

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ ТВЕРДЕЮЩИМИ РАСТВОРАМИ И (ИЛИ) ПУТЕМ КРИОТЕРМИЧЕСКОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

Е.А. Новиков¹, Е.А. Клементьев¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: e.novikov@misis.ru

Аннотация: Суть работы состоит в решении задачи по разработке и верификации методических подходов, позволяющих использовать особенности термостимулированной акустической эмиссии грунта, подвергнутого химико-физическому укреплению, для контроля изменения его устойчивости под действием климатических факторов и нагрузки от расположенного на нем инженерного сооружения. Для решения задачи проведена серия экспериментов, заключавшихся в установлении параметров акустической эмиссии в ходе пассивных и активных измерений на различных закрепляемых исходно рыхлых грунтах при их нагружении по схеме Кармана со ступенчато возрастающей квазистатической нагрузкой. Пассивные акустические измерения предполагали регистрацию акустической эмиссии, испускаемой самими структурными связями образцов под действием внутренних напряжений, возникающих при наложении полей механических нагрузок и от прогрева геоматериала. Активные акустические измерения выполнялись по схеме, совмещающей термическую активизацию структурных связей грунта и его прозвучивание с применением искусственного внешнего источника нормированного сигнала, по изменению параметров которого после прохождения через объект контроля судят о развитии деформированного состояния последнего. С учетом установленных в ходе опытов закономерностей обоснованы подходы к интерпретации измерительных данных, позволяющие получить свободный от влияния помеховых факторов численный акустико-эмиссионный критерий оценки изменения деформационного состояния предварительно отвержденных грунтовых материалов под действием внешних факторов. Достоверность получаемых по предлагаемому методу данных подтверждена результатами сравнительных испытаний аналогичных проб с использованием измерений ультразвуковых и деформационных по ГОСТ 21153.2.

Ключевые слова: грунты, температурный режим, несущая способность, напряженное состояние, искусственное упрочнение, акустическая эмиссия, закономерности, эксперимент, разработка способов геоконтроля, помеховые факторы.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-77-00010.

Для цитирования: Новиков Е. А., Клементьев Е. А. Исследование методом термостимулированной акустической эмиссии прочностных свойств грунтов, закрепленных твердеющими растворами и (или) путем криотермической консолидации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №4. – С.134–155. DOI:10.25018/0236_1493_2022_4_0_134.

Strength properties analysis of soil after hardening and/or cryogenic thermal reinforcement using the method of thermally stimulated acoustic emission

E.A. Novikov¹, E.A. Klementyev¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: e.novikov@misis.ru

Abstract: This study aims to develop and verify methodical approaches which enable using thermally stimulated acoustic emission in soil subjected to chemical or physical reinforcement for the soil stability control in case of climatic impact or load exerted by surface engineering facilities. To this effect, a series of experiments was carried out to find acoustic emission parameters in passive and active measurements performed in initially loose and differently reinforced soil in von Karman compression at step-by-step increment in quasi-static load. The passive acoustic measurements assumed recording acoustic emission of structural bonds in the test samples under the influence of the internal stresses which appear in overlapping of fields generated by the mechanical loading and warm-up of a geomaterial. In turn, the active acoustic measurements combined thermal activation of structural bonds in soil and its sounding using an artificial external source of a rated signal; the change in the signal parameters after passing a test sample allows judging on development of deformation in this sample. Considering the experimental patterns, the measurement interpretation approaches are substantiated. These approaches provide the noise-free numerical acoustic emission criterion of change in deformation condition of soil preliminary hardened or reinforced under the external effects and impacts. The reliability of data obtained using the proposed method is proved by comparative tests of similar samples with deformation and ultrasound measurements according to the State Standard GOST 21153.2.

Key words: soil, temperature mode, load-bearing capacity, stress state, artificial hardening, acoustic emission, patterns, experiment, development of geocontrol methods, noise factors

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 21-77-00010.

For citation: Novikov E. A., Klementyev E. A. Strength properties analysis of soil after hardening and/or cryogenic thermal reinforcement using the method of thermally stimulated acoustic emission. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(4):134-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_134.

Введение

Устойчивость объектов гражданского и промышленного строительства во многом зависит от несущей способности грунтовых оснований, на которых располагаются фундаменты этих объектов. Однако в ряде случаев указанные основания исходно не обладают нужной структурной стабильностью, особенно

в условиях воздействия климатических и гидрологических факторов. В связи с этим такие «слабые» грунты подвергают искусственному упрочнению одним из следующих методов закрепления твердеющим раствором, отличающихся типом раствора: смолоинъекция, битумизация, глинизация, силиктизация, цементация и др. Также существуют особые

способы упрочнения, например, создание ледопородного ограждения, электрохимическое, упрочнение термическим сплавлением и др., которые находят применение для решения узконаправленных задач.

В то же время, вне зависимости от выбора технологии искусственного упрочнения, на сегодняшний день невозможно только за счет расчетов и компьютерного моделирования [1] обеспечить близость проектных характеристик закрепляемых грунтов к реальным. Зачастую отсутствует исчерпывающая информация о состоянии грунтового массива после его закрепления. Недостаёт сведений о наличии в нем очагов развития деформационных процессов, осадок, смещений. Не всегда возможно просчитать влияние климатических факторов и вызванное строительством изменение гидрологических условий. Эти и ряд других неопределенностей придают особенную важность достоверности результатов инженерно-геологических изысканий, проводимых с целью установить реально достигнутое качество упрочнения грунтового массива.

Такие изыскания, как правило, сводятся к определению деформационных и структурных характеристик kernового материала, которые опционально могут дополняться какими-либо площадными исследованиями [2, 3]. В качестве последних обычно выбирают пенетрационные испытания инденторами (сваями, штампами) различной конструкции и использование методов, предполагающих измерение нагрузок сжатия или среза при различных схемах механического нагружения геосреды. Такого рода исследования достаточно информативны, однако сопряжены с большими временными затратами и не позволяют вести долгосрочные наблюдения в режиме мониторинга. Как следствие, по ним невозможно проследить эволюцию нап-

ряженно-деформированного состояния грунтового основания, чтобы своевременно идентифицировать очаги развития деструктивных процессов.

Реже отбор проб грунта с их последующим испытанием в лабораторных условиях дополняется обследованием натурного грунтового массива с применением методов геоконтроля [4], основанных на исследовании удельного эффективного (кажущегося) электрического сопротивления [5], диэлектрической и магнитной проницаемости [6, 7], естественного радиоактивного фона и/или рассеянного излучения, возникающего при нейтронном или γ -квантами облучении целевого участка массива пород [8], характеристик кинематики (например, время пробега от точки возбуждения до пункта регистрации) и динамики (амплитуда, фаза и др.) зондирующих геосреду упругих волн сейсмического и ультразвукового диапазона частот [9–11]. Геофизические методы позволяют осуществлять контроль в режиме мониторинга, дают возможность детально картировать границы инженерно-геологических элементов и достаточно достоверно определяют изменение свойств в объеме грунтовой толщи [12–14]. В то же время, на практике применение этих методов носит достаточно ограниченный характер по причине высокой трудоемкости их реализации, необходимости применения дорогостоящего оборудования и узкоспециализированного программного обеспечения, а также в связи с недостатком специалистов, профессионально владеющих методиками обработки и интерпретации результатов такого рода геофизических исследований.

Отмеченное предопределяет актуальность совершенствования известных методов геоконтроля и разработки новых методов исследования качества упрочнения грунтового массива [15], сочетающих относительную простоту обработки и ин-

терпретации измерительных данных с достаточной достоверностью получаемых результатов. Этим требованиям удовлетворяет рассматриваемый в настоящей работе метод термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) [16, 17].

В рамках предшествующих работ по методу ТАЭ созданы научно-методические основы оценки качества ледопородных ограждений и мерзлых грунтовых оснований по характерным проявлениям в них акустической эмиссии при локальном повышении температуры [18 – 20]. Обоснованы подходы к получению численных ТАЭ критериев, позволяющих судить о развитии деформированного состояния криогенных грунтов с существенно неоднородной структурой и свойствами под влиянием внешних повторно-переменных термобарических воздействий [21]. Экспериментально выявлено наличие акустико-эмиссионного эффекта, который можно рассматривать в качестве некоего специфического, характерного для рыхлых криогенных грунтов аналога эффекта Фелисити [22]. Показана перспективность применения связанных с этим эффектом закономерностей для контроля стабильности (структурной устойчивости) и несущей способности локально растепляемых мерзлых грунтов и для получения сведений об истории изменения их напряженного состояния.

