровой воды в грунтах // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. 2012. Т. 9, № 4. С. 47–51. EDN RDXBP.
8. Белкова Е. А., Мотенко Р. Г., Гречищева Э. С. Влияние температурного режима на температуру начала замерзания грунтов разного гранулометрического состава при ее экспериментальном определении // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: материалы XVI Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, Москва, 1–3 декабря 2021 года. / ООО «Геомаркетинг»; ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»; ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» — Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. М.: Геомаркетинг, 2021. С. 378–385. EDN AOJCL.
9. Старостин Е. Г. Определение количества незамерзшей воды по кинетике кристаллизации. // Криосфера Земли. 2008. Т. 12, № 2. С. 60–64. EDN JTGMBW.
10. Коновалов А. А. Связь температур переохлаждения и кристаллизации влажного грунта с его прочностью в мерзлом состоянии // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88, № 5. С. 1043–1049. EDN UKBVVL.
11. Bo-Quan Lu, Shu-Ying Zang, Li-Quan Song, et al. Cooling and wetting of soil decelerated ground freezing-thawing processes of the active layer in Xing'an

permafrost regions in Northeast China, *Advances in Climate Change Research*. 2023. Vol. 14, iss. 1. P. 126–135. ISSN 1674–9278. DOI: 10.1016/j.accre.2023.01.002.

12. Ван С., Колос А. Ф., Петряев А. В. Математическое моделирование процесса промерзания грунтов земляного полотна железных дорог в условиях холодного климата // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб.: ПГУПС, 2022. Т. 19, вып. 4. С. 820–831. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-820-831.

13. Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A., Bushuev. N. S. Stress-strain state of elastic base under circular foundation // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint Petersburg, 6–8 February 2019*. Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. P. 341–346. DOI: 10.1201/9780429058882-66. EDN XTGDMT.

14. The Impact of Engineering-geologic Conditions on the Development of Railway Subgrade Design Solutions / V. A. Alpysova, N. S. Bushuev, S. V. Shkurnikov,

et. al. // *Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG-2017), Saint Petersburg, 17–19 May 2017*. Saint Petersburg, 2017. P. 752–758. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2017.05.118. EDN XNBLBA.

15. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov, et. al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. Saint Petersburg, 15–22 April 2019. Vol. 2. Singapore: Springer Nature, 2019. P. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23. EDN RCVFWH.

Дата поступления: 11.11.2023

Решение о публикации: 23.12.2023

Контактная информация:

ШТЫКОВ Валерий Иванович — докт. техн. наук, профессор; shtykov41@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук, доцент; pol1nom@yandex.ru

ЯНКО Юрий Григорьевич — канд. техн. наук; yanko@agrophys.ru

On the dependence of soil freezing on humidity

V. I. Shtykov¹, A. B. Ponomarev¹, Yu. G. Yanko²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

² Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdansky pr., Saint Petersburg, 195220, Russia

For citation: *Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Yanko Yu. G.* On the dependence of soil freezing on humidity // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 22–31. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-22-31. (In Russian)

Abstract

Purpose: the temperatures at which soils begin to freeze during the onset of frost are of interest primarily to agricultural workers and construction workers. It was previously established that many factors influence soil freezing. However, not enough research has been carried out on the influence of individual factors on the freezing process. The article examines the influence of soil moisture on their supercooling and freezing temperatures. **Methods:** the studies were carried out in a microrefrigerator with three freezing modes. **Results:** it was found that with constant shaking, the supercooling temperature increased, but the freezing temperature did not change. Graphic dependences of the temperatures of supercooling and freezing of soils on the initial humidity were obtained. The degree of soil compaction did not affect these temperatures. The temperatures of supercooling and freezing of soils depend to a greater extent on the dispersion of soils than on the content of organic substances in them. **Practical significance:** the results of the work are important for construction as they expand the understanding of the features of the mechanism of soil freezing.

Keywords: soil supercooling, soil, soil freezing, cooling regimes, soil water, supercooling temperature, humidity.

