ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2020, № 4, с. 48–59

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.343.72

МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ ГРУНТОВ ЮГО-ВОСТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ (ВДОЛЬ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ТРАССЫ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ МОСКВА–КАЗАНЬ)

© 2020 г. У. Б. Фаттоев[1,*], А. В. Брушков[1,], А. В. Кошурников[1,***]**

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, кафедра геокриологии, Ленинские горы, 1, Москва, 119234 Россия*

**E-mail: umarjon94.94@mail.ru*

***E-mail: brouchkov@geol.msu.ru*

****E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru*

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.
После доработки 26.02.2020 г.
Принята к публикации 26.02.2020 г.

Представлены результаты полевых и лабораторных исследований процесса пучения на Юго-Восточной части Европейской территории России вдоль проектируемой высокоскоростной трассы железной дороги Москва–Казань, где изучены деформации пучения грунтов, их температурный режим, глубина сезонного промерзания, режим грунтовых вод. Температура грунтов в регионе изменяется от –4.6°С до 14.2°С в течение года, среднегодовая температура от 4.1°С до 6.3°С, а глубина сезонного промерзания от 17 до 90 см. Деформация пучения (ε_{th}) составляет в среднем у песков 0.026, в супесях – 0.027, в суглинках – 0.026. С увеличением влажности деформации пучения увеличиваются в среднем в песках до 0.028, супесях – до 0.034 и в суглинках до 0.051. Исследуемый регион имеет некоторые отличия в отношении пучения в связи с особенностями природных условий и состава грунтов.

Ключевые слова: *сезонно-мерзлый слой*, *морозное пучение*, *инженерные изыскания*

DOI: 10.31857/S0869780920040049

ВВЕДЕНИЕ

Морозное пучение грунтов относится к числу первостепенных проблем инженерной геокриологии. Несмотря на большое количество исследований, некоторые ее аспекты остаются до конца неизученными, например, влияние комплекса природной обстановки на процесс пучения, а также закономерности развития деформаций пучения грунтов в региональном плане. Исследование закономерностей пространственного изменения пучинистых свойств грунтов необходимо проводить при строительстве линейных сооружений, проходящих через различные регионы с многообразием свойств грунтов. Деформации пучения, проявляясь в основаниях железных и автомобильных дорог, в свою очередь приводят к различным неравномерным деформациям покрытия и затрудняют движение.

В настоящее время имеется обширный экспериментальный материал, связанный с деформациями пучения. Исследован механизм, динамика и закономерности развития деформаций пучения в различных грунтах. В этой области исследования проводили М.Н. Гольдштейн, Э.Д. Ершов, Г.П. Бредюк, В.Д. Карлов, В.О. Орлов, А.Е. Федосов, Н.А. Цытович, М.И. Сумгин, П.Ф. Швецов и др. Механизм и динамика развития напряжений пучения в различных условиях промерзания в грунтах разного состава и строения рассмотрены в работах Н.И. Быкова, С.С. Вялова, С.Е. Гречищева, Б.И. Далматова, М.Ф. Киселева, Н.Н. Мораревскула, С. Тебера, В.Б. Швеца и др. Численное и математическое моделирование процесса пучения проводилось в работах Э.Д. Ершова, С.Н. Булдовича, В.Г. Чеверева, А.В. Медведева, Е.В. Сафронова, А.В. Брушкова и др.

Региональные закономерности величины пучения грунтов описаны в работе И.В. Чесноковой [15], С.П. Качурин вел наблюдения за миграцией влаги в глинах Приневской низменности Ленинградской области. Более детальные наблюдения за тепловым и влажностным режимом, сезонным промерзанием–оттаиванием, а также пучением грунтов на Загорской станции (ныне Сергиево-Посадский район, Московская обл.) проводились Институтом мерзлотоведения им. В.А. Об-



Рис. 1. Схема расположения опытных площадок для режимных наблюдений за сезонным промерзанием грунтов.

ручева с 1949 по 1964 г., в частности А.В. Павловым [14]. Однако в настоящее время в регионе крайне мало новых исследований, недостаточно изучены региональные особенности проявления процесса пучения в Центральной и Южных частях Европейской части России. Отсутствуют данные по деформациям морозного пучения для густонаселенной Центральной части Европейской территории России с развитой инфраструктурой инженерных сооружений.

Цель настоящих исследований – изучение проявлений пучения грунтов на Юго-Востоке Европейской территории России и их региональных особенностей. Данная работа была выполнена в рамках проекта "Исследования свойств и сезонного промерзания грунтов и их влияния на строительство участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали "Москва–Казань–Екатеринбург".

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании пучинистых свойств грунтов региона мы опирались на комплекс полевых и лабораторных методов [13]. Исследования сезонного промерзания проводились на 14 площадках, расположенных вдоль участка Москва–Казань проектируемой трассы высокоскоростной железнодорожной магистрали "Москва–Казань–Екатеринбург" (рис. 1). При определении местоположения площадок учитывались климатические, геологические, геокриологические условия территории.

На местности площадки оборудовались в пределах заданных геоморфологических элементов. Обустройство площадки для режимных наблюдений за сезонным пучением грунтов включало комплекс работ:

• описание геоморфологических условий, мезо- и микрорельефа, степени дренированности территории, грунтового разреза, проявлений экзогенных геологических процессов, а также характеристика растительного покрова;

• бурение 5-ти скважин диаметром 108 мм глубиной 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 и 1.0 м для установки пучиномеров;

• бурение термометрических и пьезометрических скважин глубиной 5.0 м;

• установка двух грунтовых реперов на глубину 3.0 м.

Схема обустройства площадок для режимных наблюдений за сезонным промерзанием грунтов представлена на рис. 2.

В процессе ведения буровых работ проводилось полевое описание грунтов, определялся появившийся и установившийся уровень грунтовых вод (УГВ), и были отобраны пробы грунтов нарушенного сложения и их монолиты для последующих лабораторных исследований. Отбор образцов грунта производился с полной выборкой керна с шагом 0.10 м в зоне слоя сезонного промерзания с интервалом 0.5 м по всей исследуемой глубине.

Режимные наблюдения на площадках осуществлялись с октября 2016 г. по апрель 2017 г. с регулярностью 1 раз в 10 суток и включали термометрические наблюдения в скважинах, измерение температуры приповерхностного воздуха, фиксацию положения пучиномеров, отбор образцов грунта из скважин для определения влажности и плотности, измерение мощности и плотности снежного покрова, определение положения УГВ и глубины промерзания грунтов.

