

УДК 551.248.1

ЗНАЧЕНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАТУРНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ГРУНТОВОГО ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

© 2019 г. А. А. Гинзбург^{1,*}, Р. Г. Кальберген¹, В. С. Исаев^{2,***}, Г. С. Типенко¹,
Д. О. Сергеев^{1,**}, А. Н. Хименков¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: galab3@yandex.ru

**E-mail: cryo2@yandex.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
Москва, Ленинские Горы, 1, МГУ, Москва, 119991 Россия

***E-mail: tpomed@yandex.ru

Поступила в редакцию 2.06.2019 г.

Современные системы геотехнического мониторинга и модели развития геокриологических процессов служат оценке и предупреждению опасных динамических воздействий на объекты инфраструктуры Арктики и Субарктики России. Уровень методических разработок и приборно-аппаратное обеспечение этих систем в России недооценены в условиях меняющегося климата, растущей техногенной нагрузки и снижающегося качества инженерных изысканий и проектирования, наблюдающихся в последние годы. Поровое давление успешно исследуется на уровне образца в лабораторных условиях и в поле при проведении статического зондирования, однако динамика порового давления и физические закономерности этой динамики в грунтовых массивах остаются недостаточно изученными. По теоретическим соображениям, поровое давление должно меняться под воздействием процессов, сопутствующих промерзанию и оттаиванию, и в свою очередь влиять на активность диссоциации газовых гидратов и механические свойства грунтов. Современная аппаратно-приборная технологическая база создает новые возможности для исследования динамики порового давления в грунтовом массиве. Это открывает перспективы для совершенствования систем геотехнического мониторинга с целью своевременной защиты объектов инфраструктуры от неблагоприятных природных и природно-техногенных воздействий.

Ключевые слова: поровое давление, промерзание грунта, тиксотропное разжижение грунта, криогенное пучение.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019582-88>

Современные системы геотехнического мониторинга на территории криолитозоны нацелены в первую очередь на отслеживание прямых динамических воздействий на защищаемые объекты инфраструктуры, а также на отслеживание параметров, от которых существенно зависит активность неблагоприятных экзогенных геологических процессов. В качестве одного из таких параметров используется температура грунта. Температура удобна для измерения, однако в некоторых условиях ее значения оказываются недостаточно информативными. Например, несущая способность засоленного грунта существенно снижается при повышении температуры даже в ее отрицательной области из-за частичного оттаивания льда в поровом пространстве.

Изменение же засоленности порового раствора во времени приводит к смещению температуры начала замерзания и, соответственно, к неверной интерпретации значимости изменения температурного поля.

Другим примером может послужить замедление темпов прироста среднегодовой температуры грунта с приближением момента начала деградации многолетнемерзлых пород (ММП). Этот эффект связан с большими затратами теплоты на фазовые переходы грунтовой влаги, что приводит к формированию малоградиентного температурного поля, сокращению глубины проникновения сезонных колебаний температур. Поэтому

возникают затруднения с прогнозом сроков начала устойчивого многолетнего опускания кровли ММП.

Уровень методических разработок и приборно-аппаратное обеспечение систем мониторинга в России недооценены в условиях меняющегося климата, растущей техногенной нагрузки и снижающегося качества инженерных изысканий и проектирования, наблюдающихся в последние годы. Например, в модельных оценках формирования и разложения газовых гидратов в грунтах поровое давление обычно задается равным гидростатическому или литостатическому давлению, что в ходе эволюции геокриологических условий может не соответствовать действительности.

В ИГЭ РАН разработан датчик порового давления, предназначенный для работы в составе систем предупреждения катастрофических склоновых смещений в немерзлых грунтах и опробованный на оползневых склонах в регионе г. Сочи¹. Конструктивные возможности датчика не предполагают его прямого использования в промерзающих грунтах, однако процессы промерзания закрытых систем и грунты, содержащие в поровом пространстве одновременно воду, лед и газы, — интересные и важные объекты для прямого измерения порового давления с целью оценки их напряженно-деформированного состояния и структурно-криологических последствий фазовых переходов в засоленных и газосодержащих грунтах.

