

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 4. С. 280–291.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2025; 27 (4): 280–291.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

#### НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131.54:001.891.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291

EDN: WUXJGZ

### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ**

**Александр Дмитриевич Башарин, Владимир Сергеевич Чурилин,  
Алексей Владимирович Сухоруков, Мария Владимировна Бадина**  
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* В Указе Президента Российской Федерации № 309 от 7 мая 2024 г. «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г.» определены показатели для достижения национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни». Согласно документу, к 2030 г. доля автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям, должна составить: для дорог федерального значения и крупнейших городских агломераций – не менее 85 %; для опорной сети автомобильных дорог – не менее 85 %; региональных или муниципальных дорог – не менее 60 %. Однако для Западной Сибири существуют риски недостижения установленных показателей из-за недостаточного учета пучинистых свойств глинистых грунтов земляного полотна. Изменения в ГОСТ 28622–2012, внесенные в 2022 г., и появление новой приборной базы для оценки степени пучинистости грунтов обуславливают необходимость сопоставления результатов исследований, выполненных с применением различного оборудования.

**Цель исследования:** выполнить анализ результатов лабораторных испытаний степени пучинистости грунтов на установках различной конструкции для оценки целесообразности объединения их в единую генеральную совокупность.

**Методы исследования** включают сравнительные испытания на приборах различной конструкции, а также применение методов математической статистики для обработки и сопоставления полученных результатов.

**Результаты.** Выявлены существенные различия в результатах испытаний на установках ППГ1-М и ГТ 1.1.8. Показано, что объединение данных, полученных на разных установках, в единую генеральную совокупность для выявления новых связей и закономерностей нецелесообразно.

**Ключевые слова:** автомобильные дороги, морозное пучение грунтов, глинистый грунт, степень пучинистости

**Для цитирования:** Башарин А.Д., Чурилин В.С., Сухоруков А.В., Бадина М.В. Анализ результатов лабораторных испытаний морозного пучения грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 280–291. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291. EDN: WUXJGZ

ORIGINAL ARTICLE

## LABORATORY TESTS OF SOIL FROST HEAVING

Aleksandr D. Basharin, Vladimir S. Churilin,  
Aleksei V. Sukhorukov, Mariya V. Badina

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

**Abstract.** In Presidential Decree No. 309 of the Russian Federation, approved on 7 May 2024, “On the National Development Goals of the Russian Federation for the Period until 2030 and the Prospect until 2036”, the President decides to establish targets and objectives, the achievement of which must demonstrate the achievement of the comfortable and safe living environment. According to the document, by 2030 the share of roads that meet regulatory requirements should be at least 85 % for federal roads and major urban agglomerations, at least 85 % for the backbone road network, at least 60 % for regional or inter-municipal roads. However, for Western Siberia, there are risks of not achieving the established indicators due to insufficient consideration of heaving properties of subgrade soils. Changes to GOST 28622–2012 introduced in 2022 and the emergence of the new instrumentation base for assessing the degree of soil heaving necessitate a comparison of the results obtained by different equipment.

**Purpose:** The analysis of laboratory test results of soil heaving on installations of various design to assess the feasibility of combining them into a single general set.

**Methodology:** Comparative tests on devices of different design, methods of mathematical statistics for processing and comparing the obtained results.

**Research findings:** Significant differences in the test results obtained on different installations are demonstrated. It is shown that combining data obtained on different installations into a single general population to identify new relationships and patterns is inappropriate.

**Keywords:** automobile road, frost heaving, clay soil, soil swelling

**For citation:** Basharin A.D., Churilin V.S., Sukhorukov A.V., Badina M.V. Laboratory Tests of Soil Frost Heaving. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 280–291. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-280-291. EDN: WUXJGZ

Под морозным пучением понимают деформирование промерзающих увлажненных грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации поровой и мигрирующей воды с образованием кристаллов и линз льда<sup>1</sup>.

