



## Аналитическое определение функции релаксации вязкоупругого мерзлого грунта на основе экспериментальных данных

Е. В. Корешкова<sup>1</sup>, А. А. Шушарин<sup>1</sup>✉, Н. М. Хасанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

<sup>2</sup> Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, проспект академиков Раджабовых, 10, Душанбе, 734042, Республика Таджикистан

✉ shusharinaa@tyuiu.ru



**Аннотация.** Прочность и ползучесть мерзлых грунтов являются одними из основных механических свойств для учета времени в проектировании строительных объектов. На основании экспериментальных данных определены деформационные механические характеристики мерзлого грунта с учетом ползучести. Получена функция ползучести мерзлого грунта. По функции ползучести аналитически определена функция релаксации мерзлого грунта с помощью метода ломаных. Методика определения функций ползучести и релаксации может быть использована при расчете оснований из мерзлых грунтов под объектами строительства.

**Ключевые слова:** мерзлый грунт, грунтовое основание, механические характеристики, метод ломаных

**Благодарности.** Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, реализуемых коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России, по проекту «Компьютерное моделирование механических, температурных и динамических процессов в слабых и многолетнемерзлых грунтах для обеспечения надежности грунтовых оснований инженерных сооружений» (№ FEWN-2024-0006).

**Для цитирования:** Корешкова Е. В., Шушарин А. А., Хасанов Н. М. Аналитическое определение функции релаксации вязкоупругого мерзлого грунта на основе экспериментальных данных. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(3):36–43. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-36-43>

## Analytical determination of the relaxation function of viscoelastic frozen soil based on experimental data

Elena V. Koreshkova<sup>1</sup>, Alexander A. Shusharin<sup>1</sup>✉, Nurali M. Hasanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

<sup>2</sup> Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi, 10 Academicians Rajabov's avenue, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan

✉ shusharinaa@tyuiu.ru



**Abstract.** Strength and creep of frozen soils are among the main mechanical properties for time estimation in the design of construction objects. Based on experimental data, the authors determined deformational

mechanical characteristics of frozen soil, including creep, and obtained a creep function of frozen soil. Using this creep function, the authors analytically determined the relaxation function of frozen soil using the broken lines method. This methodology can be used in the design of foundations for construction objects made of frozen soils.

**Keywords:** frozen soil, soil foundation, mechanical characteristics, broken line method

**Acknowledgements.** The work was prepared as part of the state assignment for the implementation of scientific projects by teams of higher education institutions under the Ministry of Science and Higher Education of Russia; project No. FEWN-2024-0006 "Computer modeling of mechanical, temperature and dynamic processes in weak and permafrost soils to ensure the reliability of ground foundations for engineering structures".

**For citation:** Koreshkova E. V., Shusharin A. A., Hasanov N. M. Analytical determination of the relaxation function of viscoelastic frozen soil based on experimental data. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(3):36–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-36-43>



## 1. Введение

Мерзлые грунты представляют собой сложные многокомпонентные материалы, состоящие из минеральных частиц, включений льда, газа, и обладают рядом специфических свойств. По сравнению с намерзлыми грунтами механические свойства мерзлых грунтов зависят от температуры [1]. Изучению механических свойств мерзлых грунтов при циклическом промерзании-оттаивании посвящена обзорная статья [2]. Реологические свойства мерзлых грунтов характеризуются существенным снижением прочности и повышением деформируемости [3]. При расчете напряженно-деформированного состояния оснований из мерзлых грунтов необходимо учитывать их вязкоупруго-пластическое поведение [4]. Для расчета деформированного состояния грунта во времени выбор модели определяет постановку экспериментов по изучению механических характеристик мерзлого грунта. В работах [5–10] описаны экспериментальные исследования механических свойств мерзлых грунтов. В [11] предложена вязкоупругая модель грунта с тремя параметрами, и задача вязкоупругости после преобразования Лапласа сведена к задаче упругости. В основе некоторых реологических моделей лежит модель Фойгта. Она характеризуется дифференциальной зависимостью деформаций от напряжений. Более сложные модели основаны на теории дробного исчисления [12]. Модели, основанные на интегральной зависимости деформаций и напряжений (закон Больцмана), рассмотрены в [13, 14]. В интеграле Больцмана рассматривается экспоненциальное представление ядра ползучести с ограниченным количеством параметров. Авторы статьи отказались от ядерного представления механических характеристик и рассмотрели вариант функции ползучести в виде ломаной линии [15, 16], параметры которой определены из эксперимента.

