

## Акустическая эмиссия мерзлых грунтовых оснований в условиях повторно-переменного термомеханического нагружения

Е. А. Новиков,<sup>\*</sup> М. Г. Зайцев,<sup>†</sup> Е. А. Клементьев<sup>‡</sup>

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Россия 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4

(Статья поступила 24.10.2019; Подписана в печать 15.01.2020)

Экспериментально установлены закономерности акустической эмиссии в мерзлых грунтах различного вещественного состава, подверженных многократным циклам растепления-заморозки и находящихся при этом под действием квазистатической одноосной механической нагрузки. Исследовано влияние на эти закономерности гранулометрического состава грунта, степени его засоленности, переменной интенсивности температурного воздействия и неоднородности распределения термического градиента. Представлены характеристики и конструктивное исполнение необходимого для выполнения данных исследований аппаратного измерительного комплекса. Последний также позволяет верифицировать результаты акустических измерений параллельно получаемыми данными ультразвукового прозвучивания и измерения сопротивления вдавливания в грунт зонда. Изложена и обоснована методика интерпретации установленных акустико-эмиссионных закономерностей, позволяющая по параметрам и характеру акустической эмиссии грунтового материала с учетом действия вышеуказанных факторов судить о его несущей способности и стадии деформированного состояния.

PACS: 43.58.+z.

УДК: 622:550.8.05.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, мерзлый грунт, основания и фундаменты, устойчивость, деформированное состояние.

### ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование известных и создание новых методов изучения состояния грунтов в условиях их механического и температурного нагружения [1, 2] является актуальной проблемой в связи с отсутствием надежных и экономичных способов мониторинга несущей способности грунтовых оснований инженерных сооружений в северных регионах. Традиционно используемые в таких случаях прямые деформационные [3, 4] или активные геофизические [5] измерения недостаточно эффективны по причине высокой трудоемкости, сложности реализации в режиме мониторинга и неоднозначности интерпретации их результатов.

Настоящая работа охватывает вопросы геомеханики и геокриологии, т.к. на несущую способность грунтовых массивов существенное влияние оказывают как величина приложенной к ним механической нагрузки, так и колебания воздействующих на них температур. Последнее может быть связано одновременно с климатическими процессами и с локальным растеплением в результате воздействия техногенных источников тепла.

В рамках предыдущих исследований [6–9] уже созданы объективные предпосылки к использованию стимулированной термомеханическим нагружением акустической эмиссии в качестве носителя информации о процессах дезинтеграции и/или консолидации гео-

среды. Однако для разработки соответствующих способов геоконтроля ранее проведенные исследования должны получить развитие в части установления новых закономерностей акустической эмиссии разнородных мерзлых грунтов при их повторно-переменном термомеханическом нагружении и в части определения влияния на эти закономерности различного рода неопределенностей и помеховых факторов.

### 1. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Конструкция лабораторной установки для выполнения измерений по методу термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) приведена на рис. 1.

Конструкция выполнена на базе из металлических стержней 1 и стопорных гаек 2. Между опорными плитами 3 и 4 размещался аналоговый динамометр ДС-1 5. Нагружение выполнялось посредством гидравлического домкрата 6, опирающегося на металлическую плиту 7. Создаваемое домкратом давление передавалось на плиту 8 и далее через опорное кольцо 9 и поршень 10 сообщалось пробе. Проба грунта размещалась в металлической колбе 11, в нижней части которой выполнено резьбовое отверстие для волновода из дюраля под ультразвуковой преобразователь. Верхнее отверстие колбы 11 запечатывалось поршнем 10. В центре последнего соосно с нижним волноводом выполнено резьбовое отверстие для второго дюралевого волновода 12 под ультразвуковой (УЗ) преобразователь. Помимо этого, в поршне 10 имеется сквозное резьбовое отверстие для волновода 13 под приемный преобразователь АЭ и три отверстия, которые также при-

\*E-mail: e.novikov@misis.ru

†E-mail: michailzaytsev1997@gmail.com

‡E-mail: evgeniy-klementevof@mail.ru.