Вместе с тем результатов, полученных в рассмотренных выше работах, все еще недостаточно для распространения области применения метода ТАЭ на какие-либо другие грунты, кроме криогенных. Это ограничение следует из высокой чувствительности ранее обнаруженных термоакустикоэмиссионных эффектов и особенностей характера ТАЭ, использованных для разработки численных ТАЭ критериев оценки изменения устойчивости грунтовых материалов, специфики в организации их структурных связей.

Такая чувствительность является преимуществом метода ТАЭ при исследовании ледопородных матриц, позволяя, например, точно идентифицировать переход несущего ледового каркаса из стадии упругих деформаций в область хрупкого разрушения. Однако она же выступает помеховым фактором при исследовании предлагаемым методом деструкции структурных связей, образованных между частицами грунта инъецированным в него твердеющим раствором, которые по своим физико-механическим и теплофизическим свойствам, а следовательно, и по механизмам генерации информативной составляющей сигналов ТАЭ, фундаментально отличаются от криогенных структурных связей.

Сказанное ставит следующие основные задачи настоящего исследования:

- с учетом известных теоретических предпосылок разработать новые и пересмотреть существующие подходы к сбору, обработке и интерпретации первичной измерительной информации по методу ТАЭ;

- экспериментально установить параметры ТАЭ, чувствительные к эволюции структуры одновременно как критерически консолидированных, так и химически закрепленных грунтовых материалов различного состава;

- разработать показатель, пригодный для совместной обработки всей получаемой по методу ТАЭ полезной информации;

- путем сопоставления с результатами сравнительных испытаний аналогичных отвержденных проб методом ультразвукового прозвучивания и при их нагружении на прессе по ГОСТ 21153.2 верифицировать наличие пропорциональной взаимосвязи между изменением величин этого комплексного ТАЭ показателя и динамикой прочностных свойств обработанного твердеющими веществами грунтового массива.

Использованные материалы и оборудование

Эксперименты проведены на лабораторной установке, детальное описание конструкции которой представлено в [21]. Ее внешний вид и расположение основных функциональных элементов проиллюстрировано рис. 1.

Механическое нагружение грунтовых материалов предполагало заполнение ими металлического сосуда 1 с внутренней полостью размером $250 \times \varnothing 120$ мм, сверху закрывавшейся подвижным поршнем 2. При этом сосуд 1 и поршень 2 располагались между жестко закрепленными на несущем каркасе 3 опорными плитами 4 и 5. После чего поршню сообщалась нагрузка от размещенного над ним гидравлического домкрата ДН20П12, подсоединенного к помпе ПМН-7012УА с функцией удержания давления в интервале от 1 до 70 МПа. Подаваемая нагрузка контролировалась установленным под домкратом датчиком тензометрическим LSC-20Т с устройством индикации CAS NT-201А.

Перед началом и после завершения каждого эксперимента выполнялась

калибровка указанного датчика путем сличения его показаний с результатами измерений динамометром ДОСМ-3-5У при их совместном нагружении. Во время экспериментов данный динамометр не применялся, поскольку его предел измерений составляет 4 т, тогда как термоакустоэмиссионные испытания проводились при нагрузке до 12 – 15 т.

По внешнему периметру сосуда 1, как показано на рис. 1, равномерно размещались резистивные нагреватели 6 и высокотемпературный нагревательный кабель 7 под кожухом 8 из термоизоляционного материала, который минимизирует потери на рассеивание тепла вовне и тем самым обеспечивает эффективную подачу теплового потока внутрь колбы. Криотермическая консолидация проб грунта достигалась размещением всего стенда в сборе внутри морозильной камеры SE 20-45. Контроль за температурным режимом в ходе экспериментов осуществлялся измеритель-регистратором АТЕ-9380 с термопарами АТА-210.

Смонтированный над поршнем 2 блок регистрации измерительных дан-

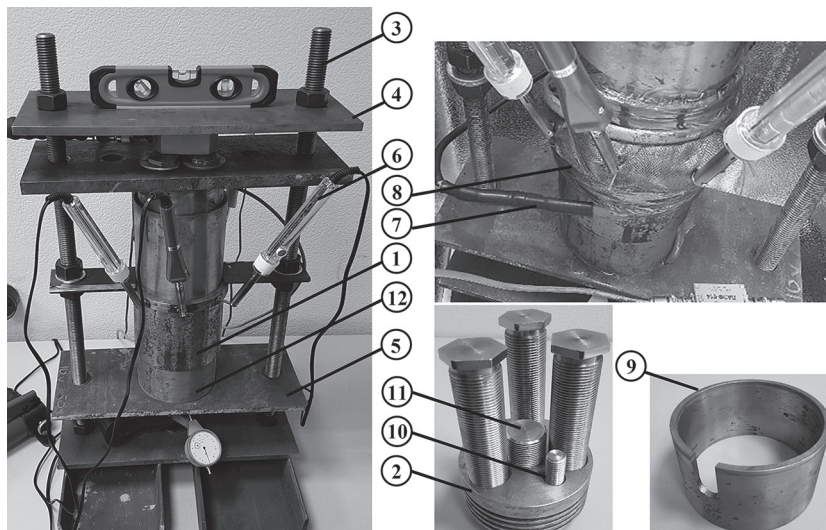


Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда термомеханического нагружения грунта

Fig. 1. Appearance of lab-scale thermomechanical loading machine for soil testing

Основные характеристики использованных в экспериментах проб (образцов)

Basic characteristics of test samples

Номер пробы	Состав пробы, % от общей массы				Тип связующего вещества	Криотермическая консолидация	$\sigma_{ск}$, МПа		
	глина	песок ($d_{cp} = [0,3; 0,8 \text{ мм}]$)	влага	связующее вещество			от	до	$M(\sigma_{ск})$
0–02	36,1	36,1	21,4	6,4	Этал 143-М	выполнена	1,38	1,62	1,48
1–00	38,1	38,1	23,8	отсутствует (рыхлый грунт)		выполнена	1,10	1,23	1,19
1–01	38,1	38,1	23,8	отсутствует (рыхлый грунт)		выполнена	1,16	1,28	1,26
1–02	37,7	34,3	22,6	5,4	Этал 143-М	выполнена	1,35	1,54	1,48
1–03	41,3	41,3	13,0	4,4	M500	не проводилась	0,38	0,46	0,42
1–06	22,1	22,1	12,0	43,8	M25	выполнена	1,72	1,97	1,81
1–07	14,8	14,8	8,9	61,5	M25	не проводилась	2,02	2,17	2,16
1–08	20,8	48,2	19,8	11,2	Этал 143-М	не проводилась	1,70	2,04	1,85
1–09	48,1	20,6	20,0	11,3	Этал 143-М	не проводилась	1,67	1,86	1,78

ных представлял собой защитное кольцо 9 с пропилом для вывода сигнальных цепей, внутри которого на волноводах 10 и 11 фиксировались, соответственно, акустико-эмиссионный датчик и приемный ультразвуковой преобразователь. Под днищем сосуда 1 установлено второе защитное кольцо 12, идентичное кольцу 9, с аналогичным 11 волноводом для излучающего ультразвукового преобразователя.

Для регистрации и первичной обработки параметров акустико-эмиссионного отклика грунтов использована измерительная система A-Line 32D в комплекте с акустико-эмиссионными датчиками серии GT и преусилителями типа ПАЭФ.

Ультразвуковые измерения реализованы с применением дефектоскопа ПУЛЬСАР-2.2 с датчиками сквозного прозвучивания П111-0.06-И2 (рабочая частота, согласно паспорту: 60 ± 10 кГц) и ультразвукового импульсного прибора УД2-16, укомплектованного отдельными пьезоэлектрическими преобразователями с номинальной частотой 100 кГц.

Характеристики использованных проб (образцов) приведены в таблице, где $\sigma_{ск}$ – предел прочности по ГОСТ 21153.2 контрольных образцов, изготовленных таким же образом, как испытанные по методу ТАЭ; $M(\sigma_{ск})$ – математическое ожидание $\sigma_{ск}$ после выбраковки дефектных образцов; d_{cp} – фракционный состав песчаного заполнителя пробы; M500, M25 – марка использованного в тампонажном растворе цемента; Этал 143-М – обозначение смоляного (эпоксидного) компаунда.

Методика постановки и проведения экспериментов

Равномерное распределение отвердителя и общая однородность проб обеспечивались путем их перемешивания лабораторным миксером в течение не менее чем 7 мин. Далее полученным грунтово-тампонажным материалом заполнялись пластиковые цилиндрические формы, совпадающие по диаметру с колбой 1 (рис. 1). В них указанный материал выдерживался вплоть до завершения им набора прочности: обработанные растворами на основе цемента ма-

рок М500, М25 грунты выдерживались от 25 до 30 сут; обработанные компаундом на основе смолы Этал 143-М — от 3 до 5 сут. После чего полученная агломерация перемещалась в колбу 1. Плотность прилегания пробы к стенкам последней достигалась за счет последующих инъекций по всему периметру колбы песчанисто-глинистой смеси текучей консистенции. Контрольные образцы, использованные в испытаниях по ГОСТ 21153.2, изготовлены идентичным образом. При этом, поскольку на прочностные свойства криогенных грунтов существенно влияет распределение льдистости по их объему, которое во многом уникально для каждого отдельного случая, контрольные образцы проб 1-00 и 1-01 получены путем непосредственного кернования этих проб.