Экспериментальные и теоретические исследования на ползучесть мерзлого грунта рассмотрены в работах [17–19]. В данной статье показан алгоритм, как по данным из эксперимента на ползучесть или релаксацию грунтового образца построить функцию ползучести или функцию релаксации по методу ломаных, далее по уже известной из эксперимента одной функции в виде ломаной – ползучести или релаксации – найти аналитическим методом другую неизвестную функцию. Таким образом, нет необходимости ставить два эксперимента: испытание на ползучесть и испытание на релаксацию образцов.

## 2. Материалы и методы

Объект исследования – образец мерзлого грунта. Предмет исследования – механические характеристики мерзлого грунта.

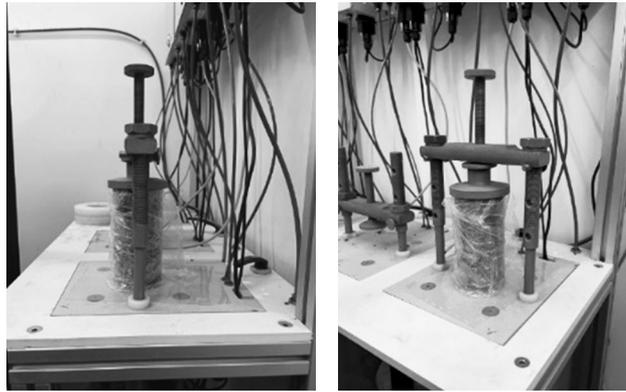


Рис. 1. Установка испытания мерзлого грунта методом одноосного сжатия (фото авторов)

Fig. 1. Uniaxial compression test setup for frozen soil (author's photo)

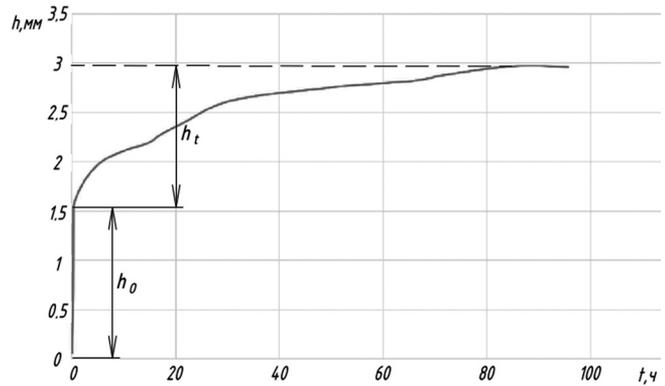


Рис. 2. Зависимость абсолютных деформаций от времени (график получен Гультяевым Р. С.)

Fig. 2. Dependence of absolute deformations on time (graph obtained by Gulytaev R. S.)

Функция ползучести мерзлого грунта определялась экспериментально. Испытание проводилось в приборе для одноосного сжатия образца грунта (рис. 1). Лабораторный эксперимент поставлен Р. С. Гультяевым, магистрантом базовой кафедры ООО «Мостострой-11» (Тюменский индустриальный университет). Материалом для проведения эксперимента был суглинок нарушенного сложения с влажностью 56 %; плотностью 1.41 г/см<sup>3</sup>; льдистостью 0.64.

