

УДК 551.340

У.Б. Фаттоев¹, А.В. Брушков², А.В. Кошурников³, А.Ю. Гунар⁴

МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ И ПУЧИНИСТОСТЬ ГРУНТОВ НА ТРАССЕ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ МОСКВА–КАЗАНЬ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Рассмотрены процесс морозного пучения грунтов при сезонном промерзании и факторы, влияющие на него, на проектируемой трассе железной дороги Москва–Казань. Несмотря на значительную освоенность этого региона, пучинистые свойства, особенно в современных климатических условиях, изучены недостаточно. Приведены результаты полевых исследований пучинистых свойств грунтов на мониторинговых площадках, расположенных на характерных природных комплексах вдоль проектируемой трассы железной дороги Москва–Казань, где изучены физические свойства грунтов, глубина сезонного промерзания, температурный режим грунтов, режим грунтовых вод, мощность снежного покрова, а также основные характеристики пучения.

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

Frost heave and factors which affect it are considered on the projected railway Moscow–Kazan. That region is intensively developed; however, frost heave hasn't been well studied in there, especially at the present climatic conditions. Results of field studies of frost heave properties of grounds on monitoring sites along the railway Moscow–Kazan are presented; they include physical properties of grounds, depth of seasonal freezing, grounds thermal mode, groundwater dynamics, snow cover thickness and basic characteristics of frost heave.

Key words: seasonal freezing layer, frost heave, engineering survey.

Введение. Морозное пучение грунтов — один из широко распространенных процессов на территории России, который влияет на устойчивость инженерных сооружений. Исследование факторов, влияющих на пучинистые свойства грунтов, важно для выявления закономерностей и особенностей развития этого процесса и предотвращения его негативных последствий, а получение новых данных для недостаточно исследованных территорий имеет научное значение. Проявление морозного пучения зависит от состава и влажности грунтов, условий их промерзания, температурного режима [Деформации..., 1985; Брушков, Ершов, 2001]. Ранее были проведены исследования основных закономерностей развития пучения, которые выполнили еще В.И. Штукенберг [1885] и М.И. Сумгин (1929), а также А.Е. Федосов (1935), Н.И. Салтыков (1944), Б.И. Далматов [1957], Н.А. Цытович (1957), Г.П. Бредюк (1959), С. Тайбер [1965], В.Б. Швец (1965), М.Н. Гольдштейн (1971), В.Д. Карлов (1977), В.О. Орлов [1962, 1977], Э.Д. Ершов (1986), Я.Б. Горелик (2002) и другие. Территориальные закономерности проявления пучинистых свойств грунтов рассмотрены в работах Н.Г. Датского

(1935), В.М. Карпова (1961), А.В. Паталеева и А.С. Алаева (1965), А.В. Павлова [1965], В.А. Бялыницкого (1967), И.В. Чесноковой [1989], В.О. Подборской и В.В. Невечери [2015], И.В. Шестакова (2016). К сожалению, большинство работ выполнено для условий Урала и Сибири, кроме того, в последнее время крайне мало новых региональных исследований.

Цель наших исследований — изучение факторов, определяющих пучинистые свойства грунтов в современных климатических условиях. Работа выполнена в рамках проекта «Исследования свойств и сезонного промерзания грунтов и их влияния на строительство участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург».

Материалы и методы исследований. При исследовании пучинистых свойств грунтов использован комплекс полевых методов. Было выбрано 14 ключевых участков с учетом геологических и геокриологических условий территории. Площадки расположены вдоль магистрали Москва–Казань (рис. 1). Площадки (пл.) № 1, 2, 3, 4, 7 и 8 находятся на флювиогляциальных и аллювиальных

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геоэкологии, аспирант; *e-mail:* ufattoev@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геоэкологии, заведующий кафедрой, докт. геол.-минер. н., профессор; *e-mail:* brouchkov@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геоэкологии, вед. науч. с, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* koshurnikov@msu-geophysics.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геоэкологии, науч. с; *e-mail:* gunar@msu-geophysics.ru



Рис. 1. Схема расположения ключевых участков исследования

низменностях (№ 1 и № 2 — Мещерская низменность), надпойменных речных террасах (№ 3 и № 7 расположены на II надпойменной террасе р. Клязьма, № 4 и № 8 — на I надпойменной террасе р. Нерль и III надпойменной террасе р. Ока) и в поймах рек (№ 6 — пойма р. Суворовщ и № 13 — пойменная терраса р. Волга). Площадки № 5, 9, 10, 11, 12 и 14 находятся на водно-ледниковых, флювиогляциальных пологих склонах (№ 5, 10, 11, 12 и 14) водораздельных равнин и на склонах водораздела (№ 5, 9). Площадки находятся в лесной (елово-сосновый, смешанный сосново-березовый и широколиственный леса — № 1, 5, 8, 9, 14,) и лесостепной зоне с травяно-кустарниковым, луговым, кустарниково-злаково-разнотравным напочвенным покровами (№ 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12 и 13).