Пробы, отмеченные в таблице как криотермически консолидированные, подвергались заморозке при температуре окружающей среды минус 20 °С в течение 12 ч перед каждой подачей на грунт высокотемпературных воздействий, создающих условия для формирования полезного акустико-эмиссионного отклика. При этом акустико-эмиссионные измерения проводились при отключенном морозильном оборудовании и с работающими в постоянном режиме нагревателями. В свою очередь, пробы, отмеченные в таблице как не подвергавшиеся криотермической консолидации, испытывались при комнатной температуре.

Для определения влияния на результаты термоакустэмиссионных измерений колебаний стимулирующего информативный отклик теплового потока, проба 1-08 испытана при электроснабжении только половины нагревателей. Это позволило прогреть центральную, наиболее удаленную от мест их расположения, часть пробы до 45–47 °С. Тогда как во всех прочих испытаниях,

выполняемых при работе всех установленных на стенде нагревателей, разогрев той же части пробы достигал 72–76 °С.

Механическая нагрузка P сообщалась пробам ступенчато, в интервале от 0,2–1,2 МПа до 10–12 МПа, с шагом возрастания между каждой предыдущей и каждой последующей ступенью в диапазоне 1,5–3,0 МПа. Конкретные параметры нагружения выбирались исходя из прочностных свойств каждого отдельного состава грунтово-тампажной смеси. Приведенные здесь значения нагрузок P на порядок превосходят полученные по ГОСТ 21153.2 значения $\sigma_{сж}$, поскольку последние характеризуют прочностные свойства закрепленных грунтовых агломераций, лишенных обжатия в плоскости, перпендикулярной вектору приложения нагрузки (по ГОСТ 21153.2 образцы испытывались без надетой по периметру опалубки). В свою очередь, при испытании по методу ТАЭ грунты размещались в герметичной металлической колбе 1, которая блокировала развитие выпираний и сдвиговых деформаций в «боковой» плоскости, чем улучшала устойчивость пробы в целом. Соответственно для перевода идентичных по составу проб на одну и ту же стадию деформированного состояния при их нагружении по ГОСТ 21153.2 и посредством представленного на рис. 1 стенда в случае последнего нужно приложить пропорционально большие усилия.

Каждый цикл испытаний, выполняемых при выдержке пробы на одной ступени механического нагружения, включал следующие этапы.

Этап 1. Прогрев пробы от комнатной температуры или температуры криотермической консолидации вплоть до достижения грунтом рабочей температуры T_{max} , когда скорость ее возрастания не превышает ΔT при работающих в одинаковом режиме нагревателях.

Величина ΔT , представляющая собой флуктуацию температуры пробы, размещенной в испытательной установке, обусловленную естественными колебаниями температуры воздуха в помещении, где проводятся испытания, в данном случае составила 2 К/ч.

Этап 2. Выдержка разогретой до T_{\max} пробы при работающих в таком же, как на первом этапе, режиме нагревателей в течение не менее 15 мин, плюс отрезок времени, на протяжении которого после этого выполняется прозвучивание пробы упругими волнами ультразвукового диапазона частот. Продолжительность указанного отрезка определялась как временной период, в течение которого достигается стабилизация E_{sour} и V_{imp} на уровне, при котором отклонение всех измеряемых за не менее чем 5 мин значений данных параметров от своих средних для данного этапа значений не превышает $\pm 3\%$.

Пробы № 0-02, 1-00, 1-01, 1-02, 1-03, 1-06 и 1-09 испытаны с применением только УД2-16. Пробы № 1-07, 1-08 подвергнуты прозвучиванию как с применением ПУЛЬСАР-2.2, так и при помощи УД2-16 для подтверждения надежности показаний последнего. Ограниченное применение ПУЛЬСАР-2.2 связано с конструктивными особенностями стенда (рис. 1), который еще на стадии проектных работ был в большей мере приспособлен к работе с УД2-16. В настоящее время проводится комплекс работ по пуску и настройке всех систем нового стенда с расширенным функционалом, конструкция которого в том числе лишена данного ограничения.

После завершения измерений по всем перечисленным выше этапам отключают нагреватели и дают пробе остыть за счет естественного конвекционного теплопереноса вплоть до достижения ее температурой величины T_{\min} , когда скорость ее изменения не превышает ΔT .

Методические подходы к обработке измерительной информации

Статистическая обработка всех зарегистрированных при выполнении экспериментов первичных измерительных данных показала рациональность использования в качестве информативных следующих параметров ТАЭ:

1. Активность \dot{N}_{Σ} [имп./с] — число зарегистрированных событий акустической эмиссии (АЭ) за единицу времени. Параметр \dot{N}_{Σ} обладает высокой чувствительностью к интенсивности процессов деструкции и перестройки структурных связей в геоматериале. Однако не дает представление о типе вовлеченных в указанные процессы связей. Например, по \dot{N}_{Σ} нельзя установить, превалирует в генерации сигналов АЭ разрушение слабых коагуляционных или прочных кристаллизационных связей, хотя это имеет первостепенное значение для аутентификации стадии развития деформированного состояния геоматериала.

2. Длительность импульса D_{imp} [мкс/с] — средний интервал времени между началом и концом испускания всех сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных за единицу времени. Причем генерация сигнала, как правило, прекращается либо при снятии нагрузки, либо в момент распада являющейся его источником структурной связи. Отсюда на основании того, что в рассматриваемой серии экспериментов нагружение выполнялось по схеме, не предполагающей формирования в пробе существенных процессов релаксации, физический смысл полученных значений D_{imp} определен как отрезок времени от перехода структурной связи в возбужденное состояние до момента потери ее целостности. Сказанное обосновывает применение D_{imp} в роли критерия ранжирования по прочностным свойствам структурных связей, дестабилизированных при той или иной нагрузке.

3. Число выбросов в импульсе V_{imp} [выбр./с] — количество превышений сигналом АЭ порогового уровня, отделяющего полезный сигнал от фоновых шумов. Значения V_{imp} приняты в качестве критерия оценки повторяемости пакетов событий АЭ, определяющего степень доверия к несомой ими информации. Изучение временного распределения V_{imp} является вспомогательным способом идентификации случайных выбросов АЭ в общем потоке акустико-эмиссионных событий, призванным повысить достоверность цензурирования по параметрическому анализу распределения D_{imp} .

4. Энергия источника E_{sour} [дБ/с] — мера сохраненной в зондирующей грунт упругой волне энергии после ее затрат на рассеивание, формирование концентраторов напряжений и структурную перестройку грунтового материала на пути указанной волны от ее излучателя через пробу до измерительного преобразователя. Под структурной перестройкой здесь понимается, например, проходящая с поглощением энергии переориентации зерен грунта в направлении, перпендикулярном оси превалирующей нагрузки, образование и развитие очагов деструкции и др.

5. Время нарастания импульса IRT [мкс/с] — временной интервал между началом регистрации импульса АЭ и моментом достижения этим импульсом своего амплитудного значения, усредненный по всем акустико-эмиссионным событиям, происшедшим за единицу времени. Данный параметр позволяет судить о емкости структурных связей по отношению к энергии, которую им нужно аккумулировать для перехода в предельно-напряженное состояние. Отсюда очевидно, чем мощнее структурная связь, тем пропорционально выше указанная емкость и величина IRT . Тем не менее IRT , позволяя установить доминирующий среди источников ТАЭ тип

связей, обладает пониженной чувствительностью к однородности геосреды. Последнее, в свою очередь, имеет принципиальное значение для выявления локальных зон с аномальными свойствами, благоприятствующие развитию очагов деструктивных процессов, которые могут привести к потере несущей способности всего фундаментного основания в целом. Поэтому получение заслуживающего доверия заключения о степени устойчивости грунта требует совокупного рассмотрения как E_{sour} , так и IRT .