Цель настоящего исследования — изучение возможностей измерения порового давления в условиях всестороннего промерзания и кратковременного динамического воздействия в воде и сезонно-талом грунте и интерпретация результатов. Для достижения цели было проведено две серии опытов в Москве и окрестностях г. Воркуты.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Общеизвестно явление роста гидростатического давления в условиях всестороннего промерзания. В качестве начальной проверки возможностей разработанной оригинальной аппаратуры было проведено два опыта по замораживанию пластиковой десятилитровой емкости с водопроводной водой. В центральную часть емкости помещался датчик порового давления, в который вместе с сенсором давления был конструктивно встроен температурный сенсор. Одновременно ежеминутно измерялись давление и температу-

ра внутри емкости и температура воздуха. Идея опыта заключалась в оценке возможностей аппаратного обеспечения к работе в условиях частичного фазового перехода влаги, а также в оценке его чувствительности к эффектам промерзания и оттаивания, отражающимся в значениях порового давления. Первый опыт был поставлен в условиях относительно слабого и переменного мороза (температура воздуха колебалась, но не опускалась ниже -8°C), второй — при более интенсивном и устойчивом промораживании. В обоих случаях промораживание продолжалось до получения всестороннего ледяного “коккона” с толщиной стенок и верхней свободной поверхности от 3 до 10 см (рис. 1).

В талых грунтах криолитозоны поровое давление может существенно меняться при тиксотропном разжижении грунтов [2]. Природа этого разжижения до сих пор остается спорной, однако явление само по себе довольно опасно, поскольку влияет на несущую способность грунтов и устойчивость склонов. Мониторинг порового давления должен проводиться на участках динамических воздействий и участках склонов с переменным режимом увлажнения деятельного слоя.

Для исследования последствий кратковременного динамического воздействия был выбран супесчаный грунт в пределах небольшого пятнамедальона в южной тундре в окрестностях г. Воркуты. Датчик был установлен вертикально на глубину 0.3 м путем ручного задавливания (рис. 2). Возможность приложить усилие на торцевую часть датчика является весьма важным свойством, которое позволяет устанавливать такой датчик на забой скважин любой глубины.



Рис. 1. Общий вид промораживаемой пластиковой емкости с датчиком порового давления, укрепленным на деревянной доске; над датчиком виден воздушный пузырь в промерзающей закрытой системе (опыт проведен в Москве 29.01.2018 г.).

¹ Отчет о результатах НИОКР по теме “Разработка технологии комплексного мониторинга природно-технических систем, работающего в режиме охранной сигнализации” № г.р. ААА-А-Б18-218092190039-4. <https://rosrid.ru/ikrbs/NDISQV00XYSL8BJCDJEZRBIX> <ссылка проверена 18.06.2019 г.>