К образцу диаметром 70 мм, высотой 146 мм прикладывалась нагрузка ступенчато по 0.14 МПа. Критерием стабилизации являлось значение абсолютных деформаций меньше 0.01 мм за 12 часов. Эксперимент закончен при достижении продольных деформаций равных 20 % от исходной высоты образца. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Используя кривую экспериментальных данных, с помощью метода наименьших квадратов получили функцию ползучести в виде ломаной линии [20] (время безразмерное):

$$\Pi(t) = \Pi(0) \left\{ h(t) - \sum_{i=0}^n (a_i - a_{i+1}) \cdot (t - T_i) \cdot h(t - T_i) \right\}, \quad (1)$$

где  $a_0 = 0$ ,  $a_{i+1} = 0$ ,  $T_0 = 0$ ,  $h(t)$  – функция Хевисайда,  $a_i$  – неизвестные коэффициенты ломаной, которые находятся по экспериментальным данным.

Для функции  $\Pi(t)$  известно изображение по Лапласу-Карсону [20]:

$$\Pi^*(p) = \Pi(0) \left[ 1 - \frac{a_0 - a_1}{p} e^{-pT_0} - \frac{a_1 - a_2}{p} e^{-pT_1} - \dots - \frac{a_i - a_{i+1}}{p} e^{-pT_i} - \frac{a_n - a_{n+1}}{p} e^{-pT_n} \right], \quad p = \frac{1}{T}.$$

Определим функцию релаксации  $R(t)$  грунта. Функция релаксация также представима в виде ломаной с неизвестными коэффициентами,  $b_i, i = 1, \dots, m$ :

$$R(t) = R(0) \left\{ h(t) - \sum_{i=0}^m (b_i - b_{i+1}) (t - \tilde{T}_i) h(t - \tilde{T}_i) \right\}, \quad p_i = \frac{1}{\tilde{T}_i}. \quad (2)$$

Значения  $T_i, \tilde{T}_i$  для функции ползучести и для функции релаксации в общем случае различны.

По методу ломаных находится оригинал функции релаксации  $R(t)$ . Для этого составлена система уравнений, основанная на равенстве неизвестного оригинала в изображениях и известной функции в изображениях  $R^*(p_i) = 1/\Pi^*(p_i)$ , на системе точек  $p_i, i = 1, \dots, 4$ .

Система уравнений имеет вид [20]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^L \frac{e^{-p_1 T_{i-1}} - e^{-p_1 T_i}}{p_1} b_i = \frac{\Pi^*(p_1)}{\Pi(0)} - 1 \\ \sum_{i=1}^L \frac{e^{-p_{L-1} T_{i-1}} - e^{-p_{L-1} T_i}}{p_{L-1}} b_i = \frac{\Pi^*(p_{L-1})}{\Pi(0)} - 1. \\ \sum_{i=1}^L (T_i - T_{i-1}) b_i = \frac{\Pi^*(p_{L=0})}{\Pi(0)} - 1 \end{cases} \quad (3)$$

Заключительное уравнение системы (3) отличается, так как записано для точки  $p_5 = 0$ . Для асимптотических и начальных значений искомой функции необходимо учесть теорему о пределах [20]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = \lim_{p \rightarrow 0} R^*(p), \quad \lim_{t \rightarrow 0} R(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} R^*(p).$$

Формулы (1)–(3) были реализована в Excel. Обязательно проводилась проверка алгоритма на тестовом примере для образцов из оргстекла и глины [21, 22]. Погрешность вычислений метода составила не более двух процентов.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 показана полученная функция ползучести. Коэффициенты формулы (1) равны:  $a_1 = 2.992 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_2 = 1.571 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_3 = 2.696 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_4 = 1.68 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_5 = 2.785 \cdot 10^{-6}$ ;  $a_6 = 2.785 \cdot 10^{-7}$ .