Для численной оценки указанных параметров рассчитывались их средние значения по следующим временным областям, которые последовательно располагаются друг за другом в том же порядке, в котором перечислены ниже; они не пересекаются между собой, каждая последующая область наступает только после завершения каждой предыдущей:

$$M[\dot{N}_{\Sigma}^{(1)}(x)], M[D_{imp}^{(1)}(x)], M[V_{imp}^{(1)}(x)],$$

где $x = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ — порядковый номер цикла нагрева: величины \dot{N}_{Σ} , D_{imp} , V_{imp} , зарегистрированные при отключенных излучателях упругих волн и усредненные за период от начал каждого цикла прогрева исследуемой пробы до достижения ее установившейся рабочей температуры T_{max} , когда скорость ее возрастания не превышает ΔT при работающих в неизменном режиме нагревателях;

$$M[\dot{N}_{\Sigma}^{(2)}(x)], M[D_{imp}^{(2)}(x)], M[V_{imp}^{(2)}(x)]:$$

величины \dot{N}_{Σ} , D_{imp} , V_{imp} , зарегистрированные и усредненные за период, начинающийся с достижения пробой температуры T_{max} и завершающийся в момент начала ее прозвучивания упругими волнами, излучатели которых включают не ранее чем через 15 мин после прогрева грунта до T_{max} ;

$$M[V_{imp}^{mes}(y)], M[E_{sour}^{mes}(y)], M[IRT_s^{mes}(y)]:$$

величины V_{imp} , E_{sour} , IRT , зарегистрированные и усредненные за период в не менее чем 5 мин на протяжении которого отклонения значений E_{sour} и V_{imp} от среднего не выходили за границы $\pm 3\%$ при нахождении исследуемой пробы в состоянии прогрева до установившейся рабочей температуры T_{max} , где $u = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ — порядковый номер серии измерений. Последний может отличаться от порядкового номера x цикла нагрева, так как за один такой цикл может состояться два и более акта прозвучивания пробы упругими волнами.

С учетом изложенных выше физических предпосылок для обработки измерительной информации использованы показатели:

$$1. \{M[\dot{N}_{\Sigma}] \times M[D_{imp}] \times M[V_{imp}]\},$$

который характеризует средневзвешенную по V_{imp} и D_{imp} интенсивность структурных перестановок и актов деструкции в грунтовом материале, определяемую по величине \dot{N}_{Σ} . Значения D_{imp} , V_{imp} у мало влияющих на несущую способность грунта слабых молекулярных (водно-коллоидных, коагуляционных и др.) структурных связей значительно ниже, чем величины этих параметров у прочных химических (кристаллизационных) связей. Поэтому рассматриваемый показатель является мерой интенсивности эволюции структуры наиболее устойчивых связей между частицами грунта, определяющих его несущую способность в целом. Подчеркнем, данный показатель отражает исключительно изменение интенсивности (прирост / спад кинетики) процессов развития деформированного состояния и не предоставляет сведений о степени структурной нарушенности геосреды, достигнутой в некоторый момент времени.

Другими словами, значения

$$\{M[\dot{N}_{\Sigma}] \times M[D_{imp}] \times M[V_{imp}]\}$$

связаны зависимостью со скоростью изменения прочностных свойств геоматериала, но не с их абсолютной величиной. Также стоит отметить, что существующие между частицами грунта связи могут дестабилизироваться как по причине их разрушения, что дает уменьшение устойчивости грунта, так и в связи с их переориентацией и образованием новых связей, что наоборот приводит к улучшению устойчивости геосреды. Последнее характерно для этапа отвердевания тампонажного раствора в течение некоторого времени после его закачки в грунт.

Поэтому показатель

$$\{M[\dot{N}_{\Sigma}] \times M[D_{imp}] \times M[V_{imp}]\}$$

представляется обязательным для оценки изменения устойчивости геосреды, но не исчерпывающим.

- величины

$$\{M[\dot{N}_{\Sigma}^{(1)}(x)] \times M[D_{imp}^{(1)}(x)] \times M[V_{imp}^{(1)}(x)]\} :$$

показывают интенсивность структурных преобразований на этапе прогрева грунтового материала, когда за счет наличия пространственного термического градиента температурные напряжения достигают пиковых значений. На данном этапе дестабилизируются и становятся источниками ТАЭ структурные связи всех типов: ослабленные, прочные и промежуточно-переходного типа, которые за счет накопления дефектов пребывают в процессе трансформации из категории «прочные» в категорию «ослабленные» или наоборот упрочняются, например, за счет отверждения, вступившего с ними в контакт тампонажного раствора.

- величины

$$\{M[\dot{N}_{\Sigma}^{(2)}(x)] \times M[D_{imp}^{(2)}(x)] \times M[V_{imp}^{(2)}(x)]\} :$$

показывают интенсивность реакции структурных связей в пробе на равномерно распределенное температурное поле, возникающее после достижения грунтом термостационарного режима при уста-

новившейся рабочей температуре T_{\max} . Вместе с тем стабилизируется напряженное состояние пробы, что в свой черед приводит к существенному сокращению темпов развития деструктивных процессов. Как следствие, в общем потоке событий акустической эмиссии заметно снижается доля сигналов, сгенерированных за счет образования новых дефектов, и начинают превалировать механизмы возникновения ТАЭ, связанные с развитием уже существующих структурных повреждений или, наоборот, эволюцией новоприобретенных связей между частицами грунта по мере отверждения вступившего с ними в контакт тампонажного раствора и/или под влиянием процессов криотермического закрепления.

Поэтому временное распределение величин

$$\left\{ M\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(2)}(x)\right] \times M\left[D_{\text{imp}}^{(2)}(x)\right] \times M\left[V_{\text{imp}}^{(2)}(x)\right] \right\}$$

служит мерой прироста или убывания количества связей преимущественно промежуточно-переходного типа, которые за счет накопления дефектов пребывают в процессе трансформации из категории «прочные» в категорию «ослабленные» или, наоборот, упрочняются за счет отверждения вступившего с ним в контакт тампонажного раствора.

Отсюда получаем комбинированный показатель

$$DIV(x) = \frac{M\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(2)}(x)\right] \times M\left[D_{\text{imp}}^{(2)}(x)\right] \times M\left[V_{\text{imp}}^{(2)}(x)\right]}{M\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(1)}(x)\right] \times M\left[D_{\text{imp}}^{(1)}(x)\right] \times M\left[V_{\text{imp}}^{(1)}(x)\right]},$$

физический смысл которого — соотношение между интенсивностью положительного или отрицательного (в случае применения какого-либо способа закрепления) нарастания структурной нарушенности пробы, относительно связей промежуточно-переходного типа, с одной стороны, и скоростью изменения ее деформированного состояния в целом, включая как вклад от развития исходно

имеющихся, так и от прироста количества новообразованных нарушений (дефектов) — с другой.

Основное назначение показателя $DIV(x)$ — численная оценка степени постоянства и изменчивости хода эволюции процессов деструкции в грунте под действием определенной нагрузки, что имеет фундаментальное значение для достоверности предиктивных оценок реакции находящихся в сложном напряженном состоянии грунтовых материалов на те или иные внешние воздействия. Такая оценка выполняется путем сопоставления значения $DIV(0)$, полученного под действием первичного механического пригруза (обычно 200 — 300 кг), когда испытуемый материал находился в максимально стабильном состоянии, со значениями $DIV(x = 1, 2, 3, \dots, n)$, определенными на том же геоматериале в последующих циклах нагружения при подаче на него ступенчато возрастающих усилий сжатия (в данной серии экспериментов изучена применимость $DIV(x)$ вплоть до усилий величиной 12 — 15 тонн-силы).

2.

$$\left\{ M\left[V_{\text{imp}}^{\text{mes}}(y)\right] \times M\left[E_{\text{sour}}^{\text{mes}}(y)\right] \times M\left[IRT^{\text{mes}}(y)\right] \right\},$$

который является мерой затрат энергии упругой волны, искусственно созданной с определенными параметрами, на перевод в напряженное состояние структурных связей в объеме грунтового материала на пути от излучателя данной волны через контролируемый участок пробы на измеряющий преобразователь. Чем выше степень деструкции структурных связей, тем пропорционально меньше энергии они способны аккумулировать до перехода в предельно напряженное состояние и, соответственно, при прочих равных, тем меньше изменятся энергетические характеристики зондирующей волны на пути ее распространения через пробу.

- величина $\left\{ M[V_{imp}^{mes}(0)] \times M[E_{sour}^{mes}(0)] \times M[IRT^{mes}(0)] \right\}$ служит эталонным значением, показывающим потери энергии в зондирующей упругой волне, вызванные естественной структурной неоднородностью прозвучиваемого грунтового материала, не связанной с его термическими и/или механическим нагружением или оказанием на него каких-либо других специальных воздействий;

- величины $\left\{ M[V_{imp}^{mes}(y > 0)] \times M[E_{sour}^{mes}(y > 0)] \times M[IRT^{mes}(y > 0)] \right\}$ характеризуют динамику указанных потерь в последующих за эталонным циклах измерений.

