

УДК 551.343.72(571.54/.55)

ОЦЕНКА ПУЧИНИСТОСТИ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ С СУГЛИНИСТЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ (Забайкальский край)

Баландин О. А.¹, Пешков Н. В.¹, Соколова О. В.¹, Соколова В. С.²

¹ФГБОУ Забайкальский институт железнодорожного транспорта –
филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита

²ФГБОУ Забайкальский государственный университет, г. Чита

E-mail: sokolova.olga1963@mail.ru

Крупнообломочные грунты являются надежным основанием. Однако при наличии суглинистого заполнителя в них развиваются криогенные процессы, отрицательно влияющие на функционирование инженерных сооружений. Цель исследования – оценка пучиноопасности крупнообломочных грунтов с различным процентным содержанием суглинистого заполнителя. На территории Забайкальского края были проведены полевые испытания таких грунтов. В результате для них были определены оптимальные условия пучения и составлена статистическая модель для оценки их пучиноопасности.

Ключевые слова: морозное пучение, крупнообломочный грунт, суглинистый заполнитель, сезонное промерзание, деформация, скорость промерзания.

DOI: 10.34078/1814-0998-2022-3-56-62

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы, связанные с морозным пучением грунтов, широко распространены в странах, где климатические условия вызывают сезонное промерзание деятельного слоя.

Правительства этих стран ежегодно тратят значительные финансовые средства на профилактику и ликвидацию повреждений различных инженерных сооружений и транспортных коммуникаций, возникающих при сезонном промерзании и оттаивании грунтов (Zhang, Michalowski, 2015; Zhang и др., 2018). Помимо этого, в нашей стране геокриологические исследования включены в перечень приоритетных направлений исследований Российской академии наук (Шестернев, Шестернев, 2007). Процессы, связанные с сезонным промерзанием грунтов в Забайкалье, рассматривали М. И. Сумгин (1937), Н. А. Шполянская (1978) и другие (Орлов и др., 1987). Своевременная оценка пучиноопасности грунтов позволяет значительно снизить затраты при эксплуатации зданий и сооружений, возводимых в регионах с сезонным промерзанием и оттаиванием грунтов. Исследуя причины пучинистости грунтов, И. А. Кулабухова и Б. М. Черепанов (2016) отмечают, что для развития деформаций пучения в основном достаточно наличия пучиноопасно-

го грунта отрицательной температуры и определенной влажности. А. В. Леонова, О. В. Казанцева (2015) подчеркивают важность максимального обезвоживания грунтов для понижения их пучиноопасности. Опыт строительства и эксплуатации зданий и сооружений на крупнообломочных грунтах, широко распространенных на территории Забайкальского края, подтверждает их пучиноопасность, которая до сих пор недостаточно изучена. Интенсивное освоение территорий, связанное со строительством второй ветки БАМа и сопутствующих горнотехнических, промышленно-гражданских и линейных сооружений, обуславливает актуальность исследования процессов, происходящих в крупнообломочных грунтах при их промерзании, и оценку пучиноопасности этих грунтов, что и является целью данной работы. Экспериментальные исследования проводились на территории г. Чита Забайкальского края (рис. 1).

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИСПЫТАНИЙ

Территория Забайкалья относится к горному поясу Южной Сибири и имеет складчатое строение. Поэтому здесь широко распространены крупнообломочные грунты с различным процентным содержанием тонкодисперсной составляющей. Геокриологическая обстановка края очень разнообразна.



Рис. 1. Район исследований – г. Чита Забайкальского края

Fig. 1. Research area, city of Chita, Zabaikalsky Krai

Особенностью климата Забайкалья является контрастность определяющих его факторов, к которым относятся большая продолжительность солнечного сияния и большое поступление солнечной энергии в сочетании с более низкой температурой воздуха. Резкие различия в климате между долинами и котловинами, с одной стороны, и горными хребтами – с другой; господство в течение года сибирского антициклона и резкая смена синоптической ситуации, обусловленной атмосферной циркуляцией по сезонам, определяют наибольшую суровость зимней погоды и большие суточные и годовые перепады температуры воздуха.