Выполнялся комплекс определений физических свойств грунтов (плотность и влажность, границы текучести и раскатывания, плотность частиц грунта, гранулометрический анализ ситовым методом и методом ареометра; расчет плотности сухого грунта, коэффициента пористости, степени водонасыщения и показателя консистенции) с помощью стандартного лабораторно-

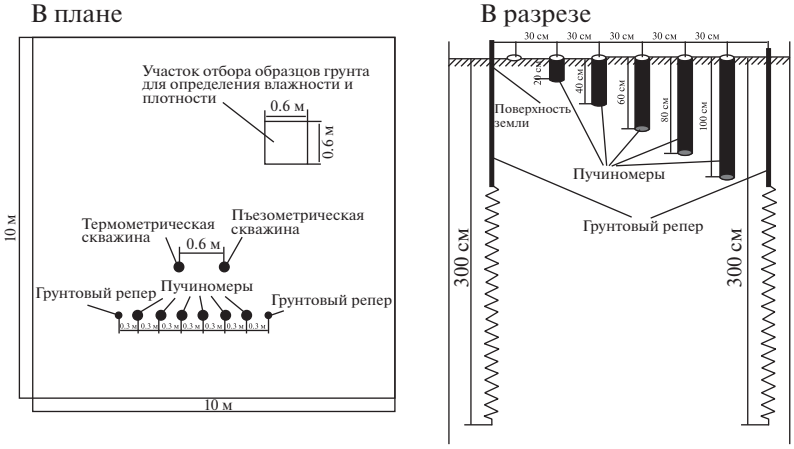


Рис. 2. Схема обустройства площадок (пл.) для режимных наблюдений за сезонным промерзанием грунтов.

го оборудования по методике ГОСТ 5180-84[1]. Определение деформации морозного пучения в лабораторных условиях проводилось по ГОСТ 28622-2012[2]. При проведении лабораторных работ по изучению относительной деформации морозного пучения грунтов ε_{th} грунтов было использовано специальное оборудование (рис. 3).

Относительную деформацию морозного пучения грунта ε_{th} вычисляли с точностью 0.01 по ГОСТ 28622-2012 по формуле:

$$\varepsilon_{th} = h_f / d_i,$$

где h_f – вертикальная деформация образца, мм; d_i – фактическая мощность промерзшего слоя образца грунта, мм. По результатам испытаний определялась степень пучинистости грунтов в зависимости от ε_{th} по табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проектируемая железная дорога находится в юго-восточной части Русской (Восточно-Европейской) равнины в пределах Московской и Приволжской возвышенностей, пересекает Мещерскую, Владимирскую и Нижегородскую низменности [1]. Климат рассматриваемой территории умеренный, характеризуется сравнительно теплым летом и холодной зимой при четко выраженных сезонах года [6]. Проектируемая дорога находится в лесной зоне, подзоне смешанных лесов и лесостепной зоне соответственно [6]. Гидрографическая сеть региона принадлежит бассейнам рек Волги и Оки. Реки равнинного типа с широкими асимметричными долинами, в большинстве случаев осложненными террасами [3]. Четвертичные отложения, представленные сложным комплексом ледниковых, водно-ледниковых, аллювиальных, озерно-болотных и эоловых отложений, распространены практически повсеместно и сложены песчаниками, суглинками, супесями и глинами разной мощности [7].

Геокриологическая обстановка региона определяется в первую очередь отсутствием многолет-

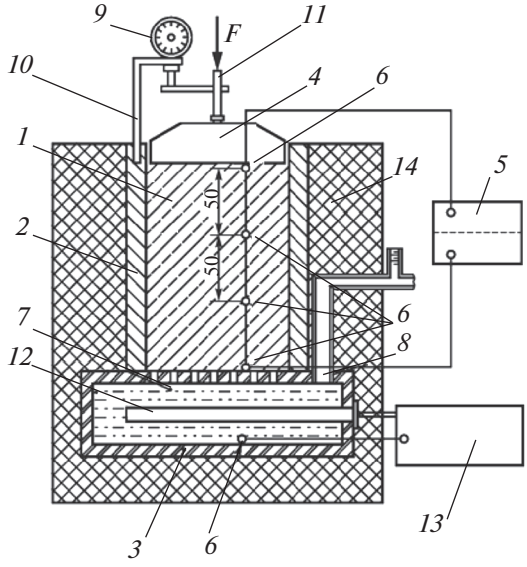


Рис. 3. Схема установки для определения степени пучинистости грунта. *1* – образец грунта; *2* – обойма; *3* – поддон с водой с капиллярно-пористым материалом; *4* – штамп; *5* – прибор для измерения температуры; *6* – датчики температуры; *7* – вода и капиллярно-пористый материал; *8* – устройство для подачи воды (емкость с водой); *9* – индикатор перемещения; *10* – кронштейн; *11* – шток механизма для нагружения образца грунта; *12* – ТЭН; *13* – терморегулятор; *14* – теплоизолирующий кожух.

[1] ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. http://docs.cntd.ru/document/871001039

[2] ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. http://docs.cntd.ru/document/1200101299

Таблица 1. Степень пучинистости грунтов по ГОСТ 28622-2012

Степень пучинистости грунта	Относительная деформация морозного пучения образца грунта
Непучинистый	$\varepsilon_{th} < 0.01$
Слабопучинистый	$0.01 \le \varepsilon_{th} < 0.035$
Среднепучинистый	$0.035 \le \varepsilon_{th} < 0.07$
Сильнопучинистый	$0.07 \le \varepsilon_{th} < 0.10$
Чрезмернопучинистый	$0.10 \le \varepsilon_{th}$

немерзлых пород [10], особенностями сезонного промерзания, мощностью и криогенным строением сезонно-мерзлых пород, а также положительной среднегодовой температурой [6].

Максимальное значение температур грунтов в исследуемом регионе с начала октября до конца апреля составляет от 10.8°С (флювиогляциальная равнина, площадка (пл. №1) до 14.2°С (речная терраса, пл. №7). В основном понижение температуры начинается с середины октября и прослеживается на всех площадках. Отметки ниже 0°С достигаются в конце ноября–начале декабря. С пл. № 7 (Владимирская низменность) до пл. № 14 (Приволжская возвышенность) промерзание начинается уже с середины ноября. До конца марта и начала апреля температура грунтов на всех участках, как правило, ниже 0°С. Минимальные значения температуры грунтов в это время изменяются от –0.5°С (пл. № 14, водораздельная равнина) до –4.6°С (пл. № 13, речная терраса, рис. 4). С начала апреля температура грунтов повышается.