На каждом ключевом участке пробурено 5 скважин диаметром 108 мм и глубиной 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 м для установки пучиномеров и 2 репера глубиной 3,0 м, а также пробурена термометрическая (и пьезометрическая) скважина глубиной 5,0 м. Схема ключевого участка показана на рис. 2.

Режимные наблюдения включали отбор образцов грунта из скважин для определения влажности и плотности, термометрические измерения в скважинах, измерение температуры приповерхностного воздуха, фиксацию положения пучиномеров, измерение мощности и плотности снежного покрова, определение положения уровня грунтовых вод и глубины промерзания грунтов с регулярностью 1 раз в 10 сут в холодный период года (начало октября—начало апреля).

На ключевых участках № 9 и 13 оборудованы две дополнительные площадки № 9-2 и № 13-2 с условиями защиты от снежного покрова для изучения его влияния на процесс пучения и формирование температурного режима грунтов.

Кроме того, выполнен комплекс определения физических свойств грунтов (плотность, влажность, пористость, границы текучести и раскатывания, гранулометрический анализ, степень водонасыщения и показатель консистенции) по методике ГОСТ 5180-84¹.

Относительную деформацию морозного пучения грунта ε_{th} вычисляли по ГОСТ 28622-2012² по формуле

$$\varepsilon_{th} = h_f / d_i, \tag{1}$$

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

Таблица 1

Степень пучинистости грунтов по ГОСТ 28622-2012

Степень пучинистости грунта	Относительная деформация морозного пучения образца грунта
Непучинистый	$\varepsilon_{th} < 0,01$
Слабопучинистый	$0,01 \leq \varepsilon_{th} < 0,035$
Среднепучинистый	$0,035 \leq \varepsilon_{th} < 0,07$
Сильнопучинистый	$0,07 \leq \varepsilon_{th} < 0,10$
Чрезмернопучинистый	$0,10 \leq \varepsilon_{th}$

Результаты исследований и их обсуждение. На исследуемой территории представлен комплекс ледниковых, водно-ледниковых, аллювиальных, озерно-болотных и эоловых отложений, породы сложены песчаниками, суглинками, супесями и глинами разной мощности (табл. 2, 3).

¹ ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200126371> (дата обращения: 19.06.2020).

² ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200101299> (дата обращения: 20.06.2020).