Зима длительная морозная и малоснежная, с устойчивой ясной сухой погодой, со слабыми ветрами преимущественно восточного направления (табл. 1). Для нее характерны затишья, сильные морозы, резкие перепады температуры в течение суток. Малая скорость ветра, сухой

и прозрачный воздух, большая продолжительность инсоляции дают возможность переносить суровые климатические условия в основном относительно легко. Относительная влажность воздуха холодного периода года составляет 76 %. Средняя скорость ветра – 1.6 м/с. Средняя температура января $-25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зимние температуры складываются под влиянием сибирского антициклона.

В Забайкальском крае начало сезонного промерзания грунта приходится на середину октября. Средняя годовая температура воздуха на территории края согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» изменяется от -0.8 до $-8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. В это время на поверхности земли образуется устойчивая корка мерзлого грунта, которая не оттаивает полностью днем при попадании прямых солнечных лучей и на нижней поверхности имеет четко выраженный рисунок кристаллов льда. К концу октября толщина мерз-

Таблица 1. Основные климатические параметры холодного периода в г. Чита

Table 1. Basic climatic parameters of the cold period in the city of Chita

№ п/п	Показатель	Значение
1	Климатические параметры холодного периода	
	Средняя температура воздуха обеспеченностью 0.92: наиболее холодных суток	$-39\text{ }^{\circ}\text{C}$
	наиболее холодной пятидневки	$-37\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Средняя температура воздуха обеспеченностью 0.98: наиболее холодных суток	$-41\text{ }^{\circ}\text{C}$
	наиболее холодной пятидневки	$-39\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	Абсолютная минимальная температура воздуха	$-47\text{ }^{\circ}\text{C}$
3	Средняя суточная амплитуда температуры наиболее холодного месяца	$13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
4	Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца	76 %
5	Преобладающее направление ветра за декабрь – февраль	Восточное

лого грунта увеличивается, мерзлый слой грунта набирает прочность, и в начале ноября его толщина может составлять 30–50 см в зависимости от среднемесячной температуры двух первых месяцев холодного периода. Холодный период продолжается 6–7 мес. За это время грунт может промерзнуть до 2.5–5 м в большинстве районов края, при этом скорость промерзания может составлять от 1 до 5 см/сут.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Испытания проводили на крупнообломочном грунте с суглинистым заполнителем, в качестве крупной фракции использовали щебень фракции 100–60 мм со средней плотностью 2.3 г/см³ и влажностью в пределах от 1 до 3.5%, а в качестве заполнителя – суглинки, содержащие каолиновые глинистые частицы.

Применяли экспериментальные полевые методы, а для обработки результатов – методы анализа.

Для проведения полевых испытаний авторы статьи оборудовали стационарную экспериментальную площадку для многолетнего изучения поведения и характеристик крупнообломочных грунтов при промерзании и оттаивании. На площадке размещена установка для полевых исследований пучинистых свойств крупнообломочных грунтов с любыми видами заполнителя (рис. 2). Установка рассчитана на одновременное испытание 5–10 образцов грунта различного состава.

В начале холодного периода в обоймы установки закладывается испытуемый грунт. Для этого обоймы монтируются соосно с заполне-

нием зазоров смазкой. Диаметр обойм превышает размер наибольших частиц грунта в 10–15 раз. Во внутреннюю обойму помещается грунт, на поверхности грунта располагают жесткий штамп. Между штампом и балкой закрепляют силоизмерительные динамометры и устанавливают индикаторы часового типа ИЧ-50. Обоймы с перфорированным дном зафиксированы в емкости с водой для возможности моделирования открытой системы. Уровень воды в емкости контролируется через специально предназначенную трубу, защищенную утепленным коробом. С начала холодного периода проводятся систематические замеры температуры грунта и снятие показаний индикаторов и динамометров.

Наблюдения, проводимые авторами статьи на опытной площадке г. Чита в течение нескольких лет, т. е. холодных периодов с 2016 по 2021 г., показали, что в рассматриваемые периоды среднемесячная температура воздуха незначительно отклонялась от значений, указанных в нормативных источниках. Необходимо отметить, что среднемесячная температура воздуха в зимний период 2018/19 г. была выше значений, приведенных в строительной климатологии, что характеризует этот период как более теплый.

Авторов статьи интересовали особенности распространения фронта отрицательных температур в идентичных условиях в крупнообломочных грунтах с различным содержанием суглинистого заполнителя, поэтому обоймы установки были заполнены крупнообломочным грунтом с 10-, 20-, 30- и 40 %-ным содержанием суглинистого заполнителя.