Численно оценка потерь энергии в зондирующей волне производится с помощью комбинированного показателя

$$VAR(y) = \frac{M[V_{imp}^{mes}(0)] \times M[E_{sour}^{mes}(0)] \times M[IRT^{mes}(0)]}{M[V_{imp}^{mes}(y)] \times M[E_{sour}^{mes}(y)] \times M[IRT^{mes}(y)]}.$$

Показатель $VAR(y)$ информативен с позиции оценки макроструктурной нарушенности геосреды, но не предназначен для исследования процессов деформирования, перекомпоновки и распада структурных связей на микромасштабном уровне, тогда как кинематические характеристики именно этих процессов выступают в роли предвестников формирования очагов развития осадок, смещений и др. деструктивных процессов, связанных с потерей грунтовым основанием стабильности. Иначе говоря, величина $VAR(y)$ отражает степень структурной нарушенности геоматериала на момент проведения измерения, но не позволяет судить о том, как в дальнейшем будет развиваться его напряженно-деформированное состояние. В свою очередь, показатель $DIV(x)$ свободен от выше перечисленных недостатков $VAR(y)$, но, в отличие от $VAR(y)$, не позволяет с достаточной точностью определить остаточную прочность закрепленного твердеющими растворами и/или путем криотермической консолидации грунтового основания после воздействия на него тех или иных нагрузок. Соответственно представляется очевидной рациональность комплексирования $DIV(x)$ и $VAR(y)$.

Сказанное позволяет выразить комплексный показатель $RT_{neu}^{gr}(x; y)$ в таком виде:

$$RT_{neu}^{gr}(x; y) = \frac{DIV(x)}{DIV(0)} \times VAR(y) = \frac{M[\dot{N}_{\Sigma}^{(2)}(x)] \times M[D_{imp}^{(2)}(x)] \times M[V_{imp}^{(2)}(x)] \times M[\dot{N}_{\Sigma}^{(1)}(0)] \times M[D_{imp}^{(1)}(0)] \times M[V_{imp}^{(1)}(0)]}{M[\dot{N}_{\Sigma}^{(1)}(x)] \times M[D_{imp}^{(1)}(x)] \times M[V_{imp}^{(1)}(x)] \times M[\dot{N}_{\Sigma}^{(2)}(0)] \times M[D_{imp}^{(2)}(0)] \times M[V_{imp}^{(2)}(0)]} \times \frac{M[V_{imp}^{mes}(0)] \times M[E_{sour}^{mes}(0)] \times M[IRT^{mes}(0)]}{M[V_{imp}^{mes}(y)] \times M[E_{sour}^{mes}(y)] \times M[IRT^{mes}(y)]}.$$

Физический смысл $RT_{neu}^{gr}(x; y)$ — мера структурной устойчивости геосреды, учитывающая как то, насколько нарушен геоматериал в абсолютном выражении, что может быть получено из отношений между значениями V_{imp} , E_{sour} , IRT , зарегистрированными при зондировании упругими волнами термически активированного грунта в нулевом и каждом последующем цикле измерений, так и принимающая в расчет интенсивность структурных перестановок и преобладающий тип задействованных в них структурных связей (понятийный смысл: «насколько быстрого прироста или убыли степени распространения опасных структурных

нарушений можно ожидать в дальнейшем»), что достигается путем совместного рассмотрения значений \dot{N}_Σ , D_{imp} , V_{imp} , количественно выражающих особенность сигналов ТАЭ, связанные с эволюцией напряженно-деформированного состояния разномасштабных структурных связей геоматериала на различных стадиях его термомеханического нагружения.

При этом термическая активация (локальный прогрев) геоматериала интенсифицирует аккумуляцию напряжений его структурными связями и тем самым способствует возрастанию информационной содержательности каждого отдельного пакета событий ТАЭ, что повышает соотношение полезная составляющая сигнала/шум.

Результаты экспериментов и их обсуждение

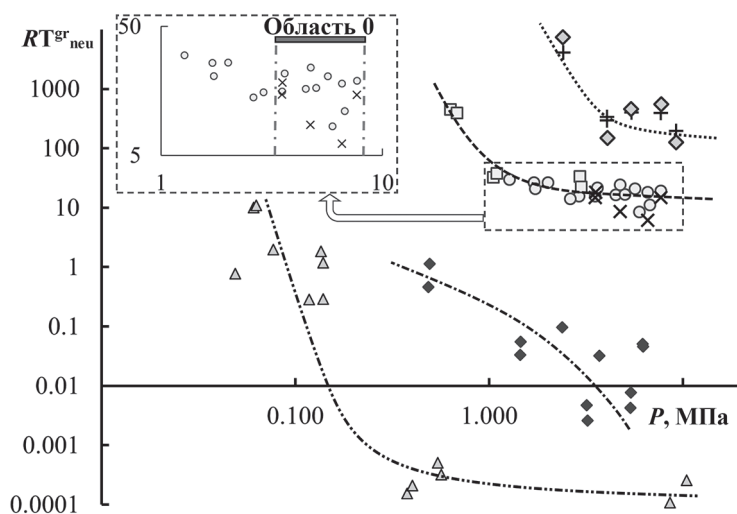
На рис. 2 представлены значения RT_{neu}^{gr} проб 0-02, 1-00, 1-01, 1-02, 1-03, 1-07, 1-08, 1-09 в функции от соответствующих величин квазистатических механических нагрузок P , действовавших на эти пробы во время их испытания по предлагаемому методу.

Представленные на рис. 2 и в подписи к нему данные наглядно показывают наличие пропорциональных взаимосвязей значений RT_{neu}^{gr} как с величинами квазистатических механических нагрузок P , действовавших на пробы во время их испытания по предлагаемому методу, так и с величинами $\sigma_{сж}$, полученными в результате испытания по ГОСТ 21153.2 соответствующих контрольных образцов, исключая пробу 1-03. Последнее объясняется неравномерностью распределения тампонажного раствора по объему данной пробы. Как следствие сформировались локальные области с повышенными прочностными свойствами, реакция которых на компрессионное сжатие и оказала результирующее влия-

ние на уровень RT_{neu}^{gr} . В свою очередь, при испытаниях по стандартизованному способу влияние указанных областей было пренебрежимо мало по причине отсутствия в образце единого цементного каркаса и преобладания механизмов деформирования, связанных с боковым расширением тампонажно-грунтового агломерата.

Также обращает на себя внимание следующая из рис. 2 более высокая чувствительность к состоянию пробы 1-08 значений RT_{neu}^{gr} , полученных при ее прозвучивании прибором ПУЛЬСАР-2.2 (60 ± 10 кГц), по сравнению со значениями данного показателя, определенными с применением прибора УД2-16 на частоте 100 кГц. Тогда как на пробе 1-07 чувствительность RT_{neu}^{gr} не демонстрирует столь яркой зависимости. Это связано с ориентацией преобразователей ПУЛЬСАР-2.2 в плоскости, перпендикулярной направлению прозвучивания прибора УД2-16. Излучаемые последним упругие волны шли по высоте пробы, совпадая с вектором главной нагрузки. Соответственно посредством УД2-16 получена информация о продольных деформациях в пробе, а при помощи ПУЛЬСАР-2.2 собраны данные, относящиеся к развитию деформаций поперечных.

Из сказанного следует, что в практически на две трети состоящей из цементного камня пробе 1-07 деформации носили существенно объемный характер без выраженных различий по продольной и поперечной осям, что совпадает как с известными теоретическими предпосылками, так и с экспериментально установленным характером распределения значений RT_{neu}^{gr} . В то же время в насыщенной смесью на основе смоляного компаунда пробе 1-08 эти различия проявлены достаточно сильно по причине склонности эпоксидных полимеров с наполнителем к передаче значи-



Результаты сгруппированы следующим образом:

- △ — пробы 1-00, 1-01 (генератор упругих волн — УД2-16): грунты криотермически консолидированные, не подвергавшиеся обработке твердеющими растворами (первоначальное $\sigma_{ск}$ от 1,10 МПа до 1,28 МПа);
- ◆ — проба 0-02, 1-02 (генератор упругих волн — УД2-16): грунты мало насыщенные тампонажной смесью на основе смоляного компаунда и подвергнутые криотермической консолидации (первоначальное $\sigma_{ск}$ от 1,35 МПа до 1,62 МПа);
- — проба 1-03 (генератор упругих волн — УД2-16): грунты мало насыщенные тампонажной смесью на основе цемента марки М500 без криотермической консолидации (первоначальное $\sigma_{ск}$ от 0,38 МПа до 0,46 МПа);
- — пробы 1-08, 1-09 (генератор упругих волн — УД2-16): грунты средней насыщенности тампонажной смесью на основе смоляного компаунда без криотермической консолидации (первоначальное $\sigma_{ск}$ от 1,67 МПа до 2,04 МПа);
- × — проба 1-08 (генератор упругих волн — ПУЛЬСАР-2.2);
- ◇ — проба 1-07 (генератор упругих волн — УД2-16): грунты высокой насыщенности тампонажной смесью на основе цемента марки М25 без криотермической консолидации (первоначальное $\sigma_{ск}$ от 2,02 МПа до 2,17 МПа);
- + — проба 1-07 (генератор упругих волн — ПУЛЬСАР-2.2).