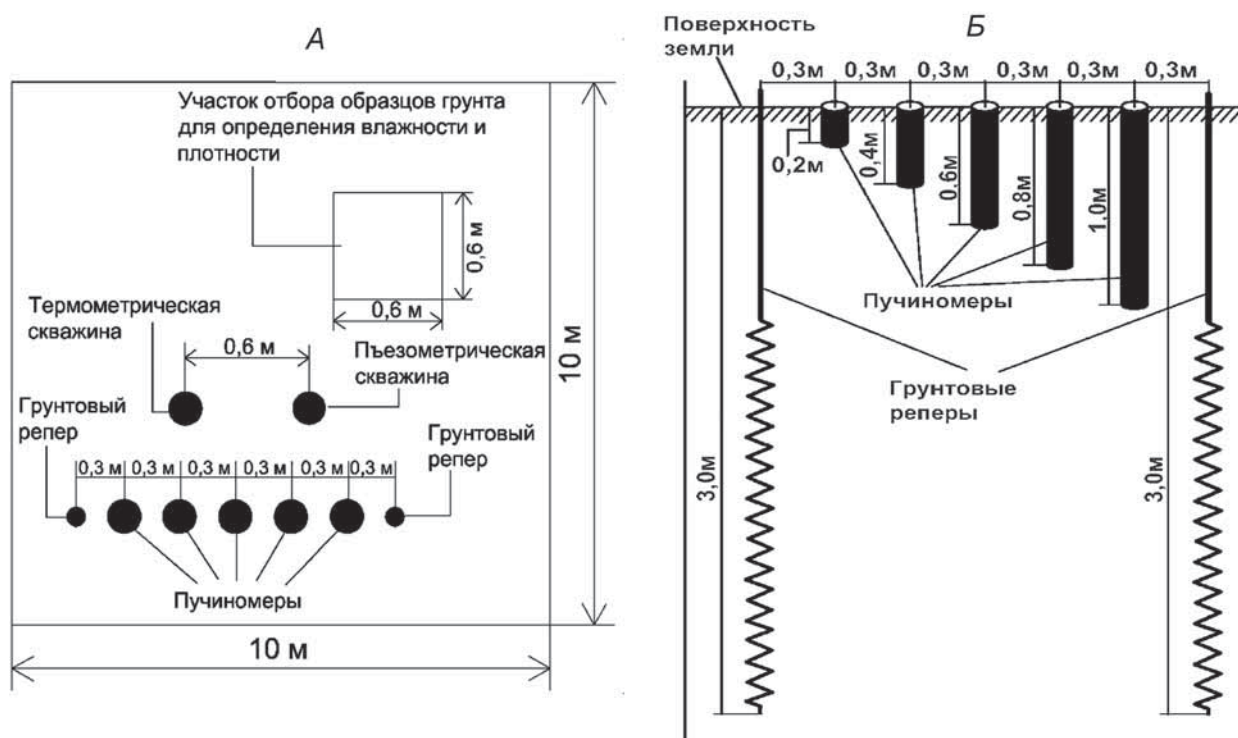


Рис. 2. Схема обустройства ключевых участков: А — в плане, Б — в разрезе

Данные, полученные в холодное время года (с начала октября до начала апреля), свидетельствуют о том, что максимальные значения температуры грунтов лежат в интервале 10,8–14,2 °С. Понижение температуры начинается в основном с середины октября и прослеживается на всех площадках. Отметки ниже 0 °С достигаются в конце ноября—начале декабря. До начала апреля

температура грунтов на всех участках остается ниже 0 °С. Минимальные значения температуры грунтов в это время изменяются от –0,5 °С до –4,6 °С. Распределение средних значений температуры грунтов по глубине за весь период измерений представлено на рис. 3.

Геокриологические условия региона характеризуются отсутствием многолетнемерзлых пород

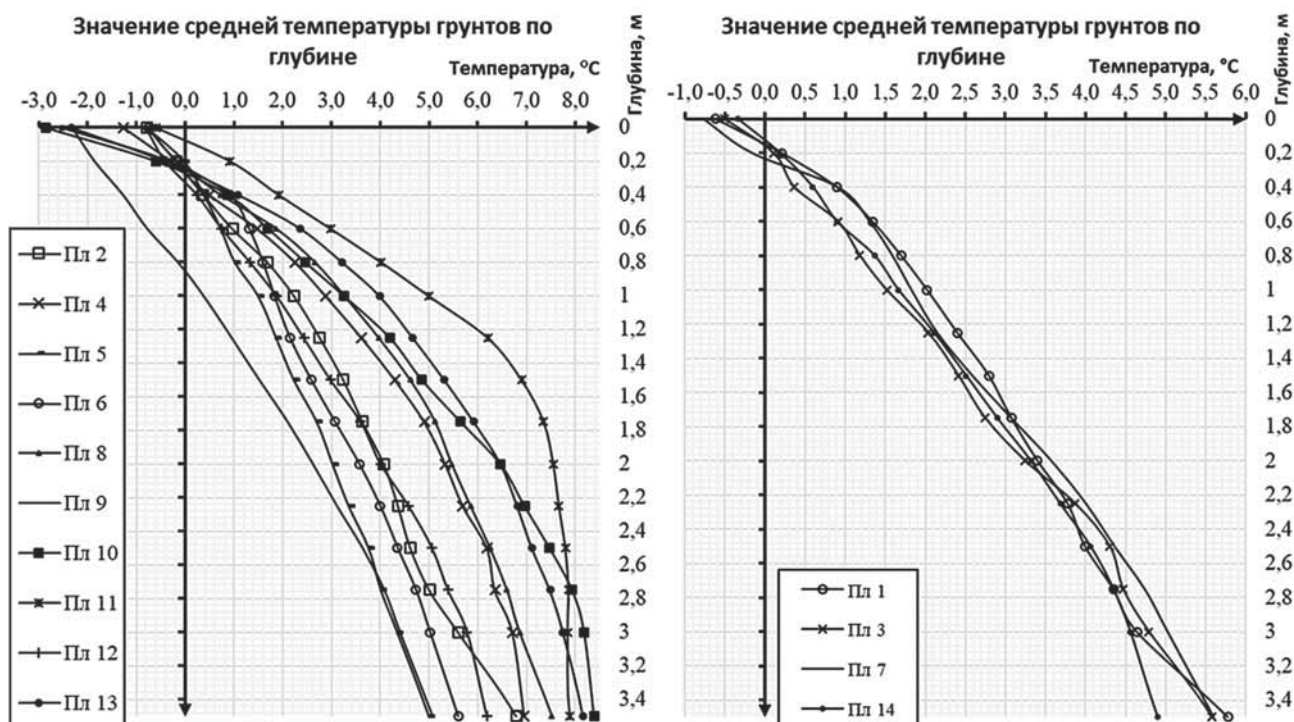


Рис. 3. Распределение средних значений температуры грунтов по глубине за холодный период года (октябрь–апрель): слева — площадки № 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13; справа — площадки № 1, 3, 7, 14