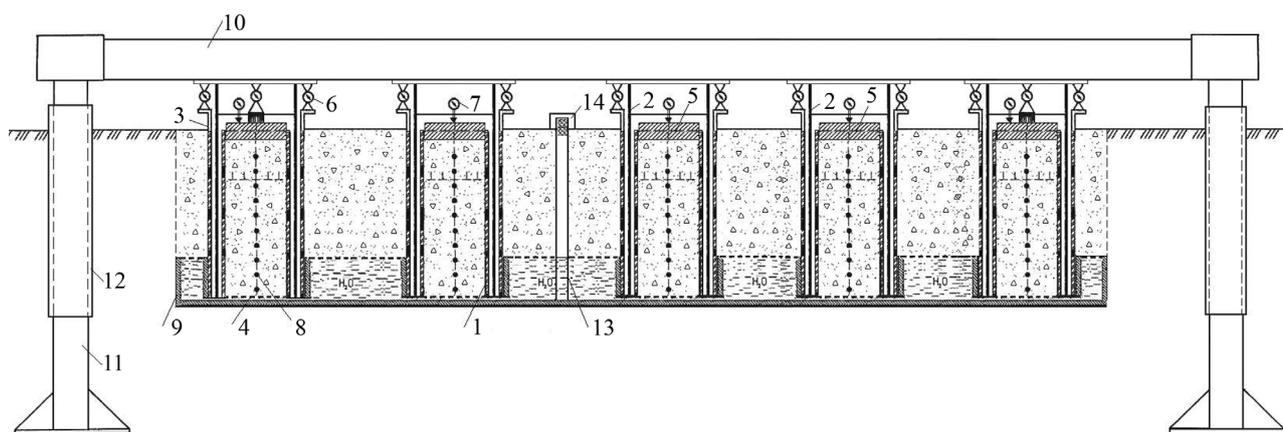


Рис. 2. Установка для полевых исследований пучиноопасности крупнообломочных грунтов с любыми видами заполнителя: 1, 2, 3 – соответственно внутренняя, средняя и наружная жесткие полиэтиленовые обоймы; 4 – перфорированное дно; 5 – жесткий штамп; 6 – силоизмерительные динамометры; 7 – индикаторы часового типа ИЧ-50; 8 – температурные датчики; 9 – водяная емкость; 10 – упор; 11 – анкер; 12 – защитная труба; 13 – отдельная труба для контроля уровня воды; 14 – утепленный короб

Fig. 2. Installation for field studies of coarse soils heaving with any type of aggregate: 1, 2, 3 – inner, medium, and outer rigid polyethylene cages, respectively; 4 – perforated bottom; 5 – rigid die; 6 – force-measuring dynamometers; 7 – clock-type indicators ICh-50; 8 – temperature sensors; 9 – water reservoir; 10 – stop; 11 – anchor; 12 – protective pipe; 13 – separate pipe for water level control; 14 – insulated box

Грунт образцов промерзал постепенно, началом процесса промерзания можно считать вторую половину октября. И хотя температура октября 2018 г. была необычно высокой, к началу ноября температура воздуха устойчиво переходила в область отрицательных значений, и поэтому в течение дневного периода не происходило оттаивания мерзлой корки грунта. К середине ноября фронт отрицательных температур продвигался до глубины 1.0 м. Грунт охлаждался послойно, причем в первые три месяца зимнего периода наиболее интенсивно. Последующее промерзание происходило более медленно. Зона отрицательных температур распространялась до глубины 2.4 м, ниже располагалась зона изменяющихся положительных температур. В более глубоких слоях температура стабилизировалась. Такое распределение температуры объясняется односторонним постепенным охлаждением грунтов с поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате полевых исследований были получены зависимости относительной деформации пучения крупнообломочного грунта с различным содержанием суглинка от скорости промерзания. Содержание суглинка в грунтовых смесях составляло 10, 20, 30 и 40 %. Усредненные значения полученных величин приведены в табл. 2.

Было установлено, что процесс морозного пучения крупнообломочного грунта с 40 % суглинка более интенсивно протекает при скорости промерзания в интервале от 2.0 до 2.2 см/сут (рис. 3, а), при 30 % суглинка – в интервале от 1.8 до 2.2 см/сут (рис. 3, б), при 20 % суглинка – в интервале от 1.66 до 2.1 см/сут, при 10 % суглинка – в интервале от 1.67 до 2.1 см/сут. При скорости промерзания в пределах от 1.8 до 2.2 см/сут крупнообломочный грунт с содержанием суглинистого заполнителя от 25 до 40 % перешел в

категорию среднепучинистого грунта с содержанием суглинистого заполнителя от 40 до 43 % перешел в категорию сильнопучинистого грунта, а при процентном содержании заполнителя более 43 стал чрезмерно пучинистым (рис. 4).