Прямой зависимости между среднегодовой температурой пород и воздуха, как это отмечалось при различных геокриологических исследованиях, не существует. Наибольшее влияние на формирование среднегодовых температур горных пород оказывает снежный покров.

Для изучения влияния снежного покрова на процесс пучения и температуры грунтов на площадках № 9–2 и № 13–2 счищался снег. Результаты свидетельствуют о значительных изменениях температур грунтов. На площадке № 9–2 при отсутствии снежного покрова наблюдалось понижение температуры грунтов. На площадке № 13–2 наблюдался аналогичный характер изменений, но с середины декабря начиналось повышение температуры, в отличие от участка со снежным покровом. В целом отмечено значительное влияние снежного покрова на изменение температуры грунтов (рис. 5).

Среднегодовая температура пород – один из основных классификационных признаков сезонного оттаивания и промерзания пород, оказывает существенное воздействие на устойчивость этих процессов и мощность сезонно-мерзлого слоя (СМС). На мониторинговых площадках в пределах изучаемой территории, где проводилось изучение сезонного промерзания, глубина СМС менялась по-разному. Максимальная глубина СМС в естественных условиях колебалась от 0.17 м (пл. № 14, равнина) до 0.90 м (№ 9, склон). Если сравнить данные по месяцам, то можно отметить, что на всех участках максимальные глубины СМС – в феврале, а минимальные в октябре, т.е. наблюдается явное влияние изменения температуры воздуха (рис. 6).

Глубина сезонного промерзания увеличивается в восточном и юго-восточном направлении – от Московской до Нижегородской области, далее ближе к г. Казани она несколько уменьшается. Такая тенденция может быть связана с изменением температуры воздуха, растительного и снежного покровов, а также влажности грунтов.

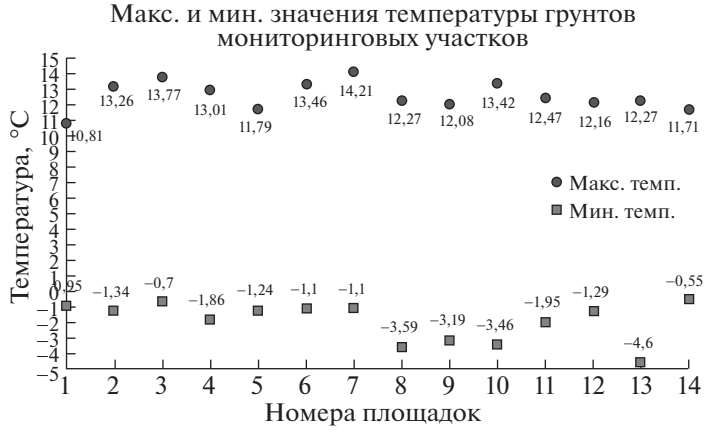


Рис. 4. Максимальные и минимальные значение температуры грунтов на мониторинговых участках.



Рис. 5. Изменение температуры грунтов на пл. № 9 (склон) и № 13 (речная терраса) со снежным покровом (9–1 и 13–1) и без него (9–2 и 13–2).

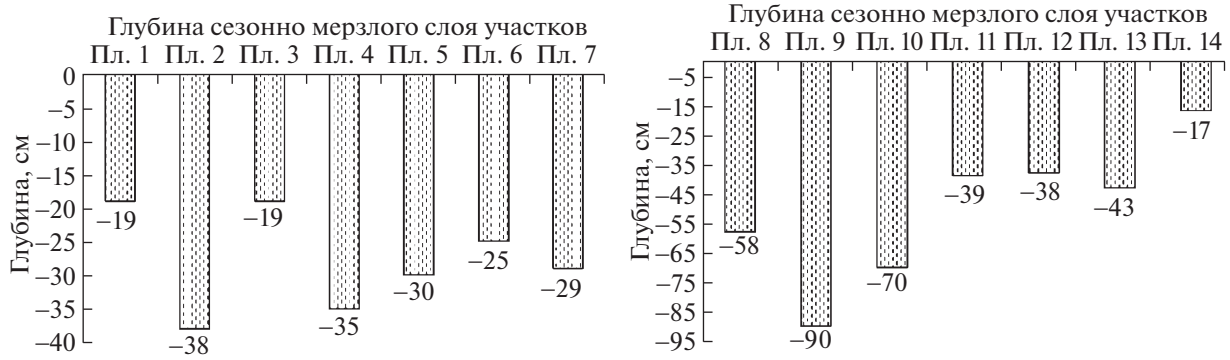


Рис. 6. Глубина СМС на пл. № 1–14.

Таким образом, определяющими факторами формирования СМС в регионе являются погодные условия и снежный покров. По данным пл. № 9 и № 13, которые были оборудованы с целью изучения влияния снежного покрова на температуру грунтов и их промерзание, при отсутствии снежного покрова происходит увеличение глубины промерзания до 0.20 м (рис. 7).

По схеме зональности грунтовых вод масштаба 1 : 10000000 [8], рассматриваемая территория пересекает 2 зоны:

– спорадического распространения грунтовых вод в условиях кратковременного, преимущественно летнего питания (преобладающая глубина залегания 0–3 м),

– повсеместного развития грунтовых вод в условиях избыточного сезонного питания (преобладающая глубина залегания 5–10 м, реже больше 10 м).

По данным наблюдений отмечено заметное изменение положения УГВ на разных площадках. На площадках, расположенных преимущественно на равнинных территориях, УГВ в начале октября находился на уровне от 0.5 до 3.5 м. До начала октября на пл. № 4, расположенной на речной террасе, и пл. № 8 на аллювиальная равнине УГВ находился на глубине более 5 м, с середины октября было зафиксировано резкое его повышение до глубины около 3 м. На этих участках наблюдалось небольшое колебание УГВ до конца февраля следующего года, начиная с марта зафиксировано постепенное его повышение до глубины 0.1 м. А на пл. № 5 и № 12, находящихся на пологих склонах водораздельной поверхности, до начала марта УГВ был ниже глубины 5 м, а его резкое повышение до глубины 0.45 м произошло лишь весной (рис. 8).