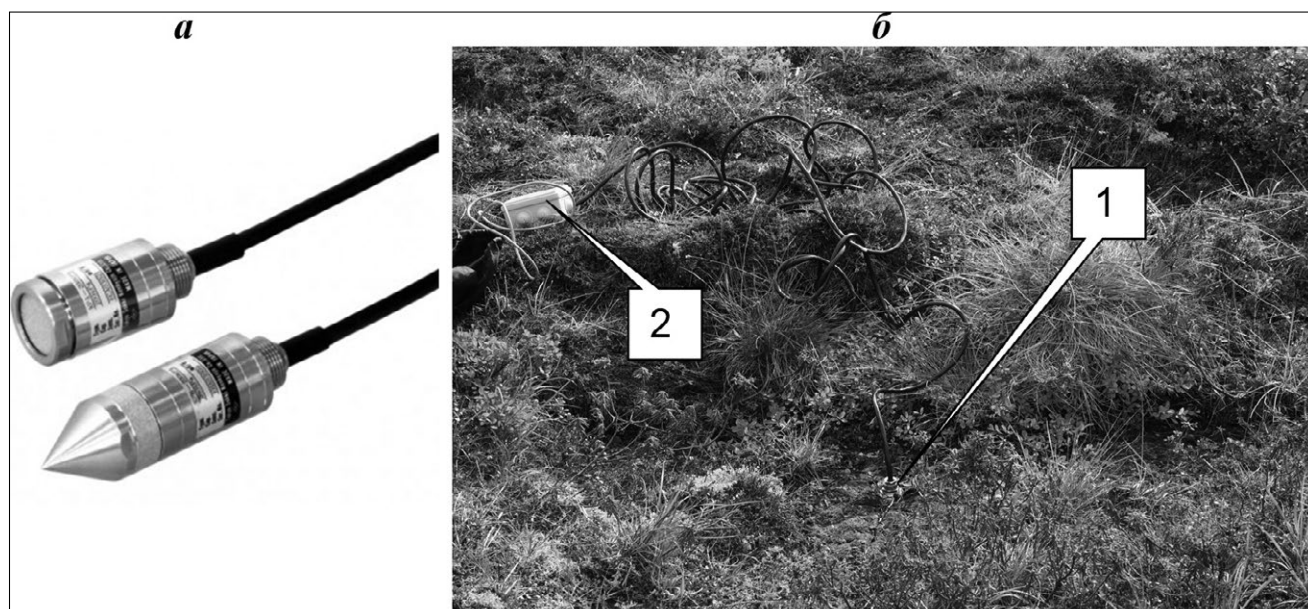


Рис. 2. Датчик порового давления, установленный в приповерхностной области пятна-медальона (а, б-1) и блок управления датчиком (б-2) (южная тундра, район г. Воркуты).

После установки в грунт выполнялась выстойка датчика для отображения разницы атмосферного и порового давлений. Последнее условно предполагалось близким к литостатическому давлению.

На следующем этапе эксперимента осуществлялось кратковременное динамическое воздействие на поверхность грунта с частотой примерно 2 Гц и нагрузкой 50 кПа в течение 3 минут. Предполагалось, что тиксотропное разжижение грунта должно сопровождаться изменениями порового давления, динамика которого на этапах разрушения и восстановления структурных связей между грунтовыми частицами и являлось предметом исследования.

Второй эксперимент был поставлен на заболоченном участке с оторфованным супесчаным грунтом на удалении 1 м от основания насыпи железной дороги Москва-Воркута близ северного выводящего семафора станции Хановой. Предполагалось, что поровое давление грунта должно меняться в результате прохождения железнодорожного состава. Датчик был установлен вертикально на глубину 0.3 м (см. рис. 2).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первая серия опытов продемонстрировала реакцию датчика на всестороннее промерзание водного объема. При умеренном и непостоянном охлаждении области испытаний за счет окружающей воздушной среды (см. рис. 2) при достижении небольшого переохлаждения воды до $-0.08^{\circ}\text{C} \div -0.12^{\circ}\text{C}$ наблюдается практически

линейное увеличение давления на 1 кПа, после чего рост становится пилообразным (рис. 3). По-видимому, это связано с периодической разгрузкой напряжений в ледяной оболочке закрытой системы из-за трещинообразования. Хорошо видно, что в промерзающей системе температурный мониторинг в водной среде становится малоинформативным из-за того, что тепловые потоки расходуются не на изменение температуры, а на фазовые переходы.

При развитии процесса видно 2 макроцикла промерзания: примерно с 3 до 15 часов и с 22 до 8 часов. Эти макроциклы обусловлены постепенным повышением давления, перераспределением жидкой воды через трещины на поверхность и ее последующим намерзанием. После внесения емкости в теплое помещение система сразу отреагировала резким падением давления, после чего постепенно начала расти и температура воды (см. рис. 3).