Таблица 2

Состав грунтовой толщи на ключевых участках

Слой	Номер площадки							
	1	2	3	4	5	6	7	
1	Супесь коричневая, текучая (0,0–0,6 м)	Супесь коричневая, текучая (0,0–0,4 м)	Супесь коричневая, текучая, песчанистая (0,0–0,6 м)	Суглинок темно-коричневый, легкий (0,0–1,8 м)	Супесь серо-коричневая (0,0–0,2 м)	Суглинок коричневый, легкий, (0,0–0,8 м)	Супесь желто-коричневая (0,0–2,0 м)	
2	Песок коричневый, средней крупности (0,6–0,8 м)	Песок желтый, мелкий (0,4–1,4 м)	Песок коричневый, мелкий (0,6–0,8 м)	Супесь темно-коричневая, текучая (1,8–5,0 м)	Песок серо-желтый средней крупности (0,2–0,8 м)	Супесь светло-серая (0,8–2,4 м)	Суглинок коричневый (2,0–2,4 м)	
3	Песок желтый, мелкий (0,8–5,0 м)	Глина желтая, легкая (1,4–1,6 м)	Супесь коричневая, текучая, (0,8–5,0 м)		Песок мелкий неоднородный (0,8–1,2 м)	Глина красно-коричневая (2,4–5,0 м), с глубины 4 м желто-коричневая	Супесь желто-коричневая (2,4–5,0 м)	
4		Песок желтый, средней крупности (1,6–5,0 м)			Супесь красно-коричневая (1,2–5,0 м)			
Слой	8	9	10	11	12	13	14	
1	Супесь черная, твердая (0,0–0,2 м)	Супесь коричневая (0,0–0,8 м)	Суглинок коричневый, легкий, от текуче- до тугопластичного (0,0–5,0 м)	Суглинок черно-коричневый (0,0–0,4 м)	Суглинок темно-коричневый, легкий (0,0–1,0 м)	Суглинок желто-коричневый, легкий (0,0–1,2 м)	Супесь темно-коричневая (0,0–0,2 м)	
2	Песок серо-коричневый, мелкий, (0,2–5,0 м)	Суглинок коричневый (0,8–1,6 м)		Суглинок светло-коричневый (0,4–5,0 м)	Суглинок желто-коричневый (1,0–5,0 м), с глубины 3 м красновато-коричневый легкий	Супесь желто-коричневая (1,2–1,6 м)	Суглинок желто-коричневый, легкий (1,6–5,0 м)	Супесь желтая, пластичная (0,2–0,6 м)
3		Супесь коричневая, твердая (1,6–2,0 м)						Переслаивание мелких и пылеватых песков желтого цвета (0,6–5,0 м)
4		Суглинок коричневый, легкий (2,0–5,0 м)						

Примечание. В скобках указано глубина залегания отложений (слоев).

и проявлением сезонного промерзания. Глубина сезонного промерзания грунтов изменяется от 0,17 до 0,9 м. Среднее значение влажности — в пределах 15–39%, снежный покров — от 0,25 до 0,6 м (табл. 3).

Уровень грунтовых вод (УГВ) на ключевых участках колеблется от 0,3 до 3,5 м в зависимости от ландшафта участков. На площадках (№ 7, 9, 10 и 14), которые расположены на склонах и водораздельных равнинах, УГВ не наблюдался за весь период. Выделяются площадки № 4, 5 и 12, на которых до начала октября УГВ находился на глубине более 5 м, а за период измерений отмечено его повышение до глубины 0,3 м (рис. 4).

Наблюдения за пучением показали, что грунты в регионе преимущественно непучинистые и слабопучинистые. Относительная деформация морозного пучения изменяется в пределах 0–0,029. Выделяются площадки № 3 и 11, на которых относительная деформация грунтов составляет $\varepsilon_{\text{п}} = 0,063$ (№ 3) и $\varepsilon_{\text{п}} = 0,065$ (№ 11) (табл. 3).