На некоторых площадках (№ 7, 9, 10 и 14, они не показаны на рис. 8), расположенных на склонах и возвышенностях, УГВ отсутствует до глубины 5 м, и на протяжении всего времени мониторинга не наблюдалось его поднятие.

Влажность грунтов также является важной характеристикой для оценки пучения. Влажность грунтов зависит, в основном, от погодных усло-

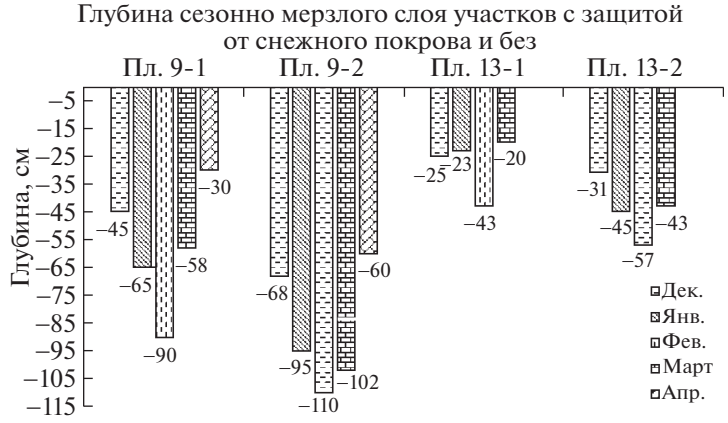


Рис. 7. Изменение глубины промерзания грунтов на пл. № 9 (склон) и № 13 (речная терраса) со снежным покровом (9–1 и 13–1) и без него (9–2 и 13–2).

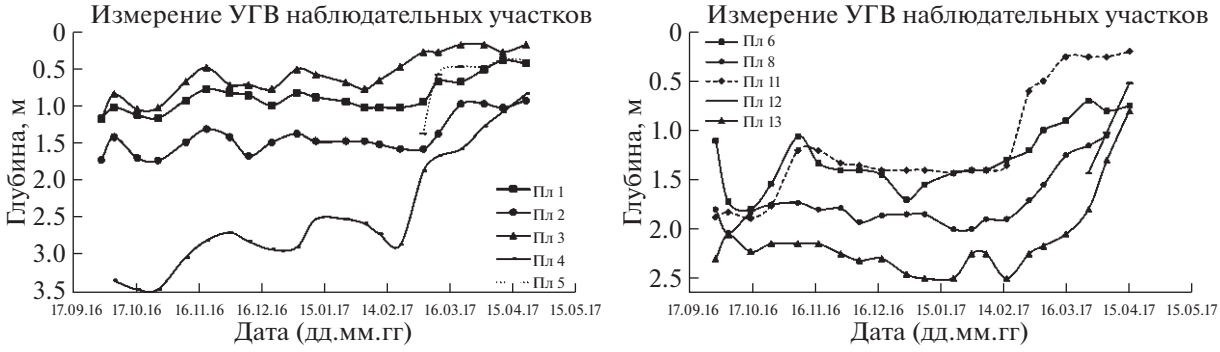


Рис. 8. Изменение УГВ на наблюдательных площадках во времени.



Рис. 9. Максимальные и минимальные значения влажности грунтов.

вий (температуры воздуха, количества осадков) и положения УГВ. Максимальные значение весовой влажности грунтов основания проектируемой трассы на исследованных площадках изменялись в пределах 25–68%. На участках, находящихся на речных террасах (пл. № 13) и поймах (пл. № 6), значения влажности высокие – 55% и 68% (рис. 9). На большинстве участков влажность грунтов повышалась в конце зимы во время таяния снега.

В пределах верхней части исследуемой толщи на площадках, расположенных на равнинах и

Таблица 2. Результаты исследования пучинистости грунтов на проектируемой трассе железной дороги Москва–Казань

№ пл.	Средняя влажность, W, %	Снежный покров, см	Глубина сезонного промерзания, см	Относительная деформация морозного пучения и наименование грунта по степени морозной пучинистости (ГОСТ 28622-2012)		
				Натурные наблюдения	Результаты лабораторных исследований	
					с притоком влаги	без притока влаги
1	24	25	19	0.005 Непучинистый	0.0026 Слабопучинистый	0.013 Слабопучинистый
2	15	34	38	0 Непучинистый	0.03 Слабопучинистый	0.027 Слабопучинистый
3	19	31	19	0.063 Среднепучинистый	0.071 Сильнопучинистый	0.062 Среднепучинистый
4	30	50	35	0.01 Слабопучинистый	0.024 Слабопучинистый	0.026 Слабопучинистый
5	16	36	30	0 Непучинистый	0.028 Слабопучинистый	0.024 Слабопучинистый
6	39	60	25	0.012 Слабопучинистый	0.048 Среднепучинистый	0.035 Среднепучинистый
7	16	45	29	0.025 Слабопучинистый	0.034 Слабопучинистый	0.027 Слабопучинистый
8	15	45	58	0 Непучинистый	0.023 Слабопучинистый	0.027 Слабопучинистый
9-1	21	40	90	0.008 Непучинистый	0.03 Слабопучинистый	0.028 Слабопучинистый
9-2 с защитой	21	0	110	0.007 Непучинистый	0.03 Слабопучинистый	0.028 Слабопучинистый
10	33	43	70	0.025 Слабопучинистый	0.08 Сильнопучинистый	0.022 Слабопучинистый
11	34	45	39	0.043 Среднепучинистый	0.047 Среднепучинистый	0.024 Слабопучинистый
12	28	60	38	0.026 Слабопучинистый	0.051 Среднепучинистый	0.023 Слабопучинистый
13-1	35	50	43	0.023 Слабопучинистый	0.05 Среднепучинистый	0.031 Слабопучинистый
13-2 с защитой	34	0	57	0.010 Слабопучинистый	0.05 Среднепучинистый	0.031 Слабопучинистый
14	21	57	17	0.029 Слабопучинистый	0.024 Слабопучинистый	0.017 Слабопучинистый

сложенных преимущественно песчаными отложениями (пл. № 1, 2, 5, 8, 14), грунты относятся к слабопучинистым (по результатам лабораторных исследований $\varepsilon_{th} = 0.0026–0.03$).