Функция релаксации грунта определена по системе уравнений (3), для которой значения  $T_i$ :  $T_1 = 2$ ,  $T_2 = 11$ ,  $T_3 = 18$ ,  $T_4 = 30$ ,  $T_5 = 70$ . Результатом решения системы уравнений (3) являются коэффициенты  $b_i$ :  $b_1 = -0.0012$ ,  $b_2 = -0.00138$ ,  $b_3 = -0.00721$ ,  $b_4 = -0.00483$ . Механические характеристики мерзлого грунта представлены на рис. 4.

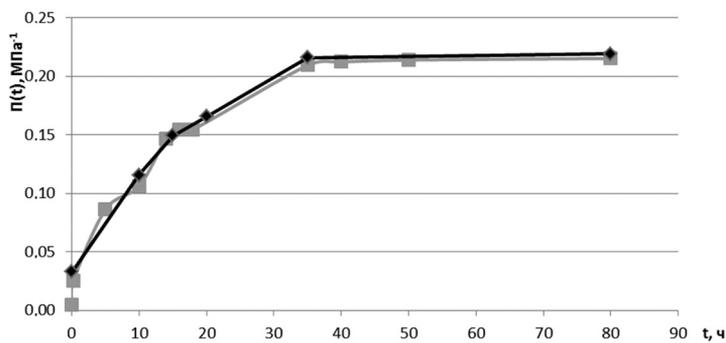


Рис. 3. Функция ползучести:  
 ●  $\Pi(t)$  – экспериментальная;  
 ■  $\Pi(t)$  – теоретическая  
 (график составлен авторами)  
 Fig. 3. Creep function:  
 ●  $\Pi(t)$  – experimental;  
 ■  $\Pi(t)$  – theoretical  
 (graph obtained by the authors)

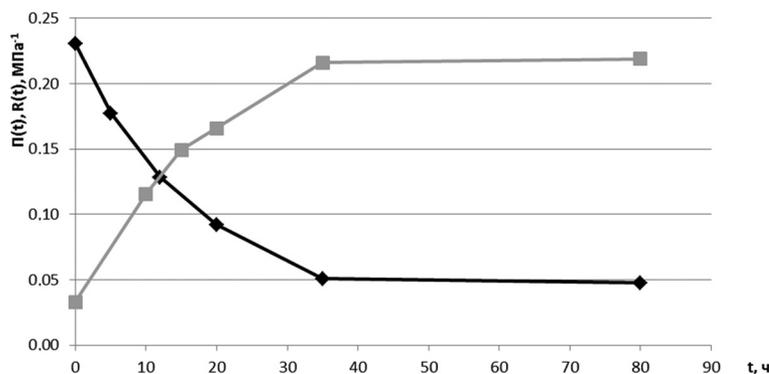


Рис. 4. Функции:  
 ●  $R(t)$  ползучести;  
 ■  $\Pi(t)$  релаксации  
 (график составлен авторами)  
 Fig. 4. Functions:  
 ●  $R(t)$  creep function;  
 ■  $\Pi(t)$  relaxation function  
 (graph obtained by the authors)

Как видно из рис. 4, функция релаксации является убывающей функцией, так как описывает падение напряжения во времени при постоянной деформации сжатия. Для оценки точности найденной аналитическим способом функции релаксации необходимо провести испытание образца грунта на релаксацию.

#### 4. Заключение

Функция ползучести мерзлого грунта получена на основе экспериментальных данных. С помощью функции ползучести и метода ломаных получена функция релаксации мерзлого грунта. При этом функцию релаксации предложено находить без постановки эксперимента на релаксацию образца.

Полученные механические характеристики грунта применимы в определенных расчетных моделях, например, при расчете деформированного состояния грунтового основания, нагруженного внешней нагрузкой [24].



**Вклад авторов.** Корешкова Е. В. – идея, написание статьи, научное редактирование статьи; Шушарин А. А. – обработка материала, численные расчеты; Хасанов Н. М. – консультирование, научное редактирование статьи.