Д. М. Шестернев и Д. Д. Шестернев (2007) отмечают, что процесс морозного пучения максимально проявляется для глинистых грунтов при скорости промерзания от 2.40 до 3.12 см/сут при $\text{grad } h_t = 10\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$. Максимальное пучение крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем было зафиксировано при $\text{grad } h_t$ от 3.3 до 10.0 $^\circ\text{C}/\text{м}$ и при более низких значениях скорости промерзания, чем указано выше. Понижение указанных значений происходит за счет наличия крупнообломочных частиц и их влияния на льдовыделение и формирование миграционного потока.

Результаты исследований показывают, что влияние содержания суглинка на пучиноопасность крупнообломочных грунтов следует рассматривать как комплексный процесс, зависящий от ряда факторов, например, таких как динамика промерзания грунтов в течение холодного периода, градиенты температур и предзимняя влажность.

X. Long и др. (2018) упоминают, что глубина промерзания грунта зависит от начальной влажности, скорости продвижения фронта промерзания, теплопроводности и температуры охлаждения. Они предлагают контролировать содержание глины в грунтовом основании ниже 15 %, чтобы уменьшить деформацию пучения гравийного грунта.

J. Gao с соавторами (2018), испытывая крупнообломочные грунты с различным содержанием глинистого лесса, подчеркивают, что на величину морозного пучения крупнообломочного грунта существенно влияет содержание мелких частиц, а коэффициент морозного пучения грунта линейно возрастает с увеличением их содержания.

Таблица 2. Экспериментальные результаты влияния скорости промерзания грунта на деформацию морозного пучения

Table 2. Experimental results of the soil freezing rate effect on the amount of frost heave deformation

Заполнитель	Содержание КОЧ	Скорость промерзания грунта								
		1.5			2			2.5		
		Δh , см	ε , д. е.	Степень пучинистости	Δh , см	ε , д. е.	Степень пучинистости	Δh , см	ε , д. е.	Степень пучинистости
Суглинок	0.6	0.89	0.059	Средне	1.14	0.078	Сильно	0.96	0.064	Средне
	0.7	0.27	0.018	Слабо	0.42	0.028	Средне	0.24	0.016	Средне
	0.8	0.23	0.015	Слабо	0.255	0.017	Слабо	0.21	0.014	Слабо
	0.9	0.18	0.012	Слабо	0.195	0.013	Слабо	0.135	0.009	Слабо

Примечание. КОЧ – крупнообломочные частицы, Δh – абсолютная деформация пучения, ε – относительная деформация пучения.