Мониторинг в полевых условиях показал, что грунты промерзшей толщи преимущественно являются непучинистыми ($\varepsilon_{th} = 0$) и слабопучинистыми ($\varepsilon_{th} = 0.029$). Выделяются площадки, расположенные на речной террасе (пл. № 4, 7) и на склоне (пл. № 9), сложенные супесями (пл. № 7 и 9) и суглинками (пл. № 4), которые являются по результатам лабораторных испытаний слабопучинистыми ($\varepsilon_{th} = 0.024–0.034$) и непучинистыми по натурным наблюдениям ($\varepsilon_{th} = 0.008–0.025$), вследствие низкого расположения УГВ или его отсутствия. На участках, сложенных суглинками и глинами (площадки № 10–12), грунты по результатам лабораторных исследований относятся к средне- и сильнопучинистым ($\varepsilon_{th} = 0.047–0.08$). По натурным наблюдениям грунты верхней (промерзшей) части разреза относятся к слабо- и среднепучинистым ($\varepsilon_{th} = 0.025–0.043$). Аналогичные пучинистые свойства грунтов наблюдаются на площадках № 6 и № 13, расположенных на пойме и речной террасе. Грунты находящихся на равнине площадок № 3 и 10 относятся к сильнопучинистым ($\varepsilon_{th} = 0.071–0.08$) по данным лабораторных исследований, а по результатам натурных наблюдений к слабо- ($\varepsilon_{th} = 0.025$, пл. № 10) и среднепучинистым ($\varepsilon_{th} = 0.063$) (табл. 2). Высокие ха-

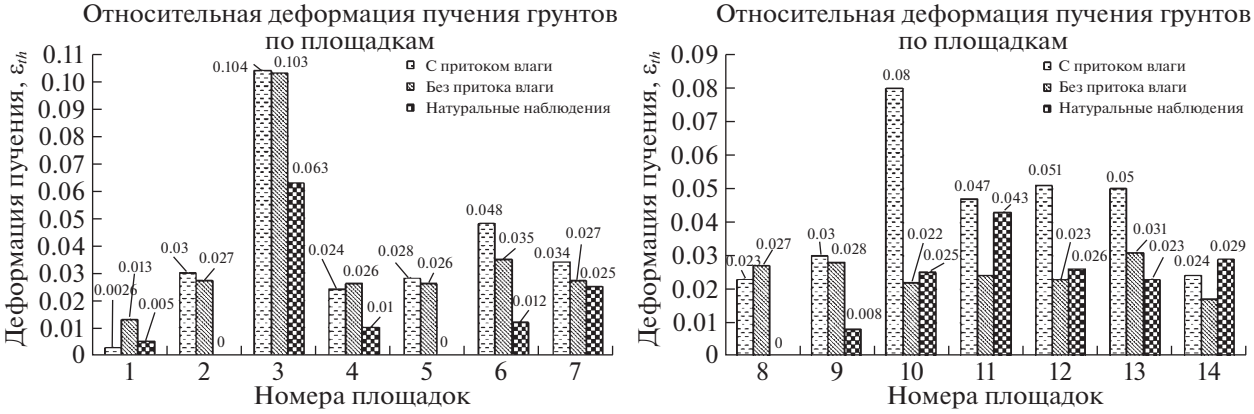


Рис. 10. Относительная деформация пучения грунтов на мониторинговых площадках.

рактеристики пучения площадки № 3 объясняются высоким расположением УГВ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее полные данные о пучении грунтов Северо-Запада Европейской части (Ленинградская обл.) приводятся в работе И.В. Чесноковой [15]. Сравнение показало, что полученные нами данные по юго-восточной ее части несколько отличаются.

Максимальные величины пучения в Ленинградской обл. наблюдаются в сильновлажных суглинках с близким залеганием УГВ, а минимальные в слабовлажных песках. По данным И.В. Чесноковой [15], степень пучинистости грунтов северо-западной части Европейской части изменяется в пределах: в песках $\varepsilon_{th} = 0$–0.032 (непучинистый, слабопучинистый), в супесях $\varepsilon_{th} = 0.035$–0.08 (средне-, сильнопучинистый), в суглинках $\varepsilon_{th} = 0.048$–0.096 (средне-, сильнопучинистый) что несколько выше, чем в юго-Восточной части Европейской территории России (в песках $\varepsilon_{th} = 0$–0.028, в супесях $\varepsilon_{th} = 0.008$–0.034, в суглинках $\varepsilon_{th} = 0.01$–0.051). Причиной высоких значений пучения грунтов в Ленинградской обл. являются другие значения атмосферных осадков, мощности снежного и растительного покрова, которые влияют на увеличение их влажности и глубины сезонного промерзания. Так, по данным И.В. Чесноковой [15], глубина сезонного промерзания изменяется от 0.8 до 2.6 м, а влажность в: песках – от 6 до 27%, супесях – от 14 до 29%, суглинках – от 23 до 39%, что заметно отличается от аналогичных показателей в исследуемом нами регионе.

Хорошая сходимость с полученными нами характеристиками свойств грунтов наблюдается с данными измерений А.В. Павлова [14] на Загорской станции (Сергиево-Посадский район, Московская обл.). По данным А.В. Павлова, глубина сезонного промерзания в естественных условиях на Загорской станции составляла 12 см, что близко к условиям на пл. № 1, где эта глубина была 19 см (Московская обл.). На Загорской станции измерение пучинистых свойств грунтов проводилось преимущественно в условиях без снежного покрова на поверхности. Глубина сезонного промерзания увеличивалась в супесях до 110 см, максимальная величина пучения составляла $\varepsilon_{th} = 0.009$ (непучинистый). В суглинках СМС достигал 185 см, при этом величина пучения составляла $\varepsilon_{th} = 0.023$ (слабопучинистый) [14], что близко к данным по пл. № 13–2 и пл. № 9–2 с аналогичными условиями.

Наблюдается закономерное изменение пучинистых свойств грунтов в зависимости от ряда факторов. Так, влажность – один из важных факторов, влияющих на пучинистость грунтов, и это отчетливо проявляется в полученных нами результатах. На всех участках при испытаниях в условиях притока влаги деформации пучения грунтов значительно увеличиваются (рис. 10). На рис. 11 показано увеличение деформации пучения супеси и суглинка при повышении влажности, что наблюдается в естественных условиях.

Пучинистые свойства существенно зависят и от типа грунтов. В целом с увеличением дисперсности грунтов их деформации пучения увеличиваются [4]. Так, по натурным и лабораторным наблюдениям, у песков относительная деформация заметно меньше, чем у супеси и суглинков (рис. 12). Очевидно, это обусловлено в первую очередь различиями во влажности и в процессах миграции влаги.