**Author contributions.** Elena V. Koreshkova, conceptualization, writing, and scientific editing of the article; Alexander A. Shusharin, data processing and numerical calculations; Nurali M. Hasanov, consulting and scientific editing of the article.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Волохов С. С., Никитин И. Н., Лавров Д. С. Температурные деформации мерзлых грунтов при резком изменении температуры. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2017;2:66–71. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-2-66-71>
2. Болдырев Г. Г., Идрисов И. Х. Влияние циклического замораживания-оттаивания на прочность и деформируемость мерзлых грунтов: состояние вопроса. *Инженерная геология*. 2017;3:6–17.
3. Степанов М. А., Мальцева Т. В., Краев А. Н., Бартоломей Л. А., Караулов А. М. Устранение прогрессирующего развития неравномерности осадок многоэтажного жилого дома на ленточных свайных фундаментах. *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2017;9(4):62TVN417. Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/62TVN417.pdf>.
4. Enlong Liu, Yuanming Lai, Henry K. K. Wong, Jili Feng. An elastoplastic model for saturated freezing soils based on thermo-poromechanics. *International Journal of Plasticity*. 2018;107:246–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.04.007>
5. Chaochao Zhang, Dongwei Li, Changtai Luo, Zecheng Wang. Research on creep characteristics and the model of artificial frozen soil. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;4(1):1–15. <https://doi.org/10.1155/2022/2891673>
6. Hongsheng Li, Haitian Yang, Cheng Chang, Xiutang Sun. Experimental investigation on compressive strength of frozen soil versus strain rate. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2001;15(2):125–133. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2001\)15:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2001)15:2(125))
7. Chaochao Zhang, Dongwei Li, Changtai Luo, Zecheng Wang, Guanren Chen. Research on creep characteristics and the model of artificial frozen soil. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;2022:2891673. <https://doi.org/10.1155/2022/2891673>
8. Junhao Chen, Han Li, Lijin Lian, Gen Lu. Comparison of mechanical properties and sensitivity of compressive and flexural strength of artificial frozen sand. *Geofluids*. 2022;2022:6564345. <https://doi.org/10.1155/2022/7419030>
9. Ma Wei, Xiaoxiao Chang. Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground engineering. *Cold Regions Science and Technology*. 2002;34(1):11–17. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00042-8)

10. Вялов С. С. *Реология мерзлых грунтов*. Москва: Стройиздат; 2000. 464 с.
11. Sabri M. M., Shashkin K. G. Soil-structure interaction: theoretical research, in-situ observations, and practical applications. *Magazine of Civil Engineering*. 2023;120(4):12005. <https://doi.org/10.34910/MCE.120.5>
12. Anumita Mishra, Nihar Ranjan Patra. Analysis of creep settlement of pile groups in linear viscoelastic soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019;43(14):2288–2304. <https://doi.org/10.1002/nag.2976>
13. Jia-Cai Liu, Guo-Hui Lei, Xu-Dong Wang. One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2015;33(4):337–347. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.877109>
14. Wang Lei, De'An Sun, Peichao Li, Yi Xie. Semi-analytical solution for one-dimensional consolidation of fractional derivative viscoelastic saturated soils. *Computers and geotechnics*. 2017;83:30–39. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.020>
15. Мальцева Т. В., Набоков А. В., Воронцов В. В., Крижанивская Т. В., Минаева А. В. Расчет деформированного состояния вязкоупругого водонасыщенного основания. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2010;(4):94–99. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16339146>.
16. Бай В. Ф., Мальцева Т. В., Набоков А. В., Воронцов В. В., Минаева А. В. Теоретические предпосылки расчета песчаных армированных массивов в слабых глинистых грунтах. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2011;(1):102–106. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16452831>.
17. Melnikov R., Zazulya J., Stepanov M., Ashikhmin O., Maltseva T. OCR and POP parameters in plaxis-based numerical analysis of loaded over consolidated soils. In: *15<sup>th</sup> International scientific conference "Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development", Saint Petersburg, 12–15 September 2016. Procedia Engineering*. 2016;165:845–852. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783>
18. Мальцева Т. В., Трефилина Е. Р. Моделирование двухфазного тела с учетом несущей способности жидкой фазы. *Математическое моделирование*. 2004;16(11):47–57. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/links/02963cb37a6f60206e1b658877b13dbb/mm222.pdf>.
19. Jie Yuan, Yuexin Gan, Jian Chen, Songming Tan, Jitong Zhao. Experimental research on consolidation creep characteristics and microstructure evolution of soft soil. *Frontiers in Materials*. 2023;10:1137324. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1137324>
20. Мальцев Л. Е., Карпенко Ю. И. *Теория вязкоупругости для инженеров-строителей*. Тюмень: Вектор Бук; 1999. 240 с.
21. Колтунов М. А. *Ползучесть и релаксация*. Москва: Высшая школа; 1976. 278 с.
22. Гладков А. Е., Мальцева Т. В., Исакова Н. П. Методика определения механических характеристик вязкоупругих грунтов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2023;(4):26–33. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-4-26-33>
23. Безухов Н. М. *Основы теории упругости, пластичности и ползучести*. Москва: Высшая школа, 1968. 538 с.
24. Maltseva T. V., Trefilina E. R., Saltanova T. V. Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;(3):119–130. <https://doi.org/10.18720/MCE.95.11>