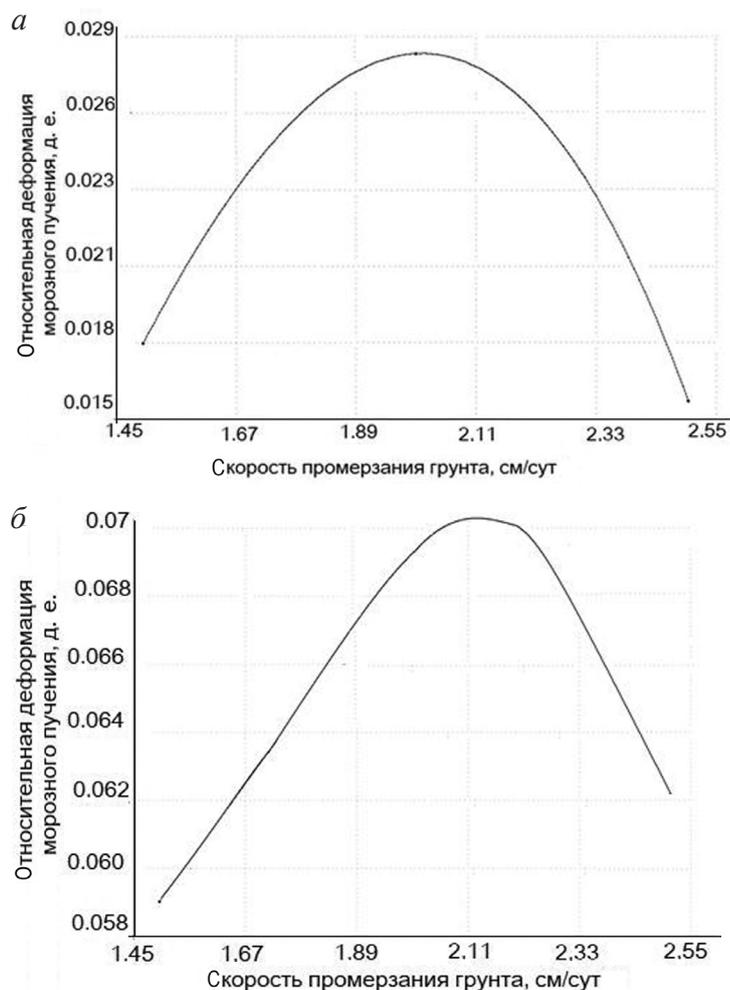
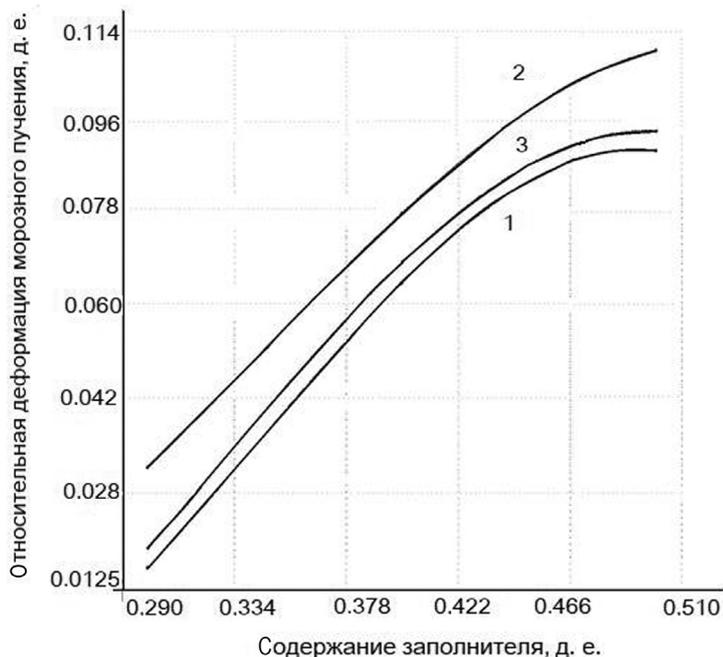


Рис. 3. Зависимость относительной деформации пучения крупнообломочного грунта с 30 % (а) и 40 % (б) суглинки от скорости промерзания грунта

Fig. 3. Dependence of the relative heave deformation of coarse soil with 30 % (a) and 40 % (б) sand-clay aggregate on the ground freezing rate



Однако при испытании крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем была получена нелинейная зависимость (см. рис. 4). Относительно линейные зависимости просматриваются на участках графиков с содержанием суглинка приблизительно до полного заполнения межобломочного пространства, но при большем его содержании зависимость не является линейной.

Проведенные исследования показали, что от процентного содержания суглинистого заполнителя зависит не только величина пучения, но и глубина промерзания грунта за холодный период. Так, в условиях Забайкалья на исследуемых грунтах в течение пяти холодных периодов с 2016 по 2021 г. было установлено, что глубина промерзания грунтов с 10 % суглинистого заполнителя была больше глубины промерзания грунтов с 40 % заполнителя, при этом разница при промерзании в идентичных условиях составляла около 0.5 м.

Полученные результаты по изучению температурно-влажностного режима промерзания грунтов в природных условиях положены в основу методов математического моделирования для сезоннопромерзающих грунтов (Рыскелды, Ашенова, 2018), что позволяет прогнозировать влияние условий промерзания на пучение.