На рис. 13 показано влияние гранулометрического состава песков на деформацию пучения. В песках средней крупности значение относительной деформации пучения – $\varepsilon_{th} = 0.028$ при испытании в условиях притока влаги и $\varepsilon_{th} = 0.026$ без ее притока. Само по себе это различие дополняет су-

ществующие представления о пучении песков. При увеличении дисперсности до мелкого песка значение относительной деформации пучения возрастают до ε_{th} = 0.032 и ε_{th} = 0.029 соответственно. Интересно, что наблюдается уменьшение деформации пучения в пылеватых песках, что не соответствует данным других исследователей [2].

Аналогичная закономерность наблюдается и в супесях (рис. 14). Деформации пучения песчанистых супесей несколько выше, чем пылеватых в испытаниях при условии притока влаги, что также не соответствует полученным ранее данным [2]. На пл. № 3, где залегают песчанистые супеси (сильнопучинистые), наблюдалось максимальное пучение. При этом в условиях без притока влаги увеличение деформаций пучения было отмечено в пылеватых супесях, что соответствует известным закономерностям влияния дисперсности.

При увеличении дисперсности суглинков отмечено частичное уменьшение их деформаций пучения. Пучинистые свойства суглинков при увеличении дисперсности меняются незначительно при испытаниях в условиях притока влаги. Легкие песчанистые суглинки имеют значение относительной деформации пучения около ε_{th} = = 0.052 и ε_{th} = 0.032 соответственно при большой и малой влажности. Незначительно уменьшается деформация в легких пылеватых суглинках при испытании в условиях притока влаги – ε_{th} = 0.05.

Существенное уменьшение деформаций пучения суглинков наблюдается в условиях без притока влаги. Деформации пучения в легких пылеватых суглинках при условиях малой влажности равны ε_{th} = 0.023. Деформации пучения тяжелых пылеватых суглинков выше, чем легких пылеватых в условиях с притоком влаги и без притока влаги в грунт, но все равно меньше, чем у песчанистых суглинков (рис. 15).

Причина несоответствия результатов изучения влияния дисперсности на пучинистые свойства ранее полученным данным [2], возможно, связана с внутренними процессами в грунтах и изменением плотности. Это, вероятно, также связано с усадкой в грунте при промерзании тонкодисперсных грунтов [5]. Другой причиной могут быть процессы в грунтах, такие как миграционный поток, который зависит от градиента температуры, потенциала переноса влаги, порового давления влаги, характера проводимости грунта. Подтверждением правомерности таких предположений можно считать экспериментально полученное распределение потенциалов и отрицательного порового давления влаги в промерзающих грунтах [11], детально исследованное в последующих работах [12].

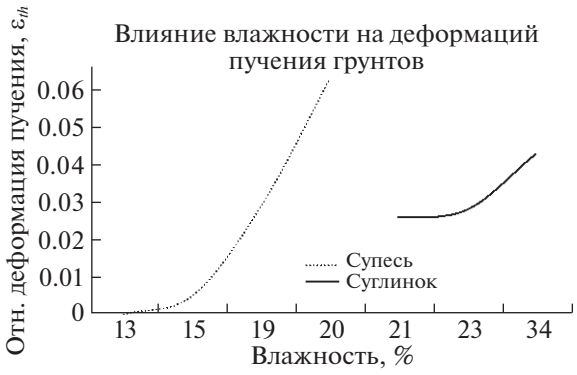


Рис. 11. Влияние влажности на пучинистые свойства супесей и суглинков (по полевым данным).

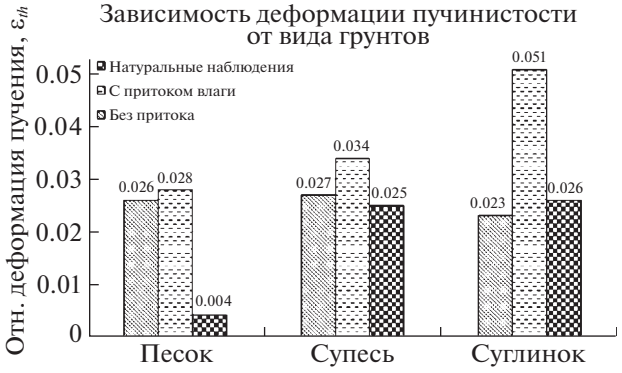


Рис. 12. Пучинистые свойства различных типов грунтов.

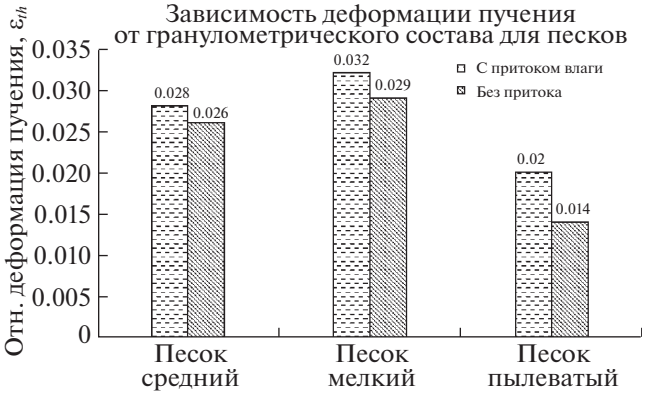


Рис. 13. Зависимость деформации пучения песков от гранулометрического состава.

При увеличении дисперсности грунтов до пылеватой фракции может происходить уменьшение коэффициента влагопроводности, что приводит к сокращению миграции влаги и, в свою очередь, к уменьшению льдовыделения [9]. Веро-

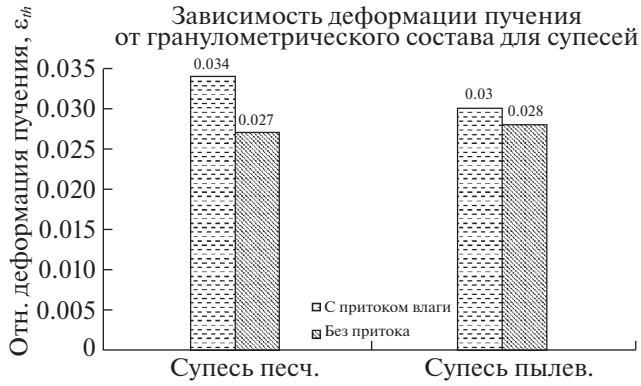


Рис. 14. Деформации пучения для различных супесей.