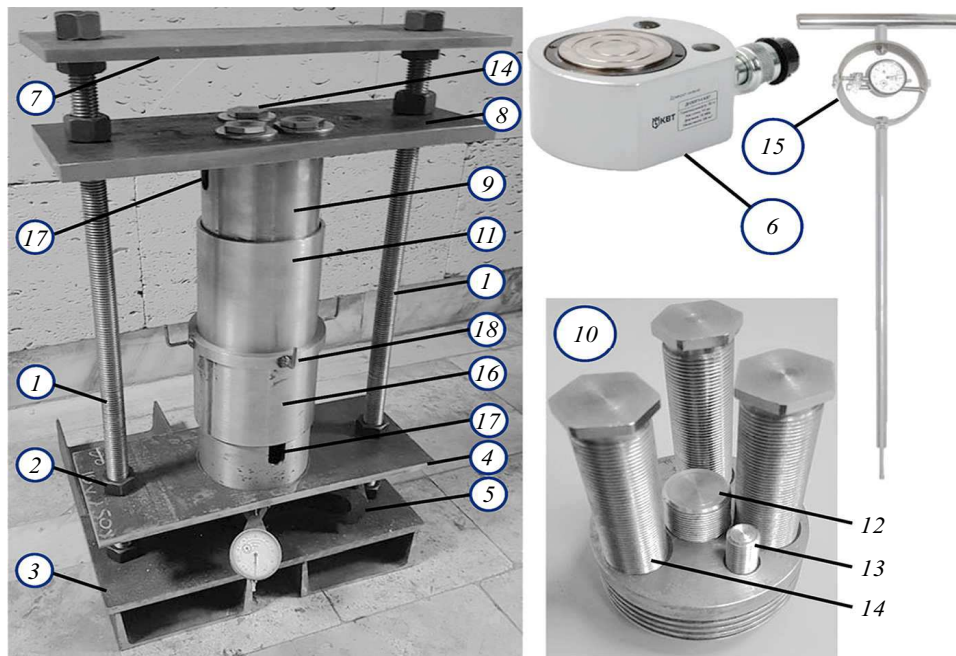


Рис. 1: Лабораторная установка для термоакустикоэмиссионных испытаний образцов мерзлых грунтов, находящихся под действием механических напряжений

сутствуют на плите 7 и предназначены для доступа индентора 14 к пробе. Давильное устройство (домкрат) 6 вместе с плитой 7 снимаются со стержней 1. Сохранение нагрузки на пробе достигается за счет фиксации плиты 8 стопорными гайками 2. С целью предотвращения просачивания грунта через вышеуказанные три отверстия, каждое из них снабжено цилиндрической резьбовой заглушкой 14, извлекаемой только на время испытаний пробы методом статического зондирования. Пробы изготавливались путем перемешивания песчано-глинистой навески миксером. Соотношение компонент в пробе обеспечивалось лабораторными весами типа ВК-3000. Зондирование грунта выполнялось плотномером пенетрационного статического действия В-1 15. Внутри кольца 9 размещались приемный преобразователь АЭ серии GT-200, передающий сигналы на измерительную систему А-Line 32D через предусилитель ПАЭФ-014, а также излучающий УЗ преобразователь импульсного прибора УД2-16. Приемный УЗ преобразователь этого прибора располагался внутри кольца 16. Кольца 9 и 16 обеспечивали защиту преобразователей от раздавливания при механическом нагружении. Вывод сигнальных цепей преобразователей выполнялся через пропилы 17 в указанных кольцах. Нагревательные элементы в количестве четырех штук размещались на стержнях 18, равномерно установленных по периметру колбы 10. Криотермическое воздействие осуществлялось путем размещения представленной на рис. 1 установки в морозильной камере типа SE 10-45.

В ходе эксперимента образцу сообщались ступенчатые механические нагрузки в диапазоне до 7 МПа.

Каждая величина нагрузки выдерживалась в течении времени, достаточного для полного промерзания образца и его последующего оттаивания термоударным воздействием (4 – 6 часов). После этого грунту сообщалась следующая квазистатическая нагрузка, которая могла быть как больше, так и ниже нагрузки предыдущей ступени. Также с целью изучения влияния режимов нагрева результаты экспериментов, часть из них выполнена при разогреве до 180°C, другая часть — при 95°C.

В связи с длительностью каждого эксперимента (до 32 часов), они выполнялись за несколько смен, между которыми измерения ставилась на паузу. Время приостановки экспериментов выбиралось таким образом, чтобы занимать стадию глубокой заморозки грунта в течении которой полезных сигналов практически не формируется.

## 2. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Регистрировались следующие параметры ТАЭ: активность  $\dot{N}_\Sigma$ , средняя длительность импульсов  $D_{imp}$ , амплитуда импульсов  $A_{imp}$  и число выбросов в импульсе  $V_{imp}$ . Для численной оценки этих параметров рассчитывались их средние значения, относительно временных областей (стадий) замораживания  $M(V_{imp}^{зам})$ ,  $M(A_{imp}^{зам})$ , оттаивания  $M(\dot{N}_\Sigma^{от})$ ,  $M(D_{imp}^{от})$ ,  $M(V_{imp}^{от})$ ,  $M(A_{imp}^{от})$ , интенсивного нагрева (термического нагружения)  $M(\dot{N}_\Sigma^H)$ ,  $M(D_{imp}^H)$  уже полностью оттаявшего