Морозное пучение грунтов определяется комплексным воздействием факторов, развитие которых вызвано геологическими, климатическими и гидрогеологическими условиями. К значимым факторам, определяющим интенсивность пучения грунта, относятся: гранулометрический, минералогический и химический состав, физико-механические характеристики, плотность, уровень залегания грунтовых вод в период промерзания, масса вышерасположенных слоев дорожной конструкции, температурные параметры, зависящие от зимних температур воздуха и теплоизоляционных свойств поверхности грунта<sup>2</sup>. Вопросы количественной оценки характеристик морозного пучения грунтов исследованы в работах таких ученых, как Ю.М. Васильев, И.А. Золотарь, В.О. Орлов,

<sup>1</sup> ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

<sup>2</sup> Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. Москва: Стройиздат, 1986. 72 с.

Н.А. Пузаков, Х.Р. Хакимов и др. [1]. В частности, согласно классификационной системе А. Касагранде [2], к категории морозоопасных грунтов относятся неоднородные грунты с содержанием фракций менее 0,02 мм свыше 3 % от общей массы и однородные грунты с долей частиц менее 0,02 мм более 10 % [2]. К данной категории, согласно этой классификации, могут быть отнесены пылеватые супеси, суглинки и пылеватые глины при близком залегании грунтовых вод. Однако классификация морозоопасности грунтов на основе их гранулометрического состава и показателей пластичности позволяет выявить лишь заведомо непучинистые или потенциально пучинистые грунты [3].

Недостаточный учет степени морозного пучения грунтов земляного полотна, а также несвоевременная реализация мероприятий, направленных на обеспечение морозоустойчивости дорожных конструкций, могут привести к снижению устойчивости земляного полотна, сокращению межремонтных сроков и ухудшению эксплуатационных характеристик автомобильных дорог [4]. Это, в свою очередь, вызывает возникновение незапланированных затрат финансовых ресурсов [5, 6]. Согласно исследованиям А.Я. Тулаева [7], истоки борьбы с деформациями грунтов на дорогах Российской империи приходится на конец первой половины XIX в., когда при отсыпке и устройстве «мостовых дорог» начали осуществлять простейшие конструктивные мероприятия. Несмотря на длительный период изучения процессов морозного пучения, данная проблематика сохраняет свою актуальность, и современные исследователи [8, 9, 10] продолжают проводить работы, направленные на прогнозирование и углубленное понимание поведения грунтов в условиях сезонного промерзания.

Для обеспечения межремонтных сроков автомобильных дорог, установленных в ГОСТ Р 58861–2020<sup>3</sup>, необходимо выполнить расчеты на морозоустойчивость дорожных конструкций в соответствии с требованиями ГОСТ Р 71404–2024<sup>4</sup> для районов сезонного промерзания грунтов.

Морозоустойчивость дорожных конструкций рассчитывается исходя из степени пучинистости грунта, которая оценивается согласно требованиям ГОСТ 25100–2020<sup>5</sup> на основе значения относительной деформации морозного пучения. Значение относительной деформации получают путем проведения испытаний с применением специализированных приборов, обеспечивающих вертикальное промораживание образцов исследуемого грунта в заданных температурных и влажностных условиях с возможностью внешнего массообмена под компрессией. При испытании измеряются вертикальные перемещения (деформации) поверхности образца в соответствии с ГОСТ 28622–2012<sup>6</sup>.

Лабораторные испытания для определения степени морозного пучения грунта впервые были обоснованы Ю.М. Васильевым в 1965 г. [11]. В исследовании [12] проведено сопоставление результатов испытаний пучинистых свойств

<sup>3</sup> ГОСТ Р 58861–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков. Москва: Стандартинформ, 2020. 20 с.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 71404–2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2024. 147 с.

<sup>5</sup> ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация (с Поправкой). Москва: Стандартинформ, 2020. 41 с.

