ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(3):83-106
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК (624.131.37+624.138+551.34):(534.2+534.6) DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_83

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ХИМИЧЕСКИ ЗАКРЕПЛЕННЫХ ГРУНТОВ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Е.А. Новиков[1], Е.А. Клементьев[1]

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

Аннотация: Обобщены и проанализированы результаты цикла экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния температурных полей на закономерности формирования акустической эмиссии в исходно рыхлых (несвязанных) просадочных грунтах, находящихся в условиях повторно-переменного, проводимого по циклической схеме, квазистатического механического нагружения и, одновременно, укрепляемых путем инъецирования вяжущих композитных растворов. Раскрыты основные методические положения, рационализирующие обработку первичных измерительных данных, и подходы к теоретической интерпретации установленных закономерностей. Представлены характерные примеры использования данных закономерностей при решении задач оценки изменения устойчивости грунтов в ходе взаимодействия и развития двух противоположных процессов: консолидации и разупрочнения структурных связей в грунтово-тампонажном геоматериале. Обосновывается существование в подвергаемых химическому закреплению грунтах термоакустоэмиссионного эффекта памяти, который, исходя из присущих ему черт и особенностей проявления, может рассматриваться в качестве своего рода эквивалента классического эффекта Фелисити. Раскрыт физический механизм возникновения данного термоакустоэмиссионного эффекта памяти, объясняющий отмеченные закономерности его проявления. Показана потенциальная целесообразность использования метода термостимулированной акустической эмиссии для контроля качества производства инъекционных работ при устройстве искусственных оснований для зданий и сооружений различного назначения в зонах распространения грунтов, подверженных оползневым явлениям, просадкам и другим опасным геологическим процессам, ведущим к потере геомассивом устойчивости.

Ключевые слова: грунты, температурный режим, несущая способность, напряженное состояние, искусственное упрочнение, акустическая эмиссия, закономерности, эксперимент, разработка способов геоконтроля, акустико-эмиссионный эффект памяти.

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

Для цитирования: *Новиков Е. А., Клементьев Е. А.* Влияние изменения устойчивости химически закрепленных грунтов при многократном термомеханическом нагружении на закономерности термостимулированной акустической эмиссии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 83–106. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_83.

© Е.А. Новиков, Е.А. Клементьев. 2023.

Effect of stability variation in chemically reinforced ground under multiple thermomechanical loads on thermally stimulated acoustic emission patterns

E.A. Novikov[1], E.A. Klementyev[1]

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

Abstract: The article generalizes and analyzes experimental research findings on the effect of temperature conditions on acoustic emission patterns in initially loose (incoherent) collapsible soil subjected to cyclic repeatedly varied quasistatic mechanical loading in simultaneous reinforcement by injection of binding composite solutions. The guidelines to routinize the raw data processing and the approaches to theoretical interpretation of the found regular patterns are given. The application of the found laws is described as case-studies of soil stability variation in interaction of two opposite processes: consolidation and weakening of structural bonds in soil–grouting geomaterial. The chemically reinforced ground possesses thermally stimulated acoustic emission memory which, based on its features, can be assumed as an equivalent of the classical Felicity effect. The disclosed physical mechanism of the thermally stimulated acoustic emission memory explains its behavior. The article illustrates the potential advisability of using the thermally stimulated acoustic emission method in the quality control of injection operations in grounds susceptible to sliding, subsidence and other hazardous geological processes capable to induce instability in rock masses.

Key words: soils, temperature conditions, load-bearing capacity, stress state, artificial reinforcement, acoustic emission, regular patterns, experience, geocontrol development, acoustic emission memory effect.

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

For citation: Novikov E. A., Klementyev E. A. Effect of stability variation in chemically reinforced ground under multiple thermomechanical loads on thermally stimulated acoustic emission patterns. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(3):83-106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_83.

Введение

В настоящее время при устройстве фундаментных оснований высотных зданий и ведении строительных работ на структурно неустойчивых грунтах (просадочных, опасных по подвижкам и сползанию, значительно обводненных и др.) широкое распространение по всему миру получила практика их искусственного химического закрепления путем нагнетания в геомассив под давлением водоцементных растворов [1 — 5].

Существенно реже, но все же с достаточно стабильной периодичностью для инъецирования с целью закрепления грунтового основания в режиме сплошной пропитки или путем формирования в нем несущих столбов используют компаундные смеси на основе различных смол или силиката натрия и калия (жидкое стекло) [6 — 8]. В отдельных случаях находят применение такие специальные методы усиления грунта, как плавление и спекание песков и глинистых пород; созда-

ние ледопородного ограждения; пропускание постоянного электрического тока через грунтовый материал, активизирующее в нем процессы электроосмоса, электролиза и обменные реакции, приводящие к повышению удельного сцепления частиц грунта при снижении их общей гидрофильности и, как следствие, к формированию более устойчивых грунтовых агломератов.