Второй опыт промерзания замкнутого объема воды был поставлен в условиях более жесткого всестороннего промерзания, в ходе которого температура окружающего воздуха колебалась между -8°C и -11°C (рис. 4). Этот опыт также показал пилообразный характер изменения гидростатического давления, который, предположительно, связан с развитием деформаций в растущем ледяном панцире, окружающем закрытую промерзающую систему. Эти деформации осложнены поведением газовых флюидов, прокладывающих себе причудливые каналы во льду (рис. 5). Примечателен факт мгновенной реакции датчика давления на переход температуры

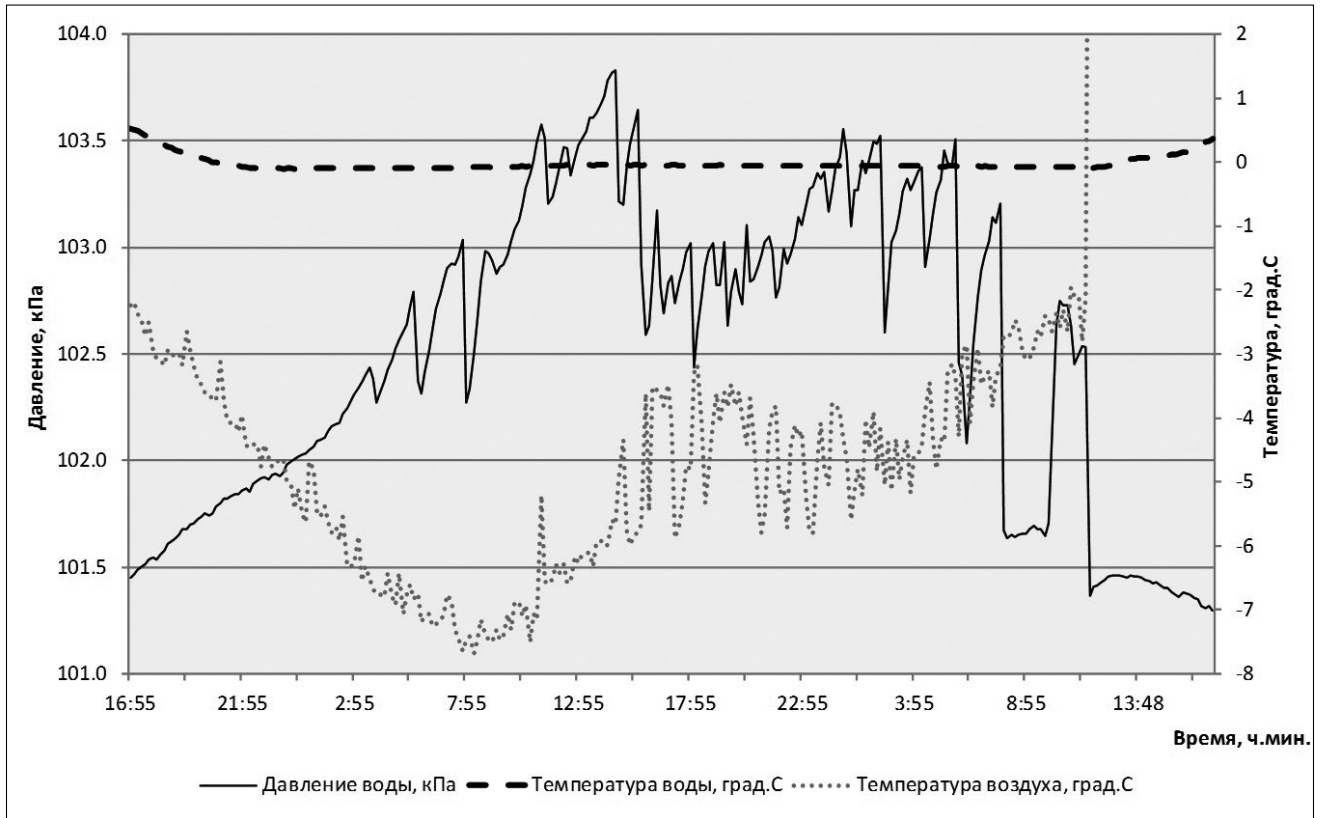


Рис. 3. Изменения порового давления и температуры в ходе всестороннего промерзания воды (опыт 29.01.2018 г.).