<sup>6</sup> ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

грунта на приборах Ю.М. Васильева, ОСПГ и ППГ-1М. В результате сопоставительных испытаний выявлены незначительные расхождения в пучинистых свойствах грунта (отклонение составляет 3 %). Исходя из результатов испытаний М.В. Бадиной [12] в качестве первого прибора для проведения сопоставительных испытаний принят прибор ППГ-1М (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид и конструкция прибора ППГ-1М для определения степени пучинистости грунта по ГОСТ 28622–2012<sup>7</sup>

Fig. 1. General view and design of the PPG-1M device for soil heaving measurement according to GOST 28622–2012

Вторым прибором для проведения и сопоставления результатов определения степени пучинистости грунта принят прибор ГТ 1.1.12 (НПП «ГЕОТЕК», рис. 2), соответствующий ГОСТ 28622–2012<sup>8</sup> с изменениями 2022 г. В данном документе приложение со схемой установки степени морозного пучения переведено из рекомендуемого в обязательное, с контролем датчика температуры на нижнем торце образца.

В состав прибора ППГ-1М (рис. 1) входят следующие элементы: 1 – образец испытуемого грунта; 2 – обойма из поликарбоната; 3 – стакан с капиллярно-пористым материалом; 4 – устройство для подачи воды; 5 – индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; 6 – штамп; 7 – теплоизоляционный кожух из экструдированного пенополистирола; 8 – климатический ларь.

В состав прибора ГТ 1.1.8 НПП «ГЕОТЕК» входят следующие элементы: 1 – образец испытуемого грунта; 2 – обойма из поликарбоната; 3 – стакан с капиллярно-пористым материалом; 4 – S-образный датчик силоизмерительный; 5 – верхняя термоплита; 6 – нижняя термоплита; 7 – датчик линейных вертикальных перемещений; 8 – теплоизоляционный кожух из вспененного полиэтилена; 9 – датчик температуры; 10 – устройство для подачи воды; 11 – шкаф управления; 12 – климатическая камера.

<sup>7</sup> ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

<sup>8</sup> Там же.



Рис. 2. Общий вид и конструкция прибора ГТ 1.1.8 НПП «ГЕОТЕК» для определения степени пучинистости грунта по ГОСТ 28622–2012<sup>9</sup>

Fig. 2. General view and design of the GT 1.1.8 NPP "GEOTEK" for soil heaving measurement according to GOST 28622–2012

Для сопоставительных испытаний отобран грунт – пылеватый суглинок, характерный для земляного полотна автомобильных дорог Западно-Сибирского региона, согласно результатам исследований В.Н. Ефименко и С.В. Ефименко [13, 14]. Отбор проб грунта произведен из рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги в пос. Лоскутово Томской области с соблюдением требований ГОСТ 12071–2014<sup>10</sup>. Лабораторные исследования свойств грунта выполнены с соблюдением правил ГОСТ 33063–2014<sup>11</sup> и ГОСТ 30416–2020<sup>12</sup>. Параметры, характеризующие свойства исходного грунта, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

### Результаты лабораторных исследований свойств грунта

Table 1

#### Laboratory studies of soil properties

Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Влажность, д. ед.	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность сухого (скелета) грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Влажность на границе текучести $w_L$ , ед.	Влажность на границе раскатывания $w_p$ , ед.	Число пластичности $I_p$ , ед.	Показатель текучести $I_L$ , ед.
2,60	0,151	2,16	1,80	0,25	0,17	0,08	< 0

<sup>9</sup> ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

<sup>10</sup> ГОСТ 12071–2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Москва: Стандартинформ, 2019. 12 с.

<sup>11</sup> ГОСТ 33063–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Классификация типов местности и грунтов. Москва: Стандартинформ, 2016. 54 с.

<sup>12</sup> ГОСТ 30416–2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения (с Поправкой). Москва: ФГБУ «РСТ», 2021. 22 с.

Таблица 2

Гранулометрический состав грунта

Table 2

Grain size distribution

Размер фракции в мм; содержание, %					
0,5–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	< 0,005
13,36	9,97	18,32	41,20	7,37	9,78

Методом стандартного уплотнения, регламентированным ГОСТ 22733–2016, была определена оптимальная влажность для пылеватого суглинка, составившая 16,5 %, при которой достигается максимальная плотность сухого грунта. Для проведения одного испытания масса подготовленного грунта составляла 3565 г, высушенного до постоянной массы. Для достижения оптимальной влажности 16,5 % добавлялось рассчитанное количество воды – около 585 г (с учетом потери влаги при испарении). Вода вводилась в несколько этапов при непрерывном перемешивании грунта металлическим шпателем. После этого подготовленный грунт помещался в эксикатор и выдерживался не менее 12 ч (в данном случае 24 ч, рис. 3) с соблюдением требований ГОСТ 22733–2016<sup>13</sup>.