Как показано выше, в рассматриваемом регионе встречаются грунты непучинистые, слабопучинистые и местами среднепучинистые. В местах, где расположены преимущественно пески (пл. № 1, 2, 5, 8 и 9), грунты, как правило, непучинистые.

Глубина сезонного промерзания изменяется в пределах 19–90 см, максимальная температура грунтов составляет 10,81–13,26 °С, минимальная температура варьирует от –0,95 до –3,59 °С, максимальная влажность грунтов изменяется от 25 до 40%, минимальная — от 3 до 10%. Высота снежного покрова на этих площадках изменяется от 25 до 45 см (рис. 5).

В местах, где залегают суглинки и супеси (пл. № 4, 6, 7, 10, 12, 13 и 14), грунты оказались слабопучинистыми. Глубина сезонного промерзания на исследуемых участках изменяется в пределах 17–70 см, максимальная температура грунтов — в диапазоне 11,71–14,21 °С, минимальная температура от –0,55 до –4,6 °С. Влажность грунтов варьирует от 2 до 20% и до 25–68%. Высота снежного покрова в этих площадках составляет 43–60 см. На рис. 5–8 показано изменение характеристик во времени на наиболее представительных площадках.

Выделяются площадки № 3 и 11, на них выявлены среднепучинистые грунты. Другие характеристики грунтов здесь мало отличаются от таковых на других площадках, кроме пучинистых свойств и УГВ, который во время промерзания изменяется от 1,2 до 0,25 м (пл. № 11) и от 0,5–0,8 м в течение осенне-зимнего периода



Рис. 4. Изменение уровня грунтовых вод на ключевых участках

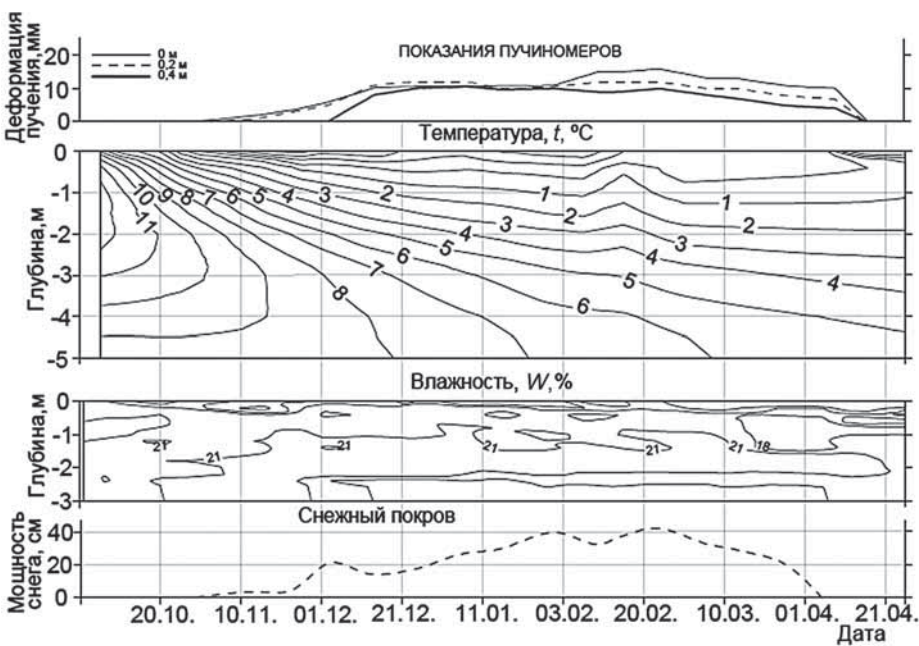


Рис. 5. Изменение деформации пучения, температуры грунтов, влажности и снежного покрова во времени на площадке № 1