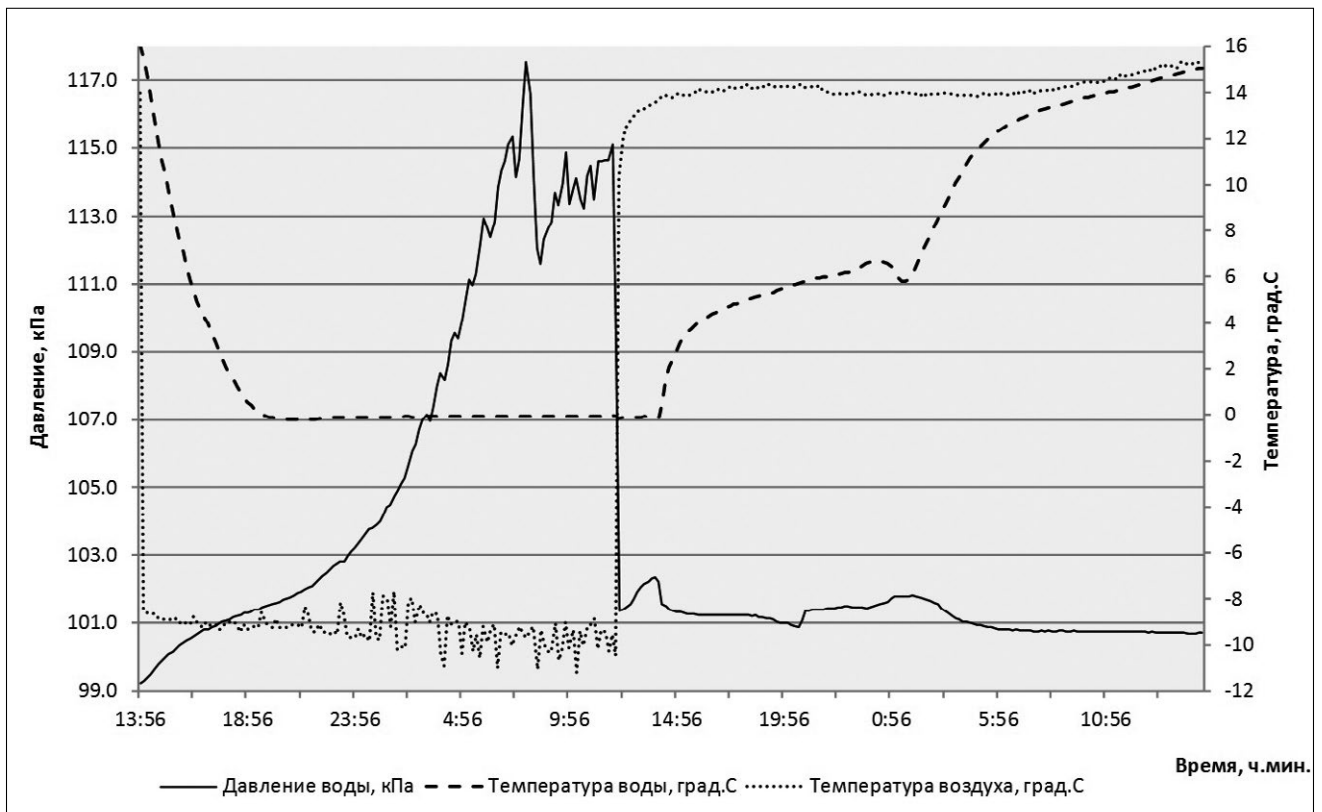


Рис. 4. Изменения порового давления и температуры в ходе всестороннего промерзания воды (опыт в Москве 5.02.2018 г.).