Рис. 3. Внешний вид увлажненного грунта суглинка пылеватого в эксикаторе  
Fig. 3. Moistened silty loam soil in a desiccator

По истечении 24 ч образец грунта нарушенного сложения готовился при оптимальной влажности методом послойного трамбования в обойме с соблюдением правил ГОСТ 22733–2016<sup>14</sup>. Подготовленный образец грунта помещался в испытательное оборудование на капиллярно-пористый материал, после чего устанавливались датчики вертикальных деформаций грунта и термодатчики в образец. Начальные показания измерительных устройств фиксировались с соблю-

<sup>13</sup> ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности (с Поправками). Москва: Стандартинформ, 2019. 15 с.

<sup>14</sup> Там же.

дением требований ГОСТ 28622–2012<sup>15</sup>. Термостатирование испытуемых образцов выполнялось в климатической камере при температурном режиме  $(1 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  в течение не менее 24 ч, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 28622–2012. После термостатирования включалось устройство для создания, поддержания и контроля заданных температурных условий промораживания образца грунта. На верхнем торце образца грунта температура задавалась минус  $(4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ , на нижнем – плюс  $(1 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ . Прибор ГТ 1.1.8 обеспечивал поддержание данной температуры за счет автоматизированного режима. В случае использования прибора ППГ-1М температура регулировалась через климатическую камеру при помощи циркуляционного термостата. Заданные температурные параметры на верхнем и нижнем торцах образца обеспечивали скорость перемещения фронта промерзания, аналогичную природным условиям. Испытание проводилось без притока влаги, имитируя глубокое залегание грунтовых вод.

Промораживание испытуемого образца грунта прекращалось при достижении  $0^\circ\text{C}$  на глубине  $2/3$  высоты образца. Прибор ГТ 1.1.8 автоматически завершал испытание при достижении заданной глубины промерзания. Для прибора ППГ-1М отсутствует возможность отслеживания глубины промерзания, поэтому испытание продолжалось до полного промораживания образца, что допускается ГОСТ 28622–2012<sup>16</sup>. После окончания испытания снимались показания вертикальной деформации с датчиков, образец грунта извлекался из обоймы, производилась фотофиксация и взвешивание образца (рис. 4, 5).

Затем образец грунта помещался в нагретый сушильный шкаф и высушивался до постоянной массы при температуре  $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ , после чего проводилось его взвешивание и определение влажности согласно ГОСТ 5180–2015<sup>17</sup>.

Испытания проводились на трех последовательных образцах исследуемого грунта. Относительная деформация морозного пучения образца грунта  $\varepsilon_{fn}$  вычислялась с точностью 0,01 по формуле

$$\varepsilon_{fn} = \frac{h_f}{d_i},$$

где  $h_f$  – вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм;  $d_i$  – толщина промерзшего слоя образца грунта за вычетом  $h_f$ , мм.

Результаты лабораторных испытаний грунта для определения степени морозного пучения приведены в табл. 3, а также построен график зависимости вертикальной деформации  $h_f$ , мм, от времени  $t$ , ч, для пылеватого суглинка на основе данных, полученных с прибора ГТ 1.1.8 (рис. 6).

Средняя относительная величина морозного пучения грунта по серии испытаний (табл. 3) на приборе ГТ 1.1.8 составила 0,018 д. е., на приборе ППГ-1М – 0,0099 д. е. Относительная погрешность между результатами испытаний

<sup>15</sup> ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

<sup>16</sup> Там же.

<sup>17</sup> ГОСТ 5180–2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик (с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2016. 23 с.

на приборах различной конструкции на морозное пучение грунта составила 45 %. Расчет погрешности проводится относительно «эталонного» значения, полученного на приборе ГТ 1.1.8, который соответствует новой редакции ГОСТ 28622–2012<sup>18</sup> с изменениями 2022 г.