По результатам обработки экспериментальных исследований пучения на образцах крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем мы составили статистическую модель для оценки значений относительного пучения грунтов:

Рис. 4. Изменение относительной деформации пучения в зависимости от содержания суглинистого заполнителя при скорости промерзания грунта 1.8–2.2 см/сут. Влияние скорости промерзания на деформацию морозного пучения крупнообломочного грунта с суглинистым заполнителем при скорости промерзания 1.5 см/сут (1), 2.0 см/сут (2) и 2.5 см/сут (3)

Fig. 4. Change of the relative heave deformation depending on the content of the sand-clay aggregate at the ground freezing rate of 1.8–2.2 cm/day. Influence of the freezing rate on the heave deformation of coarse soil with sand-clay aggregate at the freezing rate of 1.5 cm/day (1), 2.0 cm/day (2) and 2.5 cm/day (3)

Таблица 3. Статистическая модель для оценки значений относительного пучения крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем в зависимости от скорости промерзания v , см/сут

Table 3. Statistical model for evaluating relative heave of coarse soils with sand-clay aggregate depending on the freezing rate v , cm/day

Тип заполни- теля	Содержание КОЧ	Коэффициент аппроксимации для статистической модели и ее характеристики					
		A	B	C	D	r	s
Суглинок	0.6	-0.07	0.16	-0.06	0.007	0.83	0.006
	0.7	-0.30	0.42	-0.17	0.021	0.90	0.003
	0.8	-0.03	0.01	0.01	0.001	0.92	0.004
	0.9	-0.01	0.03	-0.04	0.001	0.91	0.003

Примечание. v – скорость промерзания; КОЧ – крупнообломочные частицы, д. ед.; r – коэффициент корреляции, д. ед.; s – погрешность аппроксимации, д. ед.

$$\varepsilon = A + Bv + Cv^2 + Dv^3,$$

где A, B, C, D – коэффициенты аппроксимации, приведенные в табл. 3; v – скорость промерзания, см/сут.

Разработанная статистическая модель позволяет определить степень пучинистости крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем при известном процентном содержании заполнителя и различной скорости промерзания грунтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крупнообломочные грунты широко распространены на территории России и в частности на территории Забайкальского края. Являясь надежным основанием по восприятию внешних нагрузок, они, тем не менее, могут быть подвержены значительным деформациям морозного пучения, которые можно спрогнозировать и предотвратить, если провести своевременную и достоверную оценку пучиноопасности грунтов при проектировании и эксплуатации различных объектов капитального строительства. Например, практически значимой данная оценка в настоящее время является при строительстве второй ветки БАМа.

Морозное пучение крупнообломочных грунтов определяется их составом, строением, свойствами и условиями промерзания. В результате исследований, проведенных на экспериментальной площадке, мы разработали статистическую модель для оценки пучиноопасности крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем в зависимости от скорости промерзания и процентного содержания заполнителя.

На основании результатов, полученных в натурных условиях, можно сделать следующие выводы:

1) крупнообломочные грунты с суглинистым заполнителем являются пучиноопасными, при этом интенсивность пучения зависит от пред-

зимней влажности, температурного режима промерзания и процентного содержания заполнителя;

2) крупнообломочный грунт с суглинистым заполнителем при $\text{grad } h_t$ от 3.3 до 10.0 °C/м и при скорости промерзания $v = 1.8\text{--}2.2$ см/сут соответствовал наибольшей пучиноопасности;

3) разработанная статистическая модель имеет практическую значимость для оценки пучиноопасности крупнообломочных грунтов с суглинистым заполнителем и обоснованно отражает зависимость величины пучения от скорости промерзания и процентного содержания суглинка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность рецензентам за указанные замечания и рекомендации.

ЛИТЕРАТУРА

Кулабужова И. А., Черепанов Б. М. Исследование причин пучинистости грунтов с анализом проведенных исследований // Ползуновский альманах. 2016. № 3. С. 110–113.

Леонова А. В., Казанцева О. В. Оценка степени пучинистости грунтов территории строительства ЛЭП // Роговские чтения: проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии урбанизированных территорий. 2015. С. 183–187.

Орлов В. О., Ёлгин Б. Б., Железняк И. И. Морозное пучение грунтов в расчетах оснований сооружений. Новосибирск: Наука, 1987. 136 с.

Рыскелды М., Ашенова Ш. Применение методов прикладного математического моделирования в вопросах геологии и строительства // Инновационные технологии в медиаобразовании. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, 2018. С. 166–173.

Сумгин М. И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1937. 379 с.

Шестернев Д. М., Шестернев Д. Д. Пучение крупнообломочных пород Читино-Ингодинской впадины

в связи с потеплением климата // Криосфера Земли. 2007. Т. 11, № 4. С. 80–92.