Рис. 2. Распределения значений функций $RT^{gr}_{neu}(P)$, построенных по результатам испытаний проб, отверждение которых завершилось до проведения акустико-эмиссионных измерений

Fig. 2. Pattern of values of function $RT^{gr}_{neu}(P)$ plotted from test data of samples hardened before acoustic emission measurements

тельной части вертикально приложенной нагрузки в горизонтальном направлении. Однако, поскольку в рассматриваемом случае боковой распор блокировался стенками колбы, при испытании грунтосмоляных проб именно в горизонтальной плоскости напряжения достигали наибольших величин. Эта особенность и стала причиной отмеченных выше различий в значениях RT^{gr}_{neu} , определенных в крест и по простиранию тела пробы 1-08.

Отмеченные процессы перераспределения напряжений в плоскости, лежащей по нормали к вектору главных компонент нагрузки, также выразились в существенном увеличении разброса значений RT^{gr}_{neu} проб 1-08, 1-09 при их нагружении свыше 3,5 МПа (рис. 2, область 0). Данная нагрузка соответствует началу этапа интенсификации деформационных процессов в указанных пробах, которые благоприятствуют релаксации их внутренних напряжений за

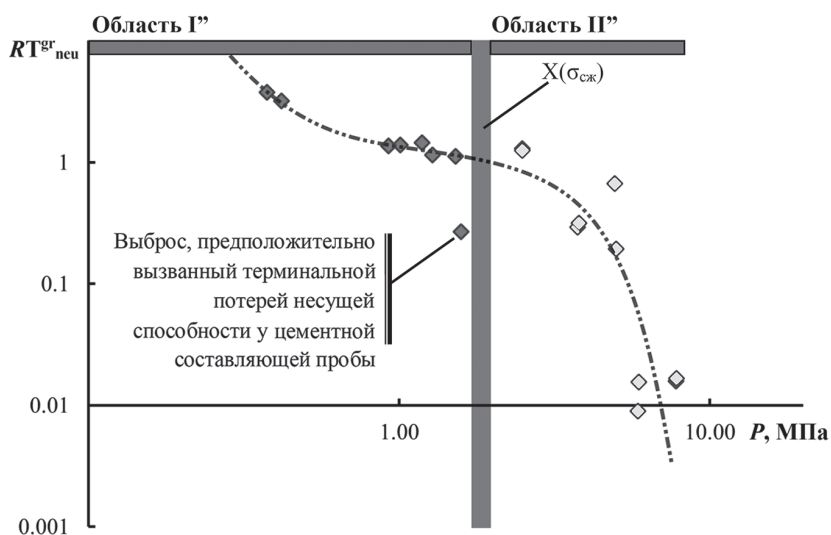
счет деструкции и смещения структурных связей. Заметим, что наличие в некоторой степени схожих акустоэмиссионных эффектов также показано в [23] для образцов каменной соли, подвергаемых нагружению по схеме Кармана и нагреву.

Таким образом, формы экспериментально полученных по предлагаемому методу кривых $RT_{neu}^{gr}(P)$ согласуются с известными представлениями о соотношениях между упругой и пластической составляющей деформации при нагружении смоляных компаундов, преимущественно льдистых агломераций, бетонов и ледопородных тел с преобладанием грунтовой компоненты. Последние два материала относятся к упругопластическим с перевесом в сторону развития деформированного состояния за счет процессов ползучести, в основе которых лежит нарастание объемных пластических деформаций под действием постоянно приложенной нагрузки. Причем накопление повреждений на микро- и макроуровне в таких материалах носит линейный характер лишь до момента слияния этих повреждений в единую сеть, после чего происходит лавинообразное разрыхление (кускование) пробы, сопровождаемое сообразным снижением ее несущей способности. Соответственно реологические свойства проб криогенных (1-00, 1-01) и цементных (1-03, 1-07), так же, как и относящиеся к ним кривые $RT_{neu}^{gr}(P)$, подчиняется экспоненциальному закону.

В свою очередь, длительное воздействие механических нагрузок на геоматериалы, обработанные смоляным (эпоксидным) компаундом, равно как и на в основном льдистые ледопородные агломерации, приводит к развитию главным образом упругих деформаций. Этот процесс выражается в поглощении структурными связями потенциальной энергии упругой деформации по

логарифмическому или близкому к нему закону, что ведет к образованию и развитию концентраторов напряжений вплоть до хрупкого разрушения грунтового агломерата. При этом его кускование, как правило, происходит без продолжительного предварительного растрескивания. Соответственно, если в предыдущем случае функции $RT_{neu}^{gr}(P)$ служили индикатором развития трещиноватой структуры, то здесь они в большей степени отражают нарастание напряжений внутри структурных связей и переход деформированного состояния из эластичной в хрупкую область.

С целью подтверждения высказанной выше интерпретации особенностей распределения значений $RT_{neu}^{gr}(P)$ как производных от специфики реализации механизмов изменения структуры геосреды, находящейся в сложном напряженном состоянии, по методу ТАЭ испытана проба 1-06, в которой на первом этапе нагружения преобладали упругопластические деформации, на втором этапе — упруго хрупкие. Это достигнуто путем изготовления данной пробы как композита из грунта высокой насыщенности тампонажной смесью на основе цемента марки М25 и значительно льдистого ледопородного тела, расположенного так, чтобы воспринимать нагрузку преимущественно после кускования тампонажно-грунтового агломерата (выступающий грунтоцементный столб, обернутый по периметру ледопородной «рубашкой»). Из строения данной пробы также следует еще одна ее отличительная черта, а именно наличие у входящего в ее состав грунтоцементной колонны достаточного пространства для развития боковых смещений. Другими словами, в данном случае наличие металлических стенок вокруг пробы никак не исказило реакцию указанной колонны на сообщаемую ей нагрузку, по сравнению с испытаниями со-



$X(\sigma_{сж})$ — доверительный интервала предела прочности грунтоцементной составляющей данной пробы (от 1,72 МПа до 1,97 МПа);
 Область I'' — интервал нагрузок, воспринимавшихся грунтоцементной составляющей пробы;
 Область II'' — интервал нагрузок, воспринимавшихся ледопородной составляющей пробы

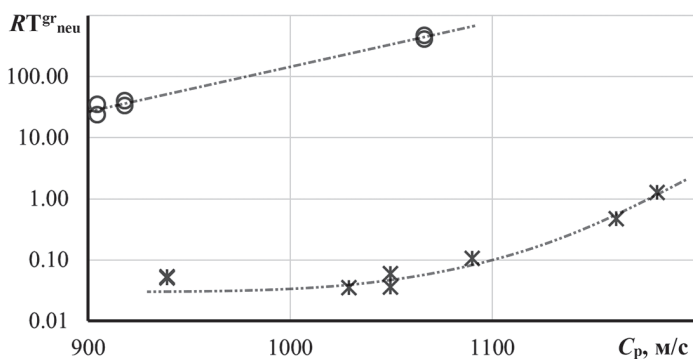
Рис. 3. Распределение значений функции $RT_{neu}^{gr}(P)$, построенной по результатам испытания пробы 1-06
 Fig. 3. Pattern of values of function $RT_{neu}^{gr}(P)$ plotted from test data of sample 1-06

ответствующих контрольных образцов по ГОСТ 21153.2. Поэтому, в отличие от других проб, прочностные свойства грунтоцементной компоненты пробы 1-06 при испытании по методу ТАЭ можно на прямую приравнять к $\sigma_{сж}$ контрольных образцов. Однако нагружение плотно прилегающего к стенкам металлической колбы ледопородного тела здесь все равно прошло в компрессионном режиме. Полученная в результате данного опыта зависимость $RT_{neu}^{gr}(P)$ показана на рис. 3.

Характер представленной на рис. 3 зависимости $RT_{neu}^{gr}(P)$ подтверждает рассмотренные выше теоретические предположения, использованные при интерпретации результатов, охваченных рис. 2. В области I'' функция $RT_{neu}^{gr}(P)$ ведет себя по закону, согласно рис. 2 присущему для цементных проб, у которых преобладают пластические деформации. Однако после приложения к пробе 1-06

нагрузок свыше предела прочности опорной колонны из цементного камня (область II''), вид функции $RT_{neu}^{gr}(P)$ меняется на соответствующий логарифмическому закону, описывающему развитие напряженно-деформированного состояния материалов с преобладанием хрупко упругих деформаций, к которым принадлежит значительно льдистый ледопородный компонент данной пробы.