Рис. 4. Общий вид образца грунта после промораживания на приборе ППГ-1М

Fig. 4. Soil sample after freezing on the PPG-1M device



Рис. 5. Общий вид образца грунта после окончания испытания на приборе ГТ 1.1.8 и высушивания до постоянной массы

Fig. 5. Soil sample after testing on the GT 1.1.8 device and drying to constant weight

Таблица 3

**Результаты лабораторных испытаний грунта на относительную деформацию морозного пучения**

Table 3

**Laboratory tests of soil relative strain by frost heaving**

Прибор	ГТ 1.1.8			ППГ-1М		
Номер испытания	1	2	3	1	2	3
Влажность, %	13	14	16,7	13	14	16,4
Вертикальная деформация образца грунта в конце испытания $h_f$ , мм	1,8	1,8	1,9	1,46	1,48	1,50
Толщина промерзшего слоя образца грунта за вычетом $h_f$ , $d_i$ , мм	100	100	100	150	150	150
Относительная деформация морозного пучения $\varepsilon_{fn} = \frac{h_f}{d_i}$	0,018	0,018	0,019	0,0098	0,0099	0,010
$\varepsilon_{fn_{cp}}$	0,018			0,0099		

<sup>18</sup> ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости (с Поправкой, с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2022. 15 с.

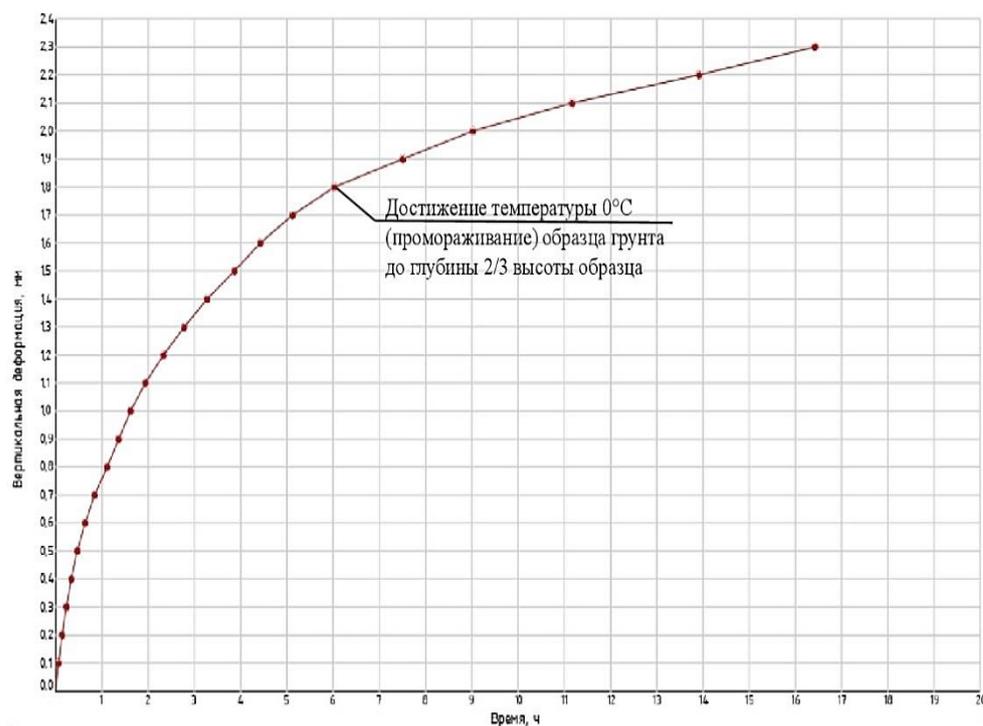


Рис. 6. График зависимости вертикальной деформации от времени на приборе ГТ 1.1.8  
 Fig. 6. Time dependence of vertical strain obtained by the GT 1.1.8 device

Общий вид зависимости (рис. 6) вертикальной деформации морозного пучения грунта от времени, полученной на приборе ГТ 1.1.8, качественно совпадает с результатами исследования R.J. Kettle и R.I.T. Williams [15], которые также анализировали различия в значениях величины морозного пучения грунта, полученных на приборах различных конструкций.