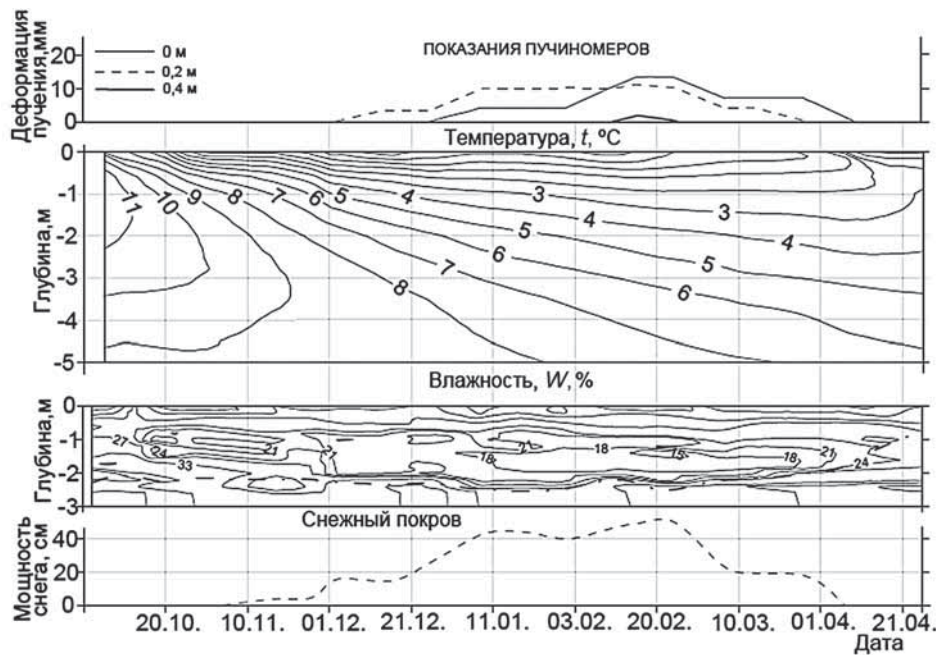


Рис. 6. Изменение деформации пучения, температуры грунтов, влажности и снежного покрова во времени на площадке № 13-1

Рис. 7. Изменение деформации пучения, температуры грунтов и влажности во времени на площадке № 13-2

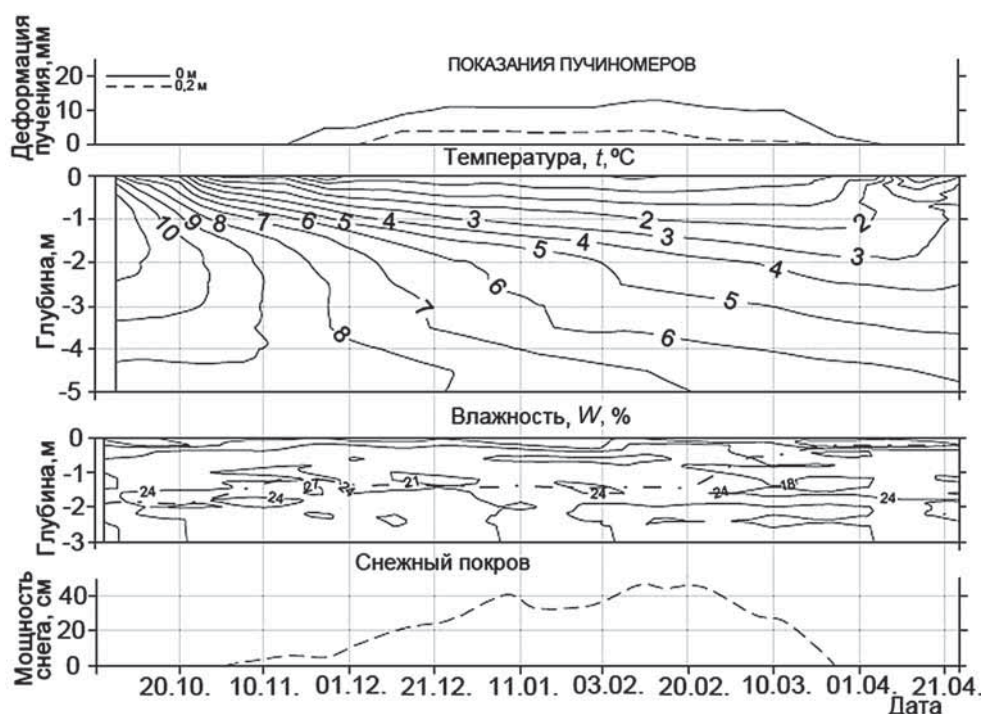
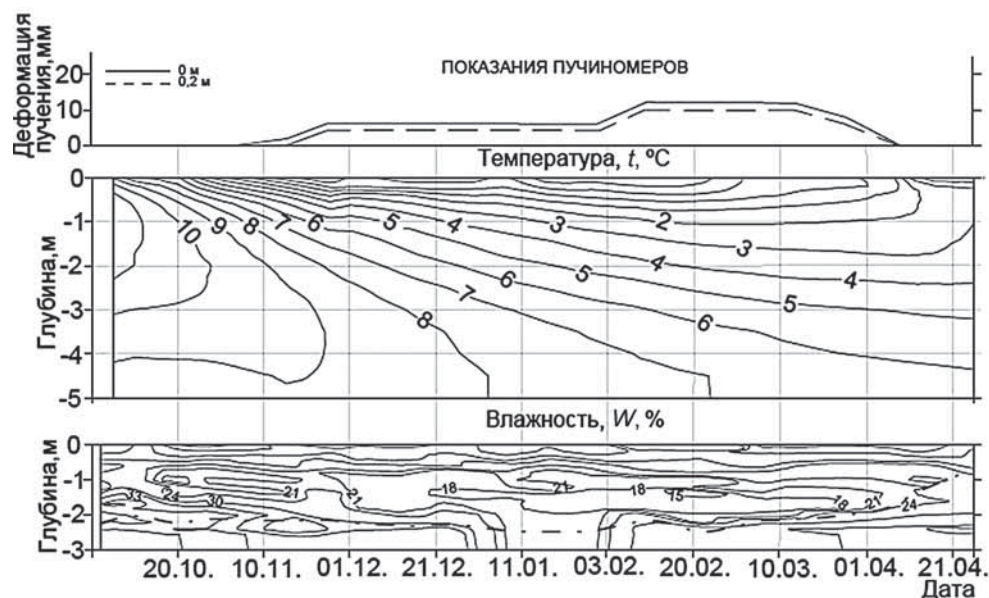