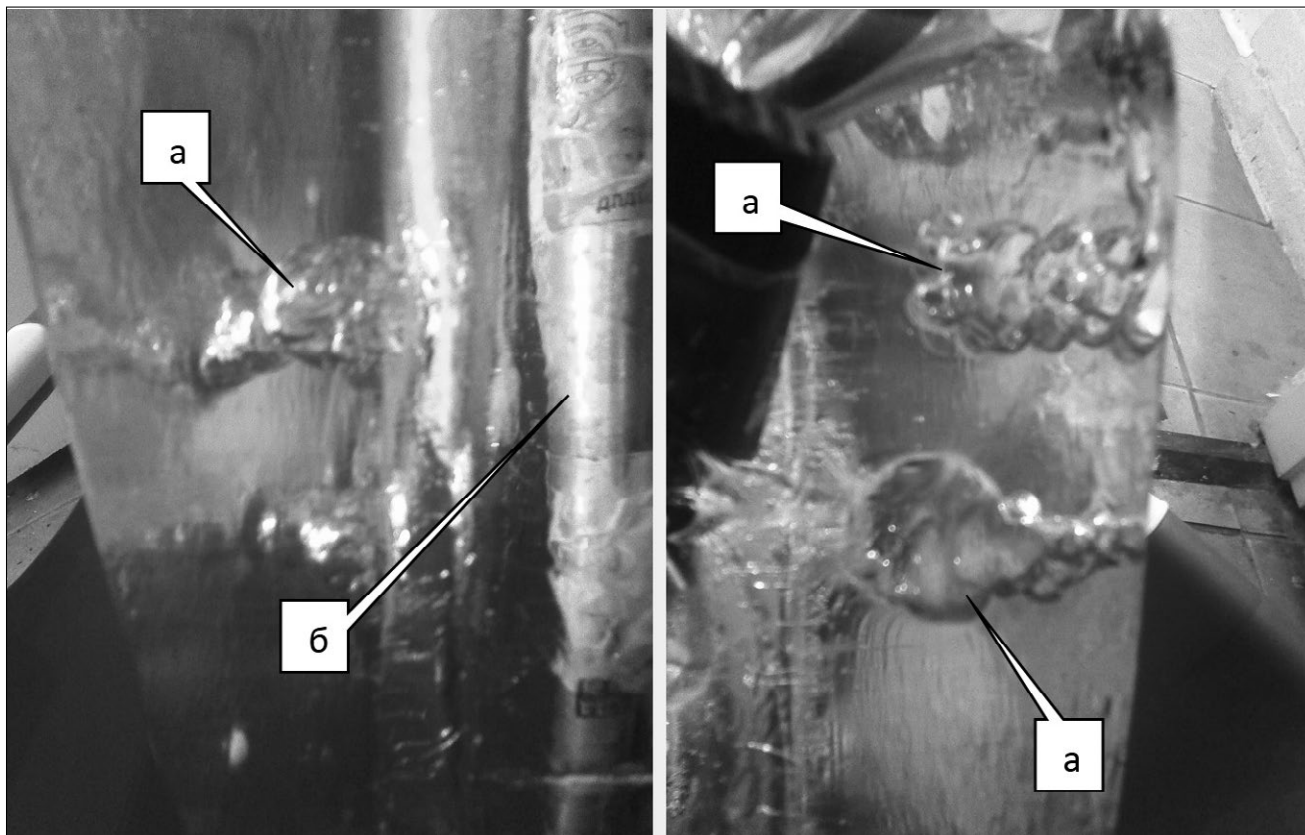


Рис. 5. Каналы из пузырей воздуха (а), сформированные во льду в ходе всестороннего промерзания воды рядом с датчиком порового давления (б). Опыт в Москве 29.01.2018 г.

воздуха в положительную область. Эта реакция связана с прекращением процесса промерзания, который является причиной избыточного давления. Температура воды реагирует с заметным запаздыванием (см. рис. 4).

Натурные опыты в грунтовом массиве должны были показать чувствительность датчика порового давления к динамическим нагрузкам для условий супесчаного пятна-медальона на дренированном участке тундры и на примере заторфованной супеси в основании насыпи железной дороги на заболоченном участке в сентябре 2018 г.

После установки датчика в пятно-медальон (рис. 2б) наблюдался постепенный рост порового давления в результате постепенного поступления влаги из грунтовых пор через керамическую мембрану. Не дождавшись окончательной выстойки этого давления, в 9 час 50 мин. было оказано динамическое воздействие на поверхность грунта, что привело к резкому росту порового давления в результате перехода части влаги из грунтовых агрегатов в свободное состояние (рис. 6). При этом грунт практически потерял несущую способность по крайней мере на 2 часа.