#### Выводы

В ходе выполненной работы были проведены лабораторные испытания по определению величины морозного пучения грунта без притока влаги на приборах конструкции ППГ-1М и ГТ 1.1.8. Установлены существенные различия в результатах: относительная погрешность по средним значениям серии испытаний (3 образца) составила 45 %.

Следовательно, объединять результаты испытаний, выполненных ранее на приборе ППГ-1М, с результатами прибора ГТ 1.1.8 в единую генеральную совокупность для выявления новых связей и закономерностей нецелесообразно. Значительные отличия в величине относительной деформации морозного пучения грунта могут быть обусловлены различиями в режимах промерзания образцов, что было отмечено ранее в исследовании [15]. Поэтому при исследовании величины относительной деформации морозного пучения грунта на приборах различной конструкции необходимо уделять особое внимание контролю температурного градиента и режиму промерзания образцов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1977. 184 с.
2. Casagrande A. Discussion of Frost Heaving // Highway Research Board Proceedings. 1931. V. 11. P. 168–172.
3. Невзоров А.Л., Болдырев Г.Г., Скопинцев Д.Г. Определение деформаций морозного пучения грунтов в лабораторных условиях // Геотехника. 2014. № 3. С. 26–31. EDN: TCYVZD
4. Afridi M.A., Erlingsson, S., Sjögren, L. Municipal street maintenance challenges and management practices in Sweden. *Frontiers in Built Environment*. 2023. V. 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1205235. EDN: LTNTPE
5. Фурман Б.В., Ярмолинский А.И. Причины и способы борьбы с морозным пучением на автомобильных дорогах // Материалы 57-й студенческой научно-технической конференции инженерно-строительного института ТОГУ, Хабаровск, 17–27 апреля 2017 г. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2017. С. 323–329. EDN: YTFGHD
6. Чурилин В.С., Базуев В.П., Бадина М.В. Некоторые результаты испытания пучинистых свойств глинистых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6 (47). С. 191–196. EDN: TBZJNH
7. Тулаев А.Я. Обзор литературных работ, посвященных изучению пучин и мерам борьбы с ними, опубликованных до 1938 года // ДорНИИ, Исследование пучин на автомобильных дорогах : сб. научных трудов. Вып. 11. Москва : Дориздат, 1941. С. 13–86.
8. Zhou S., Zhou C., Sun Y., et al. Predicting mechanical properties of freeze-thaw clay under varying compaction levels and confining pressures utilizing GA-BP network and machine learning-aided Duncan-Chang constitutive model // *Environ Earth Sci*. 2025. № 84. P. 331. DOI: 10.1007/s12665-025-12346-6
9. Sun Y., Meng S., Wang M., et al. Deterioration effect of freeze-thaw on mechanical properties of roadbed clay under unfavorable conditions // *Bull. Eng. Geol. Environ*. 2021. № 80. P. 4773–4790. DOI: 10.1007/s10064-021-02203-8. EDN: PXLBUJ
10. Isakov A., Bukhov S. Estimation of the Height of Frost Heaving of Clayey Soil of the Subgrade in a Closed System of Freezing // *International Journal of Geomechanics*. 2023. V. 23. № 7. P. 04023096. DOI: 10.1061/JGNAI.GMENG-7710. EDN: GPXCPS
11. Васильев Ю.М. Расчет морозозащитных слоев дорожных одежд городских дорог. Ленинград : Автотрансиздат, 1965. 111 с.
12. Бадина М.В. Лабораторные исследования величины морозного пучения грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 3 (24). С. 150–156. EDN: KXDSWD
13. Ефименко В.Н. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог при глубоком промерзании грунтов (На примере Юго-Востока Западной Сибири) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ефименко Владимир Николаевич. Москва, 1978. 216 с.
14. Ефименко С.В. Развитие теоретических положений учета особенностей признаков геокмплекса при формировании региональных норм проектирования автомобильных дорог : специальность 05.23.11 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ефименко Сергей Владимирович. Новосибирск, 2016. 462 с. EDN: QOZNVU
15. Kettle M.R.J., Williams R.I.T. Frost heave testing // *Matériaux et Constructions*. 1976. V. 9 (4). P. 310.