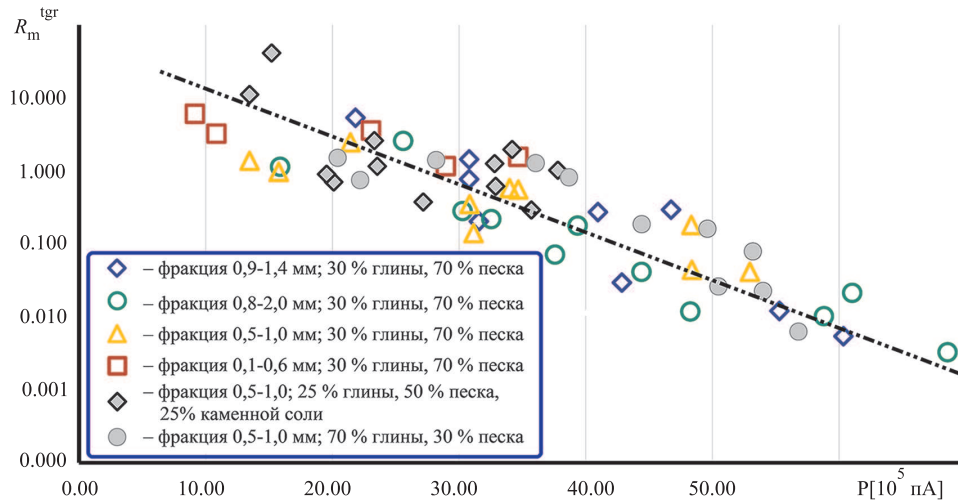


Рис. 2: Зависимость между значениями  $R_{mtgr}(P)$  образцов песчано-глинистого грунта и величинами действующей на них механической нагрузки  $P$

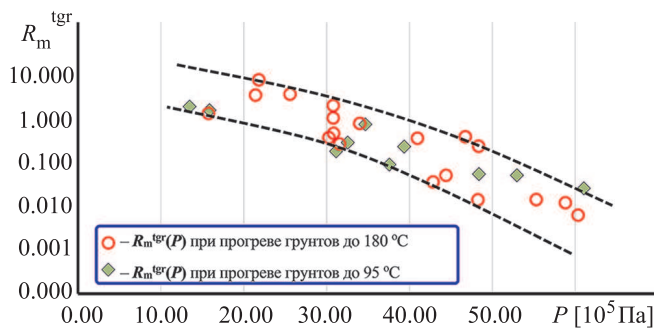


Рис. 3: Распределение значений  $R_{mtgr}(P)$  образцов грунтов при нагреве до 95 °С или 180 °С

Таким образом, коэффициент  $R_m^{tgr}$  показывает отношение меры интенсивности деструкции грунтового материала при удалении ледового каркаса к характеристике, отражающей его устойчивость к совокупности действующих при полном промерзании образца напряжений. Физический смысл  $R_m^{tgr}$  — комплексный показатель устойчивости грунтового основания к термомеханическому нагружению, учитывающий как изменение стабильности соответствующего грунтового материала в состояниях полного промерзания и полного оттаивания, так и при переходе между этими состояниями.

грунта.

Для взаимной увязки указанных параметров введен комплексный показатель

$$R_m^{tgr} = \frac{M(\dot{N}_\Sigma^H) \cdot M(D_{imp}^H)}{M(\dot{N}_\Sigma^{OT}) \cdot M(D_{imp}^{OT})} / \frac{M(A_{imp}^{OT}) \cdot M(V_{imp}^{OT})}{M(A_{imp}^{зам}) \cdot M(V_{imp}^{зам})} \quad (1)$$

Физический смысл входящего в (1) показателя  $F = [M(\dot{N}_\Sigma^H)M(D_{imp}^H)]/[M(\dot{N}_\Sigma^{OT})M(D_{imp}^{OT})]$  — отношение устойчивости грунтового материала к термомеханическому воздействию при полностью оттаявшем связующим глинистоводном цементе к стойкости этого же грунта в частично талом состоянии под такой же механической нагрузкой.

Физический смысл показателя  $R = [M(A_{imp}^{OT})M(V_{imp}^{OT})]/[M(A_{imp}^{зам})M(V_{imp}^{зам})]$  — отношение средней энергии актов деструкции на стадии оттаивания к средней энергии импульсов, испускаемых структурными связями льда при их переходе в напряженное состояние под действием внешней механической нагрузки ( $P$ ) и морозного пучения.

