

Экспериментальное исследование закономерностей тепломассопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании

¹ Левин Лев Юрьевич (<https://orcid.org/0000-0003-0767-9207>), aerolog_lev@mail.ru

¹ Семин Михаил Александрович (<https://orcid.org/0000-0001-5200-7931>), seminma@inbox.ru

² Вшивков Алексей Николаевич (<https://orcid.org/0000-0002-7667-455X>), vshivkov.a@icmm.ru

² Пантелеев Иван Алексеевич (<https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>), pia@icmm.ru

¹ Бублик Сергей Анатольевич, serega_bublik@mail.ru

² Угольников Михаил Васильевич (<https://orcid.org/0009-0003-9997-1615>), ugolnikov.m@icmm.ru

² Ложкин Денис Витальевич (<https://orcid.org/0000-0003-3302-8408>), lozhkin.d@icmm.ru

^{3,2} Плехов Олег Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0002-0378-8249>), pia@icmm.ru

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

² Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

³ Пермский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Пермь, Россия

Резюме [PDF RUS](#) [PDF ENG](#)

Полный текст [PDF RUS](#)

Резюме. В работе изучается процесс замораживания песка средней крупности, насыщенного водным раствором NaCl различной концентрации (0–104 г/л). Целью работы является определение влияния концентрации NaCl на процессы тепломассопереноса. Замораживание осуществлялось с одного торца образца, температурное поле регистрировалось восемью термопарами, распределение влажности – методом взвешивания с последующей сушкой. Показано, что температура начала замерзания поровой влаги с ростом концентрации NaCl линейно снижается до –7 °С. Выявлено, что во всех вариантах испытаний имеет место перераспределение влаги с ее накоплением вблизи фронта замерзания. В незасоленных образцах данный эффект наиболее выражен, что объясняется совокупным действием термодиффузии и различия фазовых давлений на границе «вода–лед». При увеличении концентрации соли эффект ослабевает, а различие влажностей между промерзшей и незамерзшей зонами уменьшается. Полученные временно-пространственные зависимости температуры и влажности могут быть использованы для параметризации математических моделей тепломассопереноса в замораживаемых средах и служат основой для дальнейших исследований процессов замораживания засоленных грунтов.

Ключевые слова:

искусственное замораживание грунтов, засоленный песок, NaCl, тепломассоперенос, фазовый переход, распределение влажности

Для цитирования: Левин Л.Ю., Семин М.А., Вшивков А.Н., Пантелеев И.А., Бублик С.А., Угольников М.В., Ложкин Д.В., Плехов О.А. Экспериментальное исследование закономерностей тепломассопереноса во влажном засоленном песке при осевом замораживании. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 439–451.

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.439-451> ; <https://www.elibrary.ru/nohjvd>

For citation: Levin L.Yu., Semin M.A., Vshivkov A.N., Panteleev I.A., Bublik S.A., Ugolnikov M.V., Lozhkin D.V., Plekhov O.A. Experimental study of heat and mass transfer in moist saline sand under axial freezing. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 439–451. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.439-451> ; <https://www.elibrary.ru/nohjvd>

Список литературы

1. Балобаев В.Т., Баулин В.В., Гарагуля Л.С. и др. **1999.** *Основы геоэкологии*. Ч. 5. *Инженерная геоэкология*. М.: Изд-во МГУ, 526 с.
2. Chen Q.M., Ghimire B., Su L.B., Liu Y. **2024.** Micro-scale investigations on the mechanical properties of expansive soil subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 219, Article 104128. doi:10.1016/j.coldregions.2024.104128