Шполянская Н. А. Вечная мерзлота Забайкалья. Москва : Наука, 1978. 132 с.

Gao J., Lai Y., Zhang M., Feng Z. Experimental study on the Water-Heat-Vapor behavior in a freezing coarse-grained soil // Applied Thermal Engineering. 2018. No. 128. P. 956–965.

Long X., Cen G., Cai L., Chen Y. Experimental research on frost heave characteristics of gravel soil and multifactor regression prediction // Hindawi Advances in Materials Science and Engineering. 2018. 13 p.

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.

Поступила после доработки 02.05.2022 г.

Zhang Y., Michalowski R.L. Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2015. No. 141 (7). P. 04015027.

Zhang Y., Xiong L., Liu L. A Comparison of Soil Improvement Techniques for Frost Heave Mitigation // International Congress and Exhibition “Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geo Technology” Geo M East 2018: Latest Thoughts on Ground Improvement Techniques. Springer, Cham., 2018. P. 193–203.

ASSESSMENT OF HEAVINESS OF COARSE SOILS WITH SAND-CLAY AGGREGATE (Zabaikalsky Krai)

O. A. Balandin¹, N. V. Peshkov¹, O. V. Sokolova¹, V. S. Sokolova²

¹Zabaikalsky Institute of Railway Transport (Branch of Irkutsk State Transport University), Chita

²Transbaikalian State University, Chita

Coarse soils are reliable foundations. However, in the presence of sand-clay aggregate cryogenic processes develop in them, which has a negative impact on engineering structures functioning. The research aims in assessing the heaving hazard of coarse soils with different percentages of the sand-clay aggregate. Such soils were field-tested in Zabaikalsky Krai. As a result, the optimum conditions of cryogenic frost heave were determined for them and a statistical model was compiled to assess their heaving hazard.

Keywords: frost heaving, coarse soil, sand-clay aggregate, seasonal freezing, deformation, freezing rate.

REFERENCES

Gao, J., Lai, Y., Zhang, M., Feng, Z., 2018. Experimental Study on the Water-Heat-Vapor Behavior in a Freezing Coarse-grained Soil, *Applied Thermal Engineering*. 128, 956–965.

Kulabukhova, I. A., Cherepanov, B. M., 2016. Investigation of the Causes of Soil Heaving of Soils with an Analysis of the Studies Performed, *Polzunovskiy Almanac*. 3, 110–113 [In Russian].

Leonova, A. V., Kazantseva, O. V., 2015. Assessment of Soil Heaving Degrees in the Area of the Power Transmission Lines Construction, *Rogov Readings: Problems of Engineering Geology, Hydrogeology, and Geoecology of Urbanized Territories*. 183–187 [In Russian].

Long, X., Cen, G., Cai, L., Chen, Y., 2018. Experimental Research on Frost Heave Characteristics of Gravel Soil and Multifactor Regression Prediction, *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*.

Orlov, V. O., Yolgin, B. B., Zheleznyak, I. I., 1987. Frost Soil Heaving in the Calculations of the Structure Foundations. Novosibirsk, Nauka [In Russian].

Ryskeldy, M., Ashenova, Sh., 2018. Application of Methods of Applied Mathematical Modeling in Geology and Construction, *Innovative Technologies in Me-*

dia Education. St. Petersburg, St. Petersburg State Institute of Cinema and Television. 166–173 [In Russian].

Shesternev, D. M., Shesternev, D. D., 2007. Heaving of Large-Detrital Rocks of the Chita-Ingoda Depression in Association with Climate Warming, *Cryosphere of the Earth*. 11 (4), 80–92 [In Russian].

Shpolyanskaya, N. A., 1978. Permafrost in Transbaikalia. Moscow, Nauka [In Russian].

Sumgin, M. I., 1937. Soil Permafrost within the USSR. Moscow, Leningrad, Publishing House of the AS USSR [In Russian].

Zhang, Y., Michalowski, R. L., 2015. Thermal-Hydro-Mechanical Analysis of Frost Heave and Thaw Settlement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 141 (7), 04015027. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001305

Zhang, Y., Xiong, L., Liu, L. A., 2018. Comparison of Soil Improvement Techniques for Frost Heave Mitigation, *International Congress and Exhibition “Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geo Technology” Geo M East 2018: Latest Thoughts on Ground Improvement Techniques*. Springer, Cham. 193–203. DOI: 10.3390/ma13071774