#### References

1. Volokhov S. S., Nikitin I. N., Lavrov D. S. Temperature deformation of frozen soils caused by rapid changes in temperature. *Moscow University Geology Bulletin*. 2017;72(3):224–229. <https://doi.org/10.3103/S0145875217030103>
2. Boldyrev G. G., Idrisov I. H. Influence of cyclic freezing-thawing on the strength and deformability of frozen soils: a state-of-the-art review. *Engineering Geology World*. 2017;3:6–17. (In Russ.)
3. Stepanov M. A., Maltseva T. V., Kraev A. N., Bartholomew L. A., Karaulov A. M. Elimination of the progressive development of uneven sedimentation of a multi-storey residential house on tape pile foundations. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"*. 2017;9(4):62TVN417. (In Russ.) Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/62TVN417.pdf>.
4. Enlong Liu, Yuanming Lai, Henry K. K. Wong, Jili Feng. An elastoplastic model for saturated freezing soils based on thermo-poromechanics. *International Journal of Plasticity*. 2018;107:246–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.04.007>.
5. Chaochao Zhang, Dongwei Li, Changtai Luo, Zecheng Wang. Research on creep characteristics and the model of artificial frozen soil. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;(4):1–15. <https://doi.org/10.1155/2022/2891673>

6. Hongsheng Li, Haitian Yang, Cheng Chang, Xiutang Sun. Experimental investigation on compressive strength of frozen soil versus strain rate. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2001;15(2):125–133. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2001\)15:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2001)15:2(125))
7. Chaochao Zhang, Dongwei Li, Changtai Luo, Zecheng Wang, Guanren Chen. Research on creep characteristics and the model of artificial frozen soil. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;2022:2891673. <https://doi.org/10.1155/2022/2891673>
8. Junhao Chen, Han Li, Lijin Lian, Gen Lu. Comparison of mechanical properties and sensitivity of compressive and flexural strength of artificial frozen sand. *Geofluids*. 2022;2022:6564345. <https://doi.org/10.1155/2022/7419030>
9. Ma Wei, Xiaoxiao Chang. Analyses of strength and deformation of an artificially frozen soil wall in underground engineering. *Cold Regions Science and Technology*. 2002;34(1):11–17. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00042-8)
10. Vyalov S. S. *Rheology of frozen soils*. Moscow: Stroyizdat; 2000. (In Russ.)
11. Sabri M. M., Shashkin K. G. Soil-structure interaction: theoretical research, in-situ observations, and practical applications. *Magazine of Civil Engineering*. 2023;120(4):12005. <https://doi.org/10.34910/MCE.120.5>
12. Anumita Mishra, Nihar Ranjan Patra. Analysis of creep settlement of pile groups in linear viscoelastic soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019;43(14):2288–2304. <https://doi.org/10.1002/nag.2976>
13. Jia-Cai Liu, Guo-Hui Lei, Xu-Dong Wang. One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2015;33(4):337–347. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.877109>
14. Wang Lei, De'An Sun, Peichao Li, Yi Xie. Semi-analytical solution for one-dimensional consolidation of fractional derivative viscoelastic saturated soils. *Computers and geotechnics*. 2017;83:30–39. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.020>