В завершение настоящей работы приведем характерные примеры (рис. 4) верификации, осуществленной путем сравнения величин RT_{neu}^{gr} с изменением скоростей C_p прохождения ультразвуковых волн через пробы, измеряемых параллельно с регистрацией параметров ТАЭ, на основе которых определены соответствующие значения RT_{neu}^{gr} при ступенчато возрастающей механической нагрузке P (каждая точка на рис. 4 характеризует одну из ступеней нагружения).



Ж - пробы 1-02 на основе компаунда; О - пробы 1-03 на основе цемента М500

Рис. 4. Распределения значений RT^{gr}_{neu} в функции от величин C_p , полученных при испытании
 Fig. 4. Pattern of values of function RT^{gr}_{neu} versus test values of C_p

Из представленных на рис. 4 функций и сведений, приведенных вместе с рис. 2 и рис. 3, следует высокая степень коррелированности величин RT^{gr}_{neu} , с одной стороны, и как $M(\sigma_{сж})$, так и C_p — с другой, что подтверждает достоверность полученных по предлагаемому методу результатов.

Помимо выше обсужденного, нужно особо отметить, что хорошая сходимость результатов, полученных на пробах 1-08 и 1-09, первая из которых подвергнута практически двукратно меньшему прогреву, стимулирующему информативный отклик, подтверждает отсутствие потребности в введении жестких требований по отношению к стимулирующему воздействию. Если оно одинаково на протяжении всей серии измерений, это сопоставимо сказывается на всех получаемых результатах и в том числе на эталонном, используемом для нормирования всех последующих. Поэтому значения RT^{gr}_{neu} не чувствительны к данной неопределенности. Однако уменьшение температуры приводит к снижению эффективности генерации полезных сигналов и возрастанию роли помеховой составляющей, что значительно осложняет цензурирование акустограмм. Исходя из этого, температурные воздействия, результирующиеся прогревом конт-

ролируемого объема грунта менее чем до 45–50 °С, не являются удовлетворительными. В то же время рабочие температуры T_{max} свыше 99 °С также не уместны в связи с переводом грунтовых вод в газообразное агрегатное состояние, что может критически исказить характер ТАЭ.

Выводы

Изложены и систематизированы результаты серии экспериментов, направленных на установление закономерностей между параметрами термостимулированной акустической эмиссии у находящихся в сложно напряженном состоянии грунтовых материалов с различным количественным соотношением компонент и изменением показателей их прочностных свойств в зависимости от способа закрепления и параметров нагружения данных материалов. Обоснована методика проведения соответствующих измерений и многопараметрического анализа этих закономерностей и лежащих в их основе частных особенностей характера акустограмм, что позволяет получить комплексный структурно чувствительный показатель RT^{gr}_{neu} , пригодный для численной оценки изменения деформированного состояния у находящихся в сложнонапряженном

состоянии как исходно рыхлых, так и искусственно закрепленных участков геосреды.

Представлены экспериментальные данные, наглядно показывающие высокую степень созависимости между распределением значений RT^{gr}_{neu} и спецификой реализации процессов развития деформированного состояния геоматериала. Обоснованы подходы, позволяющие по изменению RT^{gr}_{neu} судить о накоплении необратимых деформаций в структуре грунтово-тампажной или иным способом консолидированной агломерации и численно оценивать степень приближения устойчивости геосреды к пороговому уровню, за которым происходит лавинообразное нарастание скорости разрушения структурных связей, сопровождающееся формированием обширных просадок, сдвижений, оползней и других опасных явлений, связанных с терминальной потерей грунтовым основанием несущей способности.

Показана возможность распространения области применения метода ТАЭ и предложенного показателя RT^{gr}_{neu} как на исследование искусственно закрепленных, например, путем инъектирования твердеющих смесей, так и на оценку состояния исходных (рыхлых) грунтов, изменение которого преимущественно является производной взаимного наложения влияния гидрологических условий, полей квазистатических механических напряжений от вышележащей грунтово-породной толщи и, при наличии, фундамента возводимого на ней инженерного сооружения, а также воздействия тепловых потоков, связанных с сезонным и суточным чередованием климатических температур окружающей среды.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о помехозащищенности получаемых по созданной методике оценок изменения устойчивости (структур-

ной стабильности) геоматериала к влиянию таких потенциально искажающих и осложняющих интерпретацию измерительной информации факторов, как:

- величина и неравномерность температурного воздействия, стимулирующего информативный акустико-эмиссионный отклик;
- неопределенность вещественного состава геосреды, в части, касающейся количественного соотношения ее компонент при монотипном генезисе грунта (однако, например, подготовка заключения о возникновении или отсутствии помеховой составляющей при внедрении в испытываемые пробы ила или черного почвенного грунта с выраженной органической составляющей может стать предметом дальнейшего исследования);
- криогенно обусловленные структурные особенности ледопородных агломераций;
- номинальная частота используемой при активных акустических измерениях зондирующей грунт упругой волны (в диапазоне от 50 кГц до 100 кГц);
- величина механической нагрузки (созданная методика в равной степени репрезентативна на всех стадиях напряженно-деформированного состояния геоматериала);
- тип и концентрация закрепляющего (тампажного) раствора.

Полученные по предлагаемому методу результаты подтверждены данными, полученными из деформационных (прессовых) испытаний контрольных образцов по ГОСТ 21153.2, и посредством сопоставления с распределением значений скоростей прохождения через пробы волн ультразвукового диапазона частот, измерения которых проведены параллельно с регистрацией параметров акустической эмиссии, на основе которых определены значения RT^{gr}_{neu} .

Представленные результаты создают предпосылки для разработки аку-

стико-эмиссионных способов контроля изменения устойчивости подвергнутого тому или иному способу закрепления грунтового массива, которые могут найти применение в сфере инженерно-геологических изысканий с целью определения как текущего состояния, так и в рамках длительного контроля (мониторинга) и для подготовки прогноза изменения устойчивости грунтовых оснований, на которых располагаются фундаменты зданий и сооружений различного назначения, возводимых в сложных горно-геологических условиях. Прикладная значимость таких способов — возраста-

ние производительности контроля состояния геосреды при снижении рисков, связанных с пропуском или запоздалой идентификацией предвестников формирования оползневых явлений, просадок оснований и фундаментов, разрушения несущих конструкций инженерных сооружений, например, по причине выпирания локального участка расположенного под ними грунтового массива, затоплений в связи с разрушением оснований гидротехнических сооружений и других такого рода чрезвычайных ситуаций, обусловленных потерей грунтовым массивом стабильности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов М. В., Простов С. М., Герасимов О. В. Прогноз геомеханического состояния закрепляемого грунтового основания горнотехнического здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2019. — № 6. — С. 199–210. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-199-210.
2. Khafizov R. M. Analysis of methods for determining the deformation characteristics of cohesive soil // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016, vol. 52, no. 6, pp. 361–365 DOI: 10.1007/s11204-016-9354-z.
3. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. — Пенза: ПГУАС, 2008. — 696 с.
4. Простов С. М., Герасимов О. В., Никулин Н. Ю. Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов: монография. — Томск: Изд-во Томс. ун-та, 2015. — 188 с.
5. Ross N., Brabham P., Harris C., Christiansen H. Internal structure of open system pin-gos, Adventdalen, Svalbard: The use of resistivity tomography to assess ground-ice conditions // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2007, vol. 12, no. 1, pp. 113–126. DOI: 10.2113/JEEG12.1.113.
6. Maurer H., Hauck C. Geophysical imaging of alpine rock glaciers // Journal of Glaciology. 2007, vol. 53, no. 180, pp. 110–120. DOI: 10.3189/172756507781833893.
7. Moorman B. J., Robinson S. D., Burgess M. M. Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar // Permafrost and Periglacial Processes. 2003, vol. 14, pp. 319–329. DOI: 10.1002/ppp.463.
8. Шейнин В. И. Особенности использования скважинных радиоизотопных измерений для оценки свойств грунтов // Вестник НИЦ Строительство. — 2014. — № 10. — С. 152–159.
9. Тютюнник П. М. Геоакустический контроль процессов замораживания и тапонирования пород. — М.: Недра, 1994. — 255 с.
10. Da-Yan Wang, Yuan-Lin Zhu, Ma Wei, Yong-Hong Niu Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils // Cold Regions Science and Technology. 2006, vol. 44, no. 1, pp. 12–19. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2005.06.003.
11. Фоменко Н. Е., Капустин В. В., Гапонов Д. А., Фоменко Л. Н. Исследование техногенно-закрепленных грунтов основания фундаментов радиолокационным и сейсмиче-

скими методами в условиях длительно эксплуатируемого объекта культурного наследия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329. — № 8. — С. 16–29.

12. Тарасенко С. Е., Шереметов И. М. Применение геофизических методов при выполнении инженерных изысканий на площадках массового строительства // Промышленное и гражданское строительство. — 2015. — № 3. — С. 64–68.