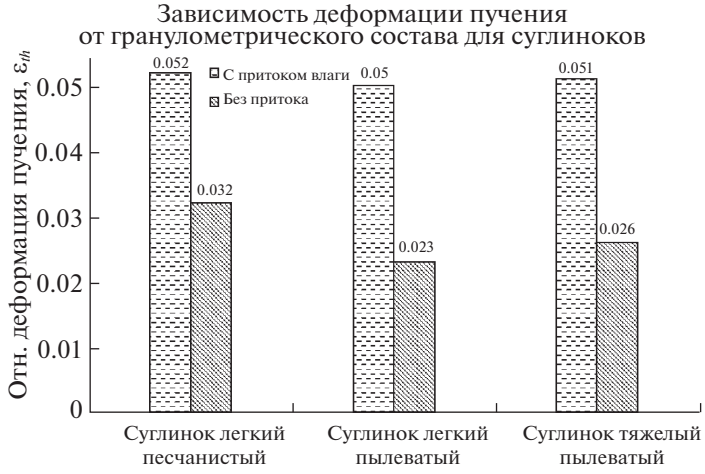


Рис. 15. Зависимость деформации пучения суглинков от гранулометрического состава.

ятно, это может быть причиной уменьшения деформаций пучения в пылеватых грунтах исследуемых площадок.

ВЫВОДЫ

Исследования свойств сезонного промерзания грунтов проводились на 14 опытных площадках, расположенных вдоль проектируемой трассы высокоскоростной железнодорожной магистрали “Москва–Казань–Екатеринбург”. Опытные площадки были выбраны на наиболее характерных участках в пределах геоморфологических структур Московской и Приволжской возвышенности, Владимирской и Нижегородской низменности, что позволило охарактеризовать процесс пучения во взаимосвязи с комплексом природных условий: геологических, климатических и гидрогеологических.

Глубины сезонного промерзания на исследованной территории изменялись в диапазоне от 0.15 до 0.9 м в естественных условиях, и от 0.57 до 1.1 м на опытных площадках без снежного покрова, что больше, чем на аналогичных с естественным снегонакоплением. Это свидетельствует о существенном влиянии снежного покрова на температурный режим пород. Минимальные мощности снежного покрова на исследуемой территории наблюдаются в Нижегородской низменности и изменяются в диапазоне от 5 см (пл. № 9–11, 13) до 18 см (пл. № 14). Максимальные мощности снежного покрова отмечены во Владимирской низменности, они изменяются в пределах от 25 см (пл. № 1) до 60 см (пл. № 6 и 12).

Интенсивность пучения пород существенным образом определяется предзимней влажностью пород, а также составом грунтов. Влажность является одним из главных факторов, значительно влияющих на пучинистые свойства грунтов. При испытаниях в условиях притока влаги деформации пучения грунтов значительно увеличиваются относительно деформаций в условиях без притока влаги.

Грунты, слагающие слой сезонного промерзания, представлены песками, супесями и суглинками, в верхней части разреза, как правило, с большим содержанием органических веществ. По результатам исследований, деформации пучения песков в среднем составляют $\varepsilon_{th} = 0.028$ при испытаниях в условиях с притоком влаги и $\varepsilon_{th} = 0.026$ без притока влаги. В супесях деформации пучения составляют $\varepsilon_{th} = 0.034$ в условии с притоком влаги и $\varepsilon_{th} = 0.027$ без притока влаги, что больше, чем в песках. В суглинках деформации в среднем намного больше в условиях с притоком влаги, чем в песках и супесях, и равны в среднем $\varepsilon_{th} = 0.051$, а в условиях без притока влаги ниже, чем в песках и супесях, и составляют $\varepsilon_{th} = 0.026$.

По сравнению с данными И.В. Чесноковой [15], полученными при исследовании грунтов Ленинградской области, деформации пучения в рассматриваемом регионе ниже. Результаты изучения пучинистых свойств грунтов А.В. Павловым на Загорской станции (Сергиево-Посадский район, Московская область) [14]) на оголенной поверхности (без снежного покрова) в целом близки к полученным результатам на исследуемой территории.

Большое влияние оказывает на пучинистые свойства грунтов гранулометрический состав. В целом, с увеличением дисперсности относительная деформация пучения грунтов увеличивается. Однако в рассматриваемом регионе наблюдается уменьшение деформаций пучения с увеличением содержания пылеватых частиц в грунте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева Т.В. и др.* Региональные континентальные преимущественно субаэральные инженерно-геологические структуры России // Инженерная геология России. Инженерно-геологические структуры России / Под ред. В.Т. Трофимова и Т. И. Аверкиной. М.: КДУ, 2015. Т. 3. 710 с.
2. *Брушков А.В., Ершов Э.Д. и др.* Экзогенные геологические процессы в криолитозоне. Морозное пучение грунтов // Основы геокриологии. Ч. 4. Динамическая геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: МГУ, 2001. 688 с.
3. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 357 с.
4. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: МГУ, 1985. 168 с.
5. *Дриньяк О.Г.* Рекомендации по учету и предупреждению деформации и сил морозного пучения грунтов. М.: Стройиздат, 1986. 72 с.
6. *Дунаева Е.Н.* Геокриологическое описание регионов Европейской территории СССР. Восточно-Европейский регион // Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 358 с.
7. Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.
8. Карта инженерно-геологических условий: Карта инженерно-геологических условий нечерноземной зоны РСФСР (за исключением горной части Урала, Зауралья и Калининградской области). Лист 1., масштаб: 1:1500000 / Ред. Е.М. Сергеев. Составлена: Министерство геологии РСФСР, 1980.
9. *Комаров И.А.* Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М.: Научный мир, 2003. 607 с.
10. Криолитологическая карта СССР (для области многолетней мерзлоты): для вузов. М.: ГУГК, 1985.
11. *Кудрявцев В.А., Ершов Э.Д. и др.* Влагоперенос и сегрегационное льдовыделение в промерзающих-оттаивающих дисперсных породах // V Всесоюзная конференция по тепло-массообмену. Минск, 1976.
12. *Чеверев В.Г.* Модели форм связи влаги в мерзлых грунтах // Генезис и модели формирования свойств грунтов. Труды Междунар. научной конф. / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королёва. М.: МГУ, 1998.
13. Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: МГУ, 2004. 512 с.
14. *Павлов А.В.* Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М.: Наука, 1965. 254 с.
15. *Чеснокова И.В.* Пучение грунтов Северо-Запада Европейской части СССР: дисс...канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1989. 220 с.