3. Lai Y., You Z., Zhang J. **2021**. Constitutive models and salt migration mechanisms of saline frozen soil and the-state-of-the-practice countermeasures in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 13(1): 1–17. doi:10.3724/SP.J.1226.2021.00001
4. Li K.Q., Yin Z.Y., Zhang N., Liu Y. **2023**. A data-driven method to model stress–strain behaviour of frozen soil considering uncertainty. *Cold Regions Science and Technology*, 213, Article 103906. doi:10.1016/j.coldregions.2023.103906
5. Li S., Zhang M., Pei W., Lai Y. **2018**. Experimental and numerical simulations on heat-water-mechanics interaction mechanism in a freezing soil. *Applied Thermal Engineering*, 132: 209–220. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.12.061
6. Вялов С.С., Гмошинский В.Г., Городецкий С.Э. и др. **1962**. *Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений*. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 254 с.
7. Zhou M.B. **2025**. Structure model and design of iced cylindrical shell for large-diameter ground freezing shaft sinking. In: *Tunnelling into a sustainable future-methods and technologies*. CRC Press, p. 1930–1937.
8. Zhou X. et al. **2022**. Comprehensive review of artificial ground freezing applications to urban tunnel and underground space engineering in China in the last 20 years. *Journal of Cold Regions Engineering*, 36(3), Article 04022002. doi:10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000273
9. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Pantelev L., Levin L. **2018**. Creep behavior of ice-soil retaining structure during shaft sinking. *Procedia Structural Integrity*, 13: 1273–1278. doi:10.1016/j.prostr.2018.12.260
10. Трупаков Н.Г. **1974**. *Замораживание грунтов в подземном строительстве*. М.: Недра, 280 с.
11. Pilecki Z. et al. **2025**. Temperature anomaly as an indicator of groundwater flow prior to the shaft sinking with the use of artificial ground freezing. *Engineering Geology*, 347, Article 107916. doi:10.1016/j.enggeo.2025.107916
12. Semin M. et al. **2024**. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction: A case study of the Darasinsky potash mine. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, Article 100710. doi:10.1016/j.clet.2023.100710
13. Phillips M. et al. **2021**. Use of artificial ground freezing in construction of cross passages under Suez Canal. *Geomechanics and Tunnelling*, 14(3): 298–307. doi:10.1002/geot.202000045
14. Ольховиков Ю.П. **1984**. *Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников*. М.: Недра, 238 с.
15. Qin B. et al. **2022**. Research on influences of groundwater salinity and flow velocity on artificial frozen wall. *Transportation Geotechnics*, 34, Article 100739. doi:10.1016/j.trgeo.2022.100739
16. Tounsi H. et al. **2024**. Thermo-hydro-mechanical modeling of brine migration in a heated borehole test in bedded salt. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(8): 5505–5518. doi:10.1007/s00603-023-03632-5
17. Bublik S. et al. **2023**. Experimental and theoretical study of the influence of saline soils on frozen wall formation. *Applied Sciences*, 13(18), Article 10016. doi:10.3390/app131810016
18. Semin M. et al. **2024**. Influence of soil salinity on the bearing capacity of the frozen wall. *Fracture and Structural Integrity*, 18(69): 106–114. doi:10.3221/IGF-ESIS.69.08
19. Семин М.А., Левин Л.Ю., Бублик С.А., Бровка Г.П. **2025**. Влияние концентрации растворенной соли на миграцию влаги в искусственно замораживаемых грунтах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2: 111–122. doi:10.15372/FTPRPI20250211
20. Fan W.H., Yang P. **2019**. Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage. *Transportation Geotechnics*, 20, Article 100250. doi:10.1016/j.trgeo.2019.100250
21. Fan W.H., Yang P., Yang Z.H. **2019**. Impact of freeze-thaw on the physical properties and compressibility of saturated clay. *Cold Regions Science and Technology*, 168, Article 102873. doi:10.1016/j.coldregions.2019.102873
22. Wen Z., Ma W., Feng W.J., et al. **2011**. Experimental study on unfrozen water content and soil matric potential of Qinghai-Tibetan silty clay. *Environmental Earth Sciences*, 66: 1467–1476. doi:10.1007/s12665-011-1386-0
23. Stähli M., Stadler D. **1997**. Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 195: 352–369.
24. Watanabe K., Muto Y., Mizoguchi M. **2001**. Water and solute distribution near an ice lens in a glass-powder medium saturated with sodium chloride solution under unidirectional freezing. *Crystal Growth & Design*, 1(3): 207–211. doi:10.1021/cg005535i
25. Rui D.H., Guo C., Lu M., et al. **2019**. Experimental study on water and salt migrations in clay under freezing effect. *Journal of Glaciology Geocryology*, 41(1): 109–115. doi:10.3390/app14198970
26. Xu X.Z., Wang J.C., Zhang L.X., et al. **1995**. *Mechanisms of frost heave and soil expansion of soils*. Beijing: Science Press. (In Chinese). (Google Scholar)
27. Bing H., He P. **2008**. Experimental study of water and salt redistribution of clay soil in an opening system with constant temperature. *Environmental Geology*, 55: 717–721. doi:10.1007/s00254-007-1023-0
28. Bing H., He P., Zhang Y. **2015**. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil. *Environmental Earth Sciences*, 74: 675–681. doi:10.1007/s12665-015-4072-9
29. Xiao Z.A., Lai Y.M., You Z.M. **2017**. Water and salt migration and deformation mechanism of sodium chloride soil during unidirectional freezing process. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(11): 1992–2001. doi:10.11779/CJGE201711006
30. Xiao Z., Hou Z., Zhu L., Dong X. **2021**. Experimental investigation of the influence of salt on the phase transition temperature in saline soil. *Cold Regions Science and Technology*, 183, Article 103229. doi:10.1016/j.coldregions.2021.103229
31. Чеверев В.Г., Брушков А.В., Половков С.А., Покровская Е.А., Сафронов Е.В. **2021**. Анализ представлений о механизме криогенной миграции воды в промерзающих грунтах. *Криосфера Земли*, 25(5): 3–12. doi:10.15372/KZ20210501
32. Павлов М.В., Карпов Д.Ф. **2023**. Решение краевой задачи тепломассопереноса методом источников для условий лучистого обогрева почвы. *Природообустройство*, 4: 15–20. doi:10.26897/1997-6011-2023-4-15-20
33. Lucas T. et al. **2001**. Freezing of a porous medium in contact with a concentrated aqueous freezant: numerical modelling of coupled heat and mass transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(11): 2093–2106. doi:10.1016/S0017-9310(00)00238-6
34. Xiao Z. et al. **2024**. Study on the multi-field-coupling model of saline frozen soil considering ice and salt crystallization. *Computers and Geotechnics*, 169, Article 106209. doi:10.1016/j.compgeo.2024.106209