13. Колесников В. П., Пригара А. М., Татаркин А. В. Комплексные геофизические исследования состояния грунтов основания и фундаментов инженерных сооружений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. — 2011. — № 11. — С. 89–91.

14. Вознесенский А. И., Изюмов С. В., Дручинин С. В., Миронов С. И. Комплексные геофизические изыскания в зоне подземного строительства коллектора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 8. — С. 95–101.

15. Voznesensky A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 23–30. DOI: 10.1134/S1062739115010044.

16. Шкуратник В. Л., Новиков Е. А. Термостимулированная акустическая эмиссия горных пород как перспективный инструмент решения задач геоконтроля (обзор) // Горный журнал. — 2017. — № 6. — С. 21–27. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.04.

17. Voznesenskii A. S., Shkuratnik V. L., Kutkin Ya. O. Dynamics of thermal and mechanical loading as a cause of acoustic emission in rock // Rock Dynamics and Applications – State of the Art. Proceedings of the 1st International Conference on Rock Dynamics and Applications, RocDyn-1. 2013, pp. 429–435.


18. Novikov E. A., Shkuratnik V. L., Zaytsev M. G. Manifestations of acoustic emission in frozen soils with simultaneous influence of variable mechanical and thermal effects on them // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 238, no. 4, pp. 383–391. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.383.

19. Rivera-Gómez C., Galán-Marín C., López-Cabeza V. P., Diz-Mellado E. Sample key features affecting mechanical, acoustic and thermal properties of a natural-stabilised earthen material // Construction and Building Materials. 2021, vol. 271, article 121569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121569.

20. Xia Z., Chen R.-P., Kang X. Laboratory characterization and modelling of the thermal-mechanical properties of binary soil mixtures // Soils and Foundations. 2019, vol. 59, no. 6, pp. 2167–2179. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.11.013.

21. Novikov E. A., Shkuratnik V. L., Zaitsev M. G., Klementyev E. A., Blokhin D. I. Acoustic emission of frozen soils under quasi-static mechanical and cyclic thermal loading // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2020, vol. 57, no. 2, pp. 97–104. DOI: 10.1007/s11204-020-09643-6.

22. Новиков Е. А., Зайцев М. Г. Об использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти для оценки структурной устойчивости мерзлых грунтов при их циклическом отогреве и механическом нагружении // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 30–44. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-30-44.

23. Кравченко О. С. Закономерности акустической эмиссии, продольных и объемных деформаций каменной соли при ее нагружении по схеме Кармана и температурных воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 4. — С. 96–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-96-104. 

REFERENCES

1. Sokolov M. V., Prostov S. M., Gerasimov O. V. Prediction of geomechanical state of stabilized soil foundation of mine engineering building. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2019, no. 6, pp. 199–210. [In Russ]. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-199-210.

2. Khafizov R. M. Analysis of methods for determining the deformation characteristics of cohesive soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016, vol. 52, no. 6, pp. 361–365 DOI: 10.1007/s11204-016-9354-z.

3. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyaniye voprosa: monografiya* [Methods for determining mechanical properties of soils. The state of the question, monograph], Penza, PGUAS, 2008, 696 p.

4. Prostov S. M., Gerasimov O. V., Nikulin N. Yu. *Kompleksnyy geologo-geofizicheskiy monitoring protsessov uprochneniya gruntov: monografiya* [Integrated geological and geophysical monitoring of soil hardening processes, monograph], Tomsk, 2015, 188 p.

5. Ross N., Brabham P., Harris C., Christiansen H. Internal structure of open system pingos, Adventdalen, Svalbard: The use of resistivity tomography to assess ground-ice conditions. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 2007, vol. 12, no. 1, pp. 113–126. DOI: 10.2113/JEEG12.1.113.

6. Maurer H., Hauck C. Geophysical imaging of alpine rock glaciers. *Journal of Glaciology*. 2007, vol. 53, no. 180, pp. 110–120. DOI: 10.3189/172756507781833893.

7. Moorman B. J., Robinson S. D., Burgess M. M. Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003, vol. 14, pp. 319–329. DOI: 10.1002/ppp.463.

8. Sheinin V. I. Features of the use of borehole radioisotope measurements for assessing the properties of soils. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2014, no. 10, pp. 152–159. [In Russ].

9. Tyutyunnik P. M. *Geoakusticheskiy kontrol' protsessov zamorazhivaniya i tamponirovaniya porod* [Geoacoustic control of the processes of freezing and tamponing of rocks], Moscow, Nedra, 1994, 255 p.

10. Da-Yan Wang, Yuan-Lin Zhu, Ma Wei, Yong-Hong Niu Application of ultrasonic technology for physical–mechanical properties of frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*. 2006, vol. 44, no. 1, pp. 12–19. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2005.06.003.

11. Fomenko N. E., Kapustin V. V., Gaponov D. A., Fomenko L. N. Research of the technogenic fixed grounds of the bottom of foundations by radar and seismic methods in conditions of the longterm used object of the cultural heritage. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov*. 2018, vol. 329, no. 8, pp. 16–29. [In Russ].

12. Tarasenko S. E., Sheremetov I. M. Application of geophysical methods in the course of engineering surveys at sites of mass construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015, no. 3, pp. 64–68. [In Russ].

13. Kolesnikov V. P., Prigara A. M., Tatarkin A. V. Comprehensive geophysical studies of the state of the soils of the foundation and foundations of engineering structures. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. 2011, no. 11, pp. 89–91. [In Russ].

14. Voznesenskiy A. I., Izyumov S. V., Druchinin S. V., Mironov S. I. Complex geophysical researches in the zone of underground building of a collector. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 8, pp. 95–101. [In Russ].

15. Voznesenskiy A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone. *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 23–30. DOI: 10.1134/S1062739115010044.

16. Shkuratnik L. V., Novikov E. A. Thermally stimulated acoustic emission of rocks as a promising tool of geoscontrol (review). *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 6, pp. 21–27. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.04.

17. Voznesenskii A. S., Shkuratnik V. L., Kutkin Ya. O. Dynamics of thermal and mechanical loading as a cause of acoustic emission in rock. *Rock Dynamics and Applications – State of the Art. Proceedings of the 1st International Conference on Rock Dynamics and Applications, RocDyn-1*. 2013, pp. 429–435.

18. Novikov E. A., Shkuratnik V. L., Zaytsev M. G. Manifestations of acoustic emission in frozen soils with simultaneous influence of variable mechanical and thermal effects on them. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 238, no. 4, pp. 383–391. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.383.

19. Rivera-Gómez C., Galán-Marín C., López-Cabeza V. P., Diz-Mellado E. Sample key features affecting mechanical, acoustic and thermal properties of a natural-stabilised earthen material. *Construction and Building Materials*. 2021, vol. 271, article 121569. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121569.

20. Xia Z., Chen R.-P., Kang X. Laboratory characterization and modelling of the thermal-mechanical properties of binary soil mixtures. *Soils and Foundations*. 2019, vol. 59, no. 6, pp. 2167–2179. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.11.013.

21. Novikov E. A., Shkuratnik V. L., Zaitsev M. G., Klementyev E. A., Blokhin D. I. Acoustic emission of frozen soils under quasi-static mechanical and cyclic thermal loading. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020, vol. 57, no. 2, pp. 97–104. DOI: 10.1007/s11204-020-09643-6.

22. Novikov E. A., Zaytsev M. G. Using acoustic emission and memory effect in evaluation of structural stability of frozen soil under cyclic heating and mechanical loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 30–44. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-30-44.

23. Kravchenko O. S. Regular patterns of acoustic activity, axial and volumetric strains in rock salt under Karman's loads and thermal effects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 96–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-96-104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Евгений Александрович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: e.novikov@misis.ru,

Scopus ID: 55235147200,

ORCID ID: 0000-0002-6997-1097,

Клементьев Евгений Андреевич¹ — студент,

e-mail: evgeniy-klementevof@mail.ru,

Scopus ID: 57217249165,

ORCID ID: 0000-0001-7242-0440,

¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Новиков Е.А., e-mail: e.novikov@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.A. Novikov¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: e.novikov@misis.ru,

Scopus ID: 55235147200,

ORCID ID: 0000-0002-6997-1097,

E.A. Klementyev¹, Student,

e-mail: evgeniy-klementevof@mail.ru,

Scopus ID: 57217249165,

ORCID ID: 0000-0001-7242-0440,

¹ National University of Science and Technology «MISiS»,

119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: E.A. Novikov, e-mail: e.novikov@misis.ru.

Получена редакцией 11.01.2022; получена после рецензии 14.02.2022; принята к печати 10.03.2022.

Received by the editors 11.01.2022; received after the review 14.02.2022; accepted for printing 10.03.2022.