Рис. 8. Изменение деформации пучения, глубины сезонного промерзания, температуры грунтов, влажности и снежного покрова во времени на площадке № 11

до 0,2–0,3 м в начале марта (пл. № 3). Отметим, что при относительно высоких значениях деформации пучения грунтов на пл. № 3 и 11 глубина сезонного промерзания не достигает здесь большой глубины и составляет всего 19 см (пл. № 3) и 39 см (пл. № 11). Грунты на тех площадках, где отмечена относительно большая глубина промерзания (70 см на пл. № 10 и 90 см на пл. № 9), слабопучинистые и непучинистые. Причина, очевидно, заключается в уровне грунтовых вод, который отсутствует на пл. № 9 и 10 и очень неглубоко находится на пл. № 3 и 11. На других площадках с преобладанием супесей и суглинков УГВ находится преимущественно на глубине более 1,5 м, что уменьшает активность миграции влаги и, соответственно, пучение.

На ключевых участках № 9-2 и № 13-2, на которых проводились измерения без снежного покрова, отмечено понижение температуры грунтов и увеличение глубины сезонного промерзания (рис. 7). Так, максимальные значения температуры грунтов изменялись от 12,08 до 12,22 °C, минимальные — от –3,19 до –5,58 °C на пл. № 9-2, а на пл. № 13-2 — с 12,96 до 12,28 °C и с –2,63 до –3,05 °C. Глубина сезонного промерзания увеличилась с 90 см (пл. № 9-1) до 110 см на пл. № 9-2 и с 43 см (пл. № 13-2) до 57 см на пл. № 13-2. УГВ находится на отметке >2 м на площадке № 13-2, а на площадке № 9-2 грунтовые воды отсутствуют. Выражено влияние снежного покрова на температурный режим и промерзание грунтов. Так, на пл. № 9-2 относительная деформация пучения

Таблица 3

Результаты исследования влажности, снежного покрова, глубины сезонного промерзания и пучинистости грунтов на ключевых участках

Номер площадки	Средняя влажность, W , %	Снежный покров, см	Глубина сезонного промерзания, см	Относительная деформация морозного пучения, $\varepsilon_{\text{п}}$	Наименование грунта по степени пучинистости, по ГОСТ 28622–2012
1	24	25	19	0,005	Непучинистый
2	15	34	38	0	
3	19	31	19	0,063	Среднепучинистый
4	30	50	35	0,01	Слабопучинистый
5	16	36	30	0	Непучинистый
6	39	60	25	0,012	Слабопучинистый
7	16	45	29	0,025	
8	15	45	58	0	Непучинистый
9-1	21	40	90	0,008	
9-2 б/с	21	0	110	0,007	
10	33	43	70	0,025	Слабопучинистый
11	34	45	39	0,065	Среднепучинистый
12	28	60	38	0,026	Слабопучинистый
13-1	35	50	43	0,023	
13-2 б/с	34	0	57	0,010	
14	21	57	17	0,029	

грунтов уменьшилось с 0,008 до 0,007, а на пл. № 13-2 — с 0,023 до 0,010. Это указывает на то, что увеличение глубины промерзания при прочих равных условиях не увеличивает, а уменьшает деформацию пучения грунтов. Причина может быть связана с уменьшением миграции влаги и льдонакопления в связи с истощением запасов влаги и обезвоживанием грунтов при глубоком залегании уровня грунтовых вод.