References

1. Andrianov P. I. Temperatury zamerzaniya gruntov / Trudy Dal'nevostochnoj kompleksnoj jekspedicii. SOPS AN SSSR. Komissija po izucheniju vечноj merzloty. Vyp. 1. M.: AN SSSR, 1936. S. 17–54. (In Russian)
2. Ananjan A. A. Molekuljarno-kineticheskie predstavlenija o stroenii zhidkoj fazy vody, sodержashhejsja v tonkodispersnyh gornyh porodah / Merzlotnye issledovaniya: sb. st. / geol. fak., kafedra merzlotovedeniya. Vyp. 7. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1967. S. 22–36. (In Russian)
3. Grechishhev S. E., Pavlov A. V., Sheshin Ju. B. i. dr. Jeksperimental'nye zakonomernosti formirovaniya pereohlazhdeniya porovoj vlagi pri ob#emnom zamerzanii dispersnyh gruntov // Kriosfera Zemli. 2004. T. 8, № 4. S. 41–44. (In Russian)
4. Grechishhev S. E., Pavlov A. V., Grechishheva O. V. Zakonomernosti predkristallizacionnogo pereohlazhdeniya porovoj vlagi dispersnyh gruntov v gradientnom pole temperatur // Kriosfera Zemli. 2006. T. 10, № 4. S. 56–58. EDN HVUXQH. (In Russian)
5. Barra, Giuseppina & Matteo, P. & Vittoria, V. & Sesti Osseo, Libero & Cesàro, Attilio. A DSC Study of Thermal Transitions of Apple Systems at Several Water Contents. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2012. 61. 351–362. 10.1023/A:1010148913394.
6. Liesebach, Jens & Lim, Miang & Rades, Thomas. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC. Thermochemica Acta — THERMOCHIM ACTA. 2004. 411. 43–51. 10.1016/j.tca.2003.07.005.
7. Starostin E. G., Petrov E. E., Nikolaev S. V. Vliyanie tempa ohlazhdeniya na pereohlazhdenie porovoj vody v gruntah // Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova. 2012. T. 9, № 4. S. 47–51. EDN RDFXBP. (In Russian)

8. Belkova E. A., Motenko R. G., Grechishheva Je. S. Vliyanie temperaturnogo rezhima na temperaturu nachala zamerzaniya gruntov raznogo granulometricheskogo sostava pri ee jeksperimental'nom opredelenii // Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii: materialy XVI Obshherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii izyskatel'skih organizacij, Moskva, 1–3 dekabrja 2021 goda / OOO “Geomarketing”; OOO “Institut geotekhniki i inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve”; asociacija “Inzhenernye izyskanija v stroitel'stve” — Obshherossijskoe otraslevoe ob#edinenie rabotodatelej Sojuz izyskatelej. M.: Geomarketing, 2021. S. 378–385. EDN AOJCL. (In Russian)
9. Starostin E. G. Opredelenie kolichestva nezamerzshej vody po kinetike kristallizacii // Kriosfera Zemli. 2008. T. 12, № 2. S. 60–64. EDN JTGMWB. (In Russian)
10. Konovalov A. A. Svjaz' temperatur pereohlazhdenija i kristallizacii vlazhnogo grunta s ego prochnost'ju v merzлом sostojanii // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 2015. T. 88, № 5. S. 1043–1049. EDN UKBV-VL. (In Russian)
11. Bo-Quan Lu, Shu-Ying Zang, Li-Quan Song, et al. Cooling and wetting of soil decelerated ground freezing-thawing processes of the active layer in Xing'an permafrost regions in Northeast China, *Advances in Climate Change Research*. 2023. Vol. 14, iss. 1. P. 126–135. ISSN 1674–9278. DOI: 10.1016/j.accre.2023.01.002.
12. Van S., Kolos A. F., Petraev A. V. Matematicheskoe modelirovanie processa promerzaniya gruntov zemljanogo polotna zheleznyh dorog v uslovijah holdnogo klimata // *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. SPb.: PGUPS, 2022. T. 19, vyp. 4. S. 820–831. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-820-831. (In Russian)
13. Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A., Bushuev N. S. Stress-strain state of elastic base under circular foundation // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint Petersburg, 6–8 February 2019*. Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. P. 341–346. DOI: 10.1201/9780429058882-66. EDN XTGDMT.
14. The Impact of Engineering-geologic Conditions on the Development of Railway Subgrade Design Solutions / V. A. Alpysova, N. S. Bushuev, S. V. Shkurnikov, et. al. // *Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG-2017)*, Saint Petersburg, 17–19 May 2017. Saint Petersburg, 2017. P. 752–758. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2017.05.118. EDN XNBLBA.
15. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov, et. al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. Saint Petersburg, 15–22 April 2019. Vol. 2. Singapore: Springer Nature, 2019. P. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23. EDN RCVFWH.

Received: 11.11.2023

Accepted: 23.12.2023

Author's information:

Valery I. SHTYKOV — PhD in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru

Andrei B. PONOMAREV — PhD in Engineering, Associate Professor; pol1nom@yandex.ru

Yuri G. YANKO — PhD in Engineering; yanko@agrophys.ru