На рис. 2 представлен характерный вид функции  $R_m^{tgr}()$ , полученной на грунтах с существенно различным фракционным составом песчаного наполнителя и степенью засоленности. Влагонасыщение проб — 30% от сухой массы. На рис. 3 представлены результаты испытания одинаковых проб при различных величинах стимулирующего информативный акустико-эмиссионный отклик термического воздействия.

Из вышеприведенных функций  $R_{mtgr}(P)$  следует, что несмотря на существенно разнородную зернистость, вещественный состав и в т.ч. степень засоленности проб, все полученные на них результаты подчиняются одной закономерности, которая принципиальна пригодная для решения обратной задачи — определения деформированного состояния грунта по параметрам его акустико-эмиссионного отклика на термическое воздействие. При этом неравномерность последнего мало влияет на качество измерительной информации. Это следует из того, что нет принципиальных различий в форме распределений  $R_{mtgr}(P)$ , полученных при разогреве грунтов до 95 °С или до 180 °С.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены термоакустикоэмиссионные эффекты возникающие при многократном чередовании циклов заморозки и оттаивания грунта в ходе развития его деформированного состояния под действием квазистатической механической нагрузки. Экспериментально установлены закономерности ТАЭ грунтов в функции от режимов их термомеханического нагружения, исходной структуры (в т.ч. гранулометрического состава) и вещественного состава (в т.ч. обводненности и засоленности). Разработана и обоснована методика интерпретации указанных закономерностей, позволяющая по методу ТАЭ оценить изменения показателей деформированного состояния и устойчивости

грунтов. Показано отсутствие влияния на получаемые по предложенному методу результаты таких неопределенностей (помеховых факторов), потенциально возникающих при натурных исследованиях, как величина и неравномерность стимулирующего информативный отклик теплового потока, неоднородность контролируемого грунта по вещественному и/или фракционному составу, различия в засоленности. Обосновано конструктивное исполнение и приборный состав необходимого для выполнения данных исследований измерительного комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 18-77-00009.

- 
- [1] Озган Э., Серин С., Эртюрк С., Вурал И. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015, № 2. С. 21.  
[2] Ривкин Ф. М., Власова Ю. В., Пармузин И. С. // Криосфера Земли. 2017. 21, № 6. С. 26.  
[3] Котов П. И. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 3. С. 23.  
[4] Пилягин А. В. Об определении модуля общей деформации грунтов по данным испытаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 2. С. 25.  
[5] Зыков Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. / М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. С. 272.  
[6] Shkuratnik L. V., Novikov E. A. // Gornyi Zhurnal. 2017. N 6. P. 21.  
[7] Zhenlong Ge, Qiang Sun // Engineering Fracture Mechanics. 2018. 200. P. 418.  
[8] Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Oshkin R.O., Zaitsev M.G. // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017. 54. N 2. P. 81.  
[9] Новиков Е.А., Шкуратник В.Л., Ошкин Р.О. // Криосфера Земли. 2016. 20. № 1. С. 99.

---

## Acoustic emission from frozen soil foundations during their re-alternating thermomechanical loading

E. A. Novikov<sup>a</sup>, M. G. Zaitsev<sup>b</sup>, E. A. Kliment'ev<sup>c</sup>

National University of Science and Technology (MISiS). Moscow, 119049 Russia  
E-mail: <sup>a</sup>e.novikov@misis.ru, <sup>b</sup>michailzaytsev1997@gmail.com, <sup>c</sup>evgeniy-klementevof@mail.ru

The regularities of acoustic emission in frozen soils of different material composition exposed to multiple cycles of thawing-freezing and being under the influence of quasi-static uniaxial mechanical load were experimentally established. The influence of the soil texture, the degree of its salinity, the variable intensity of the temperature effect and the heterogeneity of the distribution of the thermal gradient on these regularities was studied. The characteristics and design of the hardware system necessary to perform these studies were presented. This system also makes it possible to verify the results of acoustic measurements simultaneously by their comparison with the obtained data of ultrasonic sounding and the results of measurement of the resistance of the probe penetration into the soil. The technique of interpretation of the established acoustic-emission regularities was described and substantiated which allows to estimate the bearing capacity and the stage of the deformed state by the parameters and the nature of the acoustic emission of the soil material taking into account the action of the above factors.

PACS: 43.58.+z

Keywords: acoustic emission, frozen soil, foundations and bases, stability, deformed state.

Received 24 October 2019.

### Сведения об авторах

1. Новиков Евгений Александрович — канд. техн. наук, доцент; тел.: (499) 230-25-93, e-mail: e.novikov@misis.ru.
2. Зайцев Михаил Геннадьевич — студент; тел.: (499) 230-25-93, e-mail: michailzaytsev1997@gmail.com.
3. Клементьев Евгений Андреевич — студент; тел.: (499) 230-25-93, e-mail: evgeniy-klementevof@mail.ru.