Заключение. Наблюдения за пучением показали, что грунты в рассматриваемом регионе преимущественно непучинистые и слабопучинистые. Грунты на участках, сложенных в основном песками (пл. № 2, 5, 8) и супесями (пл. № 1, 9), непучинистые, деформация пучения на них не отмечена в песках, а в супесях составляет $\varepsilon_{\text{п}}=0,005\div0,008$. Выделяются, однако, пл. № 3 и № 14, где грунты относятся к среднепучинистым ($\varepsilon_{\text{п}}=0,063$) и слабопучинистым ($\varepsilon_{\text{п}}=0,029$). Грунты, сложенные преимущественно суглинками (пл. № 4, 6, 7, 10, 12, 13), в основном слабопучинистые. Деформация пучения изменяется в пределах 0,01–0,026, за исключением пл. № 11, деформация пучения на которой составляет 0,065.

В рассматриваемом регионе наиболее подвержены пучению супеси, суглинки и глины.

турного режима и региональных особенностей на деформации пучения оказалось выражено меньше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брушков А.В. Ершов Э.Д. Экзогенные геологические процессы в криолитозоне. Морозное пучение грунтов //

При расчетной глубине промерзания грунтов в Московской области в среднем около 140 см и в Татарстане до 170 см, которая используется при проектировании зданий и инженерных сооружений по СП 131.13330.2012, фактическая глубина составила от 4 до 120 см (на площадке без снега). При этом глубина промерзания закономерно увеличивалась при уменьшении дисперсности и влажности грунтов, мощности снежного покрова и была наибольшей в ледниковых и аллювиальных отложениях. Ее изменение с запада на восток не выражено.

Полученные величины пучения в целом соответствуют крайне немногочисленным данным, полученным ранее. Так, исследования на территории Кирилло-Белозерского музея-заповедника показали, что криогенное пучение грунтов составляет здесь около 24 мм [Подборская, Невечеря, 2015]. Близкие значения приводит для Загорского учебного полигона А.В. Павлов [1965]. Оказалось, что величина пучения зависит главным образом от состава грунтов и особенно от близости грунтовых вод, причем максимальные значения характерны для пологих склонов, сложенных супесчано-суглинистыми флювиогляциальными отложениями. Влияние глубины промерзания, а также темпера-

Основы геоэкологии. Ч. 4. Динамическая геоэкология / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 688 с.

Геоэкология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 357 с.

Далматов Б.И. Воздействие морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений. М.; Л.: Госстройиздат, 1957.

Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 168 с.

Дриньяк О.Г. Рекомендации по учету и предупреждению деформации и сил морозного пучения грунтов. М.: Стройиздат, 1986. 72 с.

Дунаева Е.Н. Геокриологическое описание регионов европейской территории СССР // Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 358 с.

Кудрявцев В.А., Ершов Э.Д., Чеверев В.Г. и др. Влагоперенос и сегрегационное льдовыделение в промерзающих–оттаивающих дисперсных породах // Мат-лы V Всесоюз. конф. по тепломассообмену. Минск, 1976.

Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 512 с.

Орлов В.О. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1962.

Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Л.: Стройиздат, 1977.

Павлов А.В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М.: Наука, 1965. 254 с.

Подборская В.О., Невечеря В.В. Обобщение результатов режимных наблюдений за процессом криогенного

пучения грунтов на территории Кирилло-Белозерского музея-заповедника // Изв. вузов. Геология и разведка. 2015. № 6. С. 60–66.

Фадеев П.И. Песчаные породы Мещерской низменности. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 273 с.

Чеснокова И.В. Пучение грунтов северо-запада европейской части СССР: Автореф. канд. дисс. М., 1989.

Штукенберг В.И. Заметка о пучинах на железных дорогах и мерах для их уничтожения // Инженер. 1885. Т. IV.

Black P.B. Interpreting unconfined unfrozen water content // Ground Freezing 91. Proceed. of the Sixth Intern. Symp. on Ground Freezing, Beijing, 10–12 September 1991. Vol. 1. Rotterdam: A.A. Balkema, 1991. P. 3–6.

Bronfenbrenner L., Bronfenbrenner R. Modeling frost heave in freezing soils // Cold Regions Sci. and Technology. 2010. Vol. 61. P. 43–64.

Michalowski R., Zhu M. Freezing and ice growth in frost-susceptible soils // Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis, Solid Mechanics and Its Application, Vol. 146. Springer Netherlands, 2007.

Rempel A. Formation of ice lenses and frost heave // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. F02S21.

Taber S. The Mechanics of frost heaving. Washington: Permafrost Intern. Conf., 1965.

Поступила в редакцию 15.02.2019

Поступила с доработки 30.06.2020

Принята к публикации 30.06.2020