15. Maltseva T. V., Nabokov A. V., Vorontsov V. V., Krizhanivskaya T. V., Minaeva A. V. Viscoelastic water-saturated soil, residual pore pressure, two-phase elastic half-space. *Oil and Gas Studies*. 2010;(4):94–99. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16339146>.
16. Bai V. F., Maltseva T. V., Nabokov A. V., Vorontsov V. V., Minaeva A. V. Theoretical basis for calculating sand-reinforced masses in weak clay soils. *Oil and Gas Studies*. 2011;(1):102–106. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16452831>.
17. Melnikov R., Zazulya J., Stepanov M., Ashikhmin O., Maltseva T. OCR and POP parameters in plaxis-based numerical analysis of loaded over consolidated soils. In: *15<sup>th</sup> International scientific conference "Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development", Saint Petersburg, 12–15 September 2016. Procedia Engineering*. 2016;165:845–852. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783>
18. Maltseva T. V., Trefilina E. R. Modeling of the two-phase body with account of carrying abilities of the fluid phase. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2004;16(11):47–57. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/links/22401914519291b481f37248ea88830c/mm222.pdf>.
19. Jie Yuan, Yuexin Gan, Jian Chen, Songming Tan, Jitong Zhao. Experimental research on consolidation creep characteristics and microstructure evolution of soft soil. *Frontiers in Materials*. 2023;10:1137324. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1137324>
20. Maltsev L. E., Karpenko Yu. I. *Viscoelasticity theory for civil engineers*. Tyumen: Vector Buk; 1999. (In Russ.)
21. Koltunov M. A. *Creep and relaxation*. Moscow: Vysshaya shkola; 1976. (In Russ.)
22. Gladkov A. E., Maltseva T. V., Isakova N. P. Method for determining the mechanical characteristics of viscoelastic soils. *Architecture, Construction, Transport*. 2023;(4):26–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-4-26-33>
23. Bezukhov N. M. *Fundamentals of elasticity, plasticity, and creep theory*. Moscow: Vysshaya shkola; 1968. (In Russ.)
24. Maltseva T. V., Trefilina E. R., Saltanova T. V. Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;(3):119–130. <https://doi.org/10.18720/MCE.95.11>



#### Информация об авторах

**Корешкова Елена Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [koreshkovaev@tyuiu.ru](mailto:koreshkovaev@tyuiu.ru)  
**Шушарин Александр Андреевич**, инженер-исследователь, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [shusharinaa@tyuiu.ru](mailto:shusharinaa@tyuiu.ru)

**Хасанов Нурали Мамедович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой оснований, фундаментов и подземных сооружений, Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан

**Information about the authors**

**Elena V. Koreshkova**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Building Materials, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, koreshkovaev@tyuiu.ru

**Alexander A. Shusharin**, Research Engineer, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, shusharinaa@tyuiu.ru

**Nurali M. Hasanov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Bases, Foundations and Underground Structures, Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

*Получена 13 июня 2024 г., одобрена 10 сентября 2024 г., принята к публикации 23 сентября 2024 г.  
Received 13 June 2024, Approved 10 September 2024, Accepted for publication 23 September 2024*