Нарушенное состояние грунта сохранялось всю ночь. Через 10 часов замеры порового давле-

ния показали ряд стабильных значений 102.1 кПа, после чего опять было приложено динамическое воздействие в течение 3 мин. Рост порового давления начался сразу вслед за приложением нагрузки и продолжился в течение 1 часа 15 мин, после чего начался процесс выстойки (рис. 7).

В обоих случаях температура грунта в ходе опытов менялась не более чем на 1°C. Датчик порового давления показал устойчивость работы и чувствительность, достаточную для

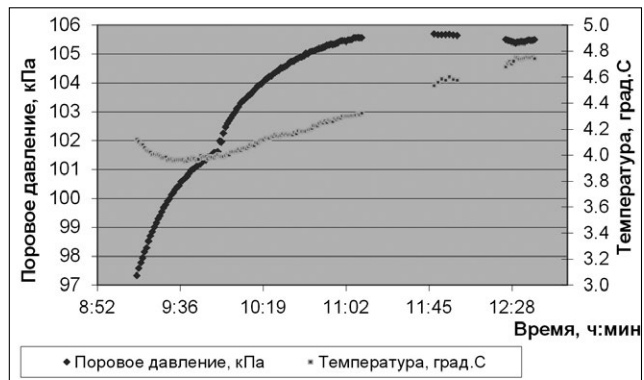


Рис. 6. Начальная выстойка и реакция грунта пятно-медальона на глубине 0.30 м на динамическое воздействие на поверхность грунта (2 Гц, 50 кПа – в течение 3 мин).

диагностики тиксотропного разжижения оттаивающих грунтов.

Второй натурный опыт должен был показать возможности отслеживания реакции грунтового массива на прохождения поезда на участке развивающейся многолетней просадки насыпи. Участок расположен в пределах примыкания к насыпи травянистого кочкарного болота. Датчик простоял в грунте ночь, выстаиваясь без производства измерений. За 15 мин до начала замеров прошел большой товарный поезд с углем. Воздействие продолжалось около 3 мин, после чего через 1.5 часа прошли дрезина и пассажирский поезд. Однако столь интенсивные воздействия явно не отразились на флуктуациях порового давления (рис. 8). По-видимому, это связано с иным механизмом развития деформаций в водонасыщенных грунтах по сравнению с относительно дренированными буграми медальонной тундры.

Появление новых технологических возможностей по прямому измерению порового давления в грунтовой массе открывает дорогу для

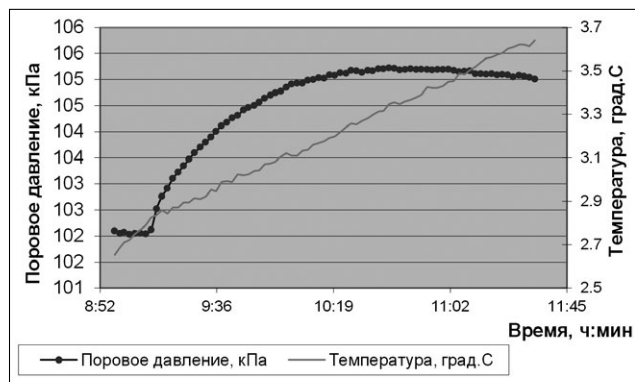


Рис. 7. Ночная выстойка (22 часа) и реакция грунта пятна-медальона на глубине 0.30 м на динамическое воздействие на поверхность грунта (2 Гц, 50 кПа в течение 3 мин).

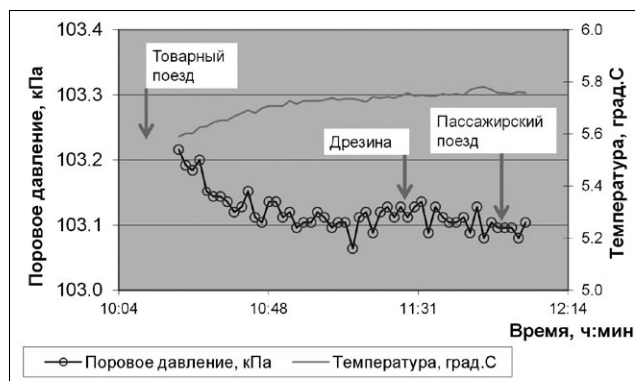


Рис. 8. Ночная выстойка (21 час) и реакция грунта заболоченного участка на глубине 0.30 м на динамическое воздействие поезда на основание насыпи.