REFERENCES

1. Orlov V.O., Dubnov Yu.D., Merenkov N.D. Swelling of Freezing Soils and its Influence on Foundations. Leningrad: Stroyizdat, 1977. 184 p. (In Russian)
2. Casagrande A. Discussion of Frost Heaving. *Highway Research Board Proceedings*. 1931; 11: 168–172.
3. Nevzorov A.L., Boldyrev G.G., Skopincev D.G. Determination of Frost Heave Deformations of Soils in Laboratory Conditions. *Geotekhnika*. 2014; (3): 26–31. EDN: TCYVZD (In Russian)

4. Afridi M.A., Erlingsson S., Sjögren L. Municipal Street Maintenance Challenges and Management Practices in Sweden. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9-2023. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1205235
5. Furman B.V., Yarmolinskii A.I. Causes and Methods of Combating Frost Heaving on Highways. In: *Proc. 57th Sci. Conf. of Students*, 17–27 April. Habarovsk, 2017. Pp. 323–329. (In Russian)
6. Churilin V.S., Bazuev V.P., Badina M.V. Test Results of Clayey Soil Heaving Properties. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014; (6): 191–196. (In Russian)
7. Tulaev A.Ya. Literature Review of Sloughs and Slough Control Measures Published Before 1938. In: *Proc. DorNI, Issledovanie puchin na avtomobilnyh dorogah*, Moscow: Dorizdat, 1941, Pp. 13–86. (In Russian)
8. Zhou S., Zhou C., Sun Y., et al. Predicting Mechanical Properties of Freeze-Thaw Clay under Varying Compaction Levels and Confining Pressures Utilizing GA-BP Network and Machine Learning-Aided Duncan-Chang Constitutive Model. *Environmental Earth Sciences*. 2025; 84: 331. DOI: 10.1007/s12665-025-12346-6
9. Sun Y., Meng S., Wang M., et al. Deterioration Effect of Freeze-Thaw on Mechanical Properties of Roadbed Clay under Unfavorable Conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021; 80: 4773–4790. DOI: 10.1007/s10064-021-02203-8
10. Isakov A., Bukhov S. Estimation of the Height of Frost Heaving of Clayey Soil of the Subgrade in a Closed System of Freezing. *International Journal of Geomechanics*. 2023; 23 (7): 04023096. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-7710
11. Vasilev Yu.M. Calculation of Frost Protection Layers of Urban Road Pavements. Leningrad: Avtotransizdat, 1965. 111 p. (In Russian)
12. Badina M.V. Laboratory Studies of Soil Frost Heaving. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009; 3 (24): 150–156. (In Russian)
13. Efimenko V.N. “Water-heat regime of motorway subgrade at deep freezing of soils (on the example of South-East of Western Siberia)”. PhD Thesis. Moscow, 1978. 216 p. (In Russian)
14. Efimenko S.V. “Development of theoretical provisions for taking into account the features of geocomplex attributes in the formation of regional norms of motorway design”. DSc Thesis. Novosibirsk, 2016. 462 p. (In Russian)
15. Kettle M.R.J., Williams R.I.T. Frost Heave Testing. *Matériaux et Constructions*. 1976; 9 (4): 310.

#### Сведения об авторах

Башарин Александр Дмитриевич, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, basharin.2001@inbox.ru

Чурилин Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lex-16-2008@mail.ru

Сухоруков Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, av\_suhar@mail.ru

Бадина Мария Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, mvbadina@yandex.ru

#### Authors Details

Aleksandr D. Basharin, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, basharin.2001@inbox.ru

Vladimir S. Churilin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lex-16-2008@mail.ru

Aleksei V. Sukhorukov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, av\_suhar@mail.ru

Mariya V. Badina, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mvbadina@yandex.ru

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.06.2025  
Одобрена после рецензирования 30.06.2025  
Принята к публикации 01.07.2025

Submitted for publication 20.06.2025  
Approved after review 30.06.2025  
Accepted for publication 01.07.2025