FROST HEAVING OF GROUNDS IN THE SOUTHEAST OF THE EUROPEAN RUSSIA (ALONG THE PROJECTED MOSCOW–KAZAN RAILWAY)

U. B. Fattoev[a,#], A. V. Brushkov[a,##], and A. V. Koshurnikov[a,###]

[a] *Geocryology Department, Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, Moscow, 119234 Russia*

[#] *E-mail: umarjon94.94@mail.ru*

[##] *E-mail: brouchkov@geol.msu.ru*

[###] *E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru*

Frost heave is of great significance, since it causes failures of engineering structures, railways and roads. Despite of active economic development in the European Russia, frost heave is relatively poor studied there, es-

pecially in its southeastern part. For the first time, ground temperatures, seasonal freezing, frost heave, water content in soil were monitored for the winter season at more than 10 sites along the Moscow–Kazan section of the "Moscow–Kazan–Yekaterinburg" projected high-speed railway. It has been shown that the region is distinguished by some special features including frost heaving manifested in fine sand. The temperature of soils in the region varies from –4.6°C to 14.2°C during the year, the average annual ground temperature from 4.1°C to 6.3°C, and the depth of seasonal freezing from 17 to 90 cm. Frost heave value changes from 0.026 (in sand) to 0.051 (in loam).

Keywords: *seasonally frozen layer*, *frost heaving*, *engineering survey*

REFERENCES

1. Andreeva, T.V. et al. *Regional'nye kontinental'nye preimushchestvenno subaeral'nye inzhenerno-geologicheskie struktury Rossii. Inzhenernaya geologiya Rossii. Inzhenerno-geologicheskie struktury Rossii* [Regional continental and subaerial engineering and geological structures of Russia. Engineering geology of Russia. Engineering-geological structures of Russia]. Trofimov V.T., Averkina T. I., Eds. Moscow, KDU Publ., 2015, vol. 3, 710 p. (in Russian)
2. Brouchkov, A.V, Ershov, E.D. et al. *Ekzogennye geologicheskie protsessy v kriolitozone. Moroznoe puchenie gruntov. Osnovy geokriologii. Ch. 4. Dinamicheskaya geokriologiya* [Exogenous geological processes in cryolithozone. Frost heaving of soils. Fundamentals of Geocryology. Part 4. Dynamic Geocryology]. Ershov E.D., Ed., Moscow, MSU Publ., 2001, 688 p. (in Russian)
3. *Geokriologiya SSSR. Evropeiskaya territoriya SSSR* [Geocryology of the USSR. European territory of the USSR]. Ershov E.D., Ed., Moscow, Nedra Publ., 1988, 357 p. (in Russian)
4. *Deformatsii i napryazheniya v promerzayushchikh i ottaivayushchikh porodakh* [Stress-strain in freezing and thawing rocks]. Ershov E.D., Ed., Moscow, MSU Publ., 1985, 168 p. (in Russian)
5. Drin'yak, O.G. *Rekomendatsii po uchetu i preduprezhdeniyu deformatsii i sil moroznogo pucheniya gruntov* [Recommendation for prevent frost heave deformation]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1986, 72 p. (in Russian)
6. *Geokriologicheskoe opisanie regionov Evropeiskoi territorii SSSR. Vostochno-Evropeiskii region. Geokriologiya SSSR. Evropeiskaya territoriya SSSR* [Geocryological description of the European Regions of the USSR. Eastern European region. Geocryology of the USSR. European territory of the USSR]. Dunaeva, E.N., Ershov, E.D., Eds. Moscow, Nedra Publ., 1988, 358 p. (in Russian)
7. *Inzhenernaya geologiya Rossii. Tom 1. Grunty Rossii* [Engineering Geology of Russia. Vol. 1. Soils of Russia]. Trofimov, V.T, Voznesenskii, E.A., Korolev, V.A., Eds. Moscow, KDU Publ., 2011, 672 p. (in Russian)
8. *Karta inzhenerno-geologicheskikh uslovii nechernozemnoi zony RSFSR masshtaba 1: 1 500 000.* [Nonchernozem belt engineering geology map of RSFSR, 5 M scale, Sheet 1]. Sergeev E.M., Ed. Moscow, Ministry of Geology of the RSFSR, 1980. (in Russian)
9. Komarov, I.A. *Termodinamika i teplomassoobmen v dispersnykh merzlykh porodakh* [Thermodynamics and heat-mass exchange in fine-grained frozen soils]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2003, 607 p. (in Russian)
10. *Kriolitologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1:4000 000 (Dlya oblasti mnogoletnei merzloty)* [Cryolithological map of the USSR. 4 M scale (For the permafrost region)]. Moscow, 1985. (in Russian)
11. Kudryavtsev, V.A., Ershov, E.D., et al. *Vlagoperenos i segregatsisonnoe l'dovydelenie v promerzayushchikh-ottaivayushchikh dispersnykh porodakh* [Moisture transfer and ice segregation in freezing-thawing fine-grained soils]. *Heat Transfer – Soviet Research*, 1977, vol. 9, no. 1, pp. 38–45. (in Russian)
12. Cheverev, V.G. *Modeli form svyazi vlagi v merzlykh gruntakh* [Models of moisture binding forms in frozen soils]. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Genezis i modeli formirovaniya svoistv gruntov"* [Proc. International Scientific Conference "Genesis and models of soil properties formation"], Trofimov V.T., Korolev V.A., Eds. Moscow, MSU Publ., 1998. (in Russian)
13. *Metody geokriologicheskikh issledovanii* [Methods of geocryological research]. Ershov, E.D., Ed. Moscow, MSU Publ., 2004, 512 p. (in Russian)
14. Pavlov, A.V. *Teploobmen promerzayushchikh i protaivayushchikh gruntov s atmosferoi* [Heat exchange in freezing and thawing soils with the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 254 p. (in Russian)
15. Chesnokova, I.V. *Puchenie gruntov Severo–Zapada Evropeiskoi chasti SSSR.* [Frost heaving of soils in the northwest European territory of the USSR]. Extended Abstract of Doctoral (Geol.-Min.) Dissertation, Moscow, Lomonosov State University, 1989, 220 p. (in Russian)