постановки задач детального исследования механизма просадки насыпей, опирающихся на частично оттаявшие грунты, изученного рядом авторов [1, 3, 4].

Источник финансирования. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме №г.р. ААА-А-19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыдышко П.И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты // Криосфера земли. 2017. Т. XXI. №4. С. 43-57.
2. Якобсон А., Пуш Р. Явление тиксотропии в перемытых мягких глинах // Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них. Труды Междунар. симп. (14-24 сентября 1971 г.). М.: Изд-во МГУ, 1972. С. 25-34.
3. Ma W., Chen T. Analysis of permanent deformations of railway embankments under repeated vehicle loadings in permafrost regions // Sciences in cold and arid regions. V. 7. Is. 6. P. 645-653.
4. Xiaoliang, Y., Junlin Q. Vehicles loading effects on thawing embankment // Проблемы инженерного мерзлотоведения: матер. IX Междунар. симпозиума. /Отв. ред. Р.В. Чжан. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. С. 343-348.

REFERENCES

1. Dydyshko, P.I. *Deformatsii zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puti i ikh ustranenie v usloviyakh vechnoi merzloty* [Deformations of the road bed of the railway track and their elimination in the permafrost]. *Kriosfera Zemli*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 43-57. (in Russian)
2. Jacobson, A., Push, R. *Yavlenie tiksotropii v peremyatykh myagkikh glinakh* [The phenomenon of thixotropy in crushed soft clay]. *Proceedings of the Intern. Symp. (September 14-24, 1971) Engineering-geological properties of clay rocks and processes in them*. Moscow, MGU Publ., 1972, pp. 25-34. (in Russian)
3. Ma, W., Chen, T. Analysis of permanent deformations of railway embankments under repeated vehicle loadings in permafrost regions. *Sciences in cold and arid regions*, 2015, vol. 7, issue 6, pp. 645-653.
4. Xiaoliang, Y., Junlin, Q. Vehicles loading effects on thawing embankment. *Proc. IX International Symposium. Problems of permafrost engineering*. R.V. Zhang, Ed-in-Chief. Yakutsk, Melnikov Institute of Cryology SB RAS Publ., 2011, pp. 343-348/

SIGNIFICANCE AND TECHNOLOGICAL CAPACITIES OF NATURAL STUDY OF THE GROUND PORE PRESSURE DYNAMICS UNDER THE FREEZING AND THAWING CONDITIONS

© 2019 A. A. Ginzburg^{1,*}, R. G. Kal'bergenov¹, V. S. Isaev^{2,***}, G. S. Tipenko¹,
D. O. Sergeev^{1,**}, A. N. Khimenkov¹

¹*Sergeev Institute of Environmental geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

**E-mail: galab3@yandex.ru*

***E-mail: cryo2@yandex.ru*

²*Lomonosov Moscow state university, Geological Faculty,
Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

****E-mail: tpomed@yandex.ru*

Actual geotechnical monitoring systems and models of geocryological processes are aimed at assessing and preventing hazardous dynamic impacts on infrastructure facilities in the Arctic and Subarctic of Russia. The level of methodological support and hardware development of these systems are insufficient in Russia in the context of a changing climate, growing environmental impact and decreasing quality of geological survey and design. Pore pressure is successfully studied at the sample level in the laboratory and in the field by using the static sensing method, however, the dynamics of pore pressure and the physical patterns of this dynamics in soil massifs remain studied inadequately. For theoretical reasons, pore pressure should change under the influence of processes associated with freezing and thawing, and, consequently, it should affect the intensity of gas hydrate dissociation as well as the mechanical properties of soils. The modern technological base provides new opportunities for the study of the pore pressure dynamics in the soil mass. This opens prospects for improving geotechnical monitoring systems for the protection of infrastructure facilities from adverse natural and man-made impacts.

Keywords: *pore pressure, soil freezing, thixotropic liquefaction of soil, cryogenic heaving.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019582-88>