Также среди работ последнего времени заслуживают упоминания такие [9—12], в которых рассматривается возможность применения лигноцеллюлозных и полипропиленовых волокон, сланцевых зол, а также гранулированного доменного шлака и других особых материалов, в качестве стабилизирующих элементов для повышения устойчивости грунтов к влиянию сдвиговых нагрузок. Впрочем, обработка грунтов посредством размещения в них армирующих геосинтетиков, равно как и популярные методы их механического усиления [13—15] (главным образом, устройство грунтовых подушек за счет вибрационного или давлением груза трамбования), по сравнению с химическим укреплением, характеризуются значительно меньшим возрастанием физико-механических свойств грунта и не гарантируют их долговременного сохранения под воздействием природно-техногенных нагрузок. В связи с чем при решении задач обеспечения устойчивости фундаментов капитальных строений, возводимых в зонах распространения просадочных и (или) опасных по смещениям грунтов, методы механического усиления, как правило, играют лишь вспомогательную роль. Более развернутый сравнительный обзор методов укрепления грунтовых оснований представлен в работе [16].

Между тем несмотря на наличие значительных технических возможностей для выполнения работ по искусственному закреплению грунта, их результативность по-прежнему носит существенно вероятностный характер. Последнее вызвано целым рядом факторов, среди которых особо выделить можно высокую неопределенность пространственной изменчивости структуры, состава и свойств грунтового массива, не позволяющую создать некую универсальную методику закрепления, гарантирующую получение заранее известного результата в любых условиях. Поэтому в каждом отдельном случае необходимо на основе известных методических разработок и априорной информации об особенностях геоподосновы конкретного объекта специально составлять методику упрочнения его основания. Причем коррективы в нее зачастую вносятся вплоть до завершения работ. Сказанное обосновывает высокие требования к полноте, достоверности и быстроте получения измерительной информации, используемой для принятия оперативных решений по управлению рисками в области промышленной безопасности из-за недостаточного закрепления геосреды. Тем не менее, хотя такие измерения могут проводиться по обширному спектру способов, каждый из них, имея определенные достоинства, равным образом не лишен и значимых ограничений области применения. Так, измерительные данные проводимых в лабораторных или непосредственно в полевых условиях механических испытаний и структурного изучения грунтов [17—22], хотя и информативны с точки зрения оценки склонности геомассива к потере стабильности и определения его деформированного состояния на момент проведения измерений или отбора проб, но, поскольку их реализация в режиме мониторинга зачастую технически затруднительна, принципиально не позволяют своевременно вскрыть появление сосредоточенных очагов развития просадочных, оползневых и других опасных процессов. В то же

время применение методов геофизического мониторинга [23—27] на объектах строительства во многих случаях носит весьма ограниченный характер, как по причинам экономического свойства, так и в силу все еще не в полной мере устраненных проблем с помехозащищенностью, сложностью и неоднозначностью методологии решения обратных задач при геологической интерпретации геофизических данных.

Отмеченное подчеркивает актуальность и значимость дальнейшего совершенствования методов исследования параметров структуры, свойств и состояния грунтов. Среди перспективных методических разработок, способных обеспечить продвижение в решении рассматриваемой задачи, следует выделить метод термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) [28]. Уже получены первые результаты [29, 30], свидетельствующие о его пригодности для мониторинга деформированного состояния подвергнутых однократному ступенчато возрастающему квазистатическому нагружению закрепленных твердеющими растворами двухкомпонентных гомогенных песчано-глинистых грунтов. Однако экспериментальная проверка достоверности получаемых по методу ТАЭ результатов в более приближенных к реальным и потому более сложных условиях многократного повторно-переменного нагружения обработанных вяжущими веществами многокомпонентных грунтовых проб с ярко выраженной слоистой структурой и высоким содержанием черного почвенного грунта до сих пор не проводилась, хотя это представляется необходимым для разработки рациональной методики термоакустоэмиссионного контроля динамики прочностных свойств натурного массива искусственно упрочненных грунтов.

Также новизна настоящей работы состоит в экспериментальной проверке возникновения при циклическом термомеханическом нагружении подвергнутых физико-химическому закреплению грунтов характерных проявлений акустической эмиссии, которые допустимо рассматривать в качестве присущих тампонажно-грунтовым геоматериалам эквивалентов эффектов Кайзера или Фелисити.

Методика экспериментов: пробоподготовка, средства измерения и испытательное оборудование, алгоритмы получения и обработки измерительных данных

Испытаниям подвергнуты более 12 проб Ø152 мм и высотой 240…280 мм, составленных из жидкости высокой (6…8 г/л), средней (3…5 г/л) или низкой (не более 1,0…1,2 г/л) степени засоленности (минерализации) и различных комбинаций прослоев следующих компонент: чернозем, характеризующийся значительно выраженной рыхлой структурой и содержанием гумуса до 10%; глина; песок с фракционным составом в пределах от 0,3 до 1,1 мм; суглинки и супеси на основе смесей вышеуказанных грунтов.

Толщина каждого прослоя составляла не менее ≈1/6 и не более ≈1/3 от высоты соответствующей пробы. Число прослоев — от 3 до 6. Общее содержание каждой грунтовой компоненты в пробе не превышало ≈50% от ее совокупной массы. Влага добавлялась в количестве, необходимом для выдерживания соотношения между ней и сухой массой пробы в интервале от 1:10 до 1:5.

Нагнетание закрепляющих растворов (смоляные компаунды, вяжущие вещества на основе цементов различных марок) у прочих проб проводилось в центральную часть, таким образом, чтобы сформировать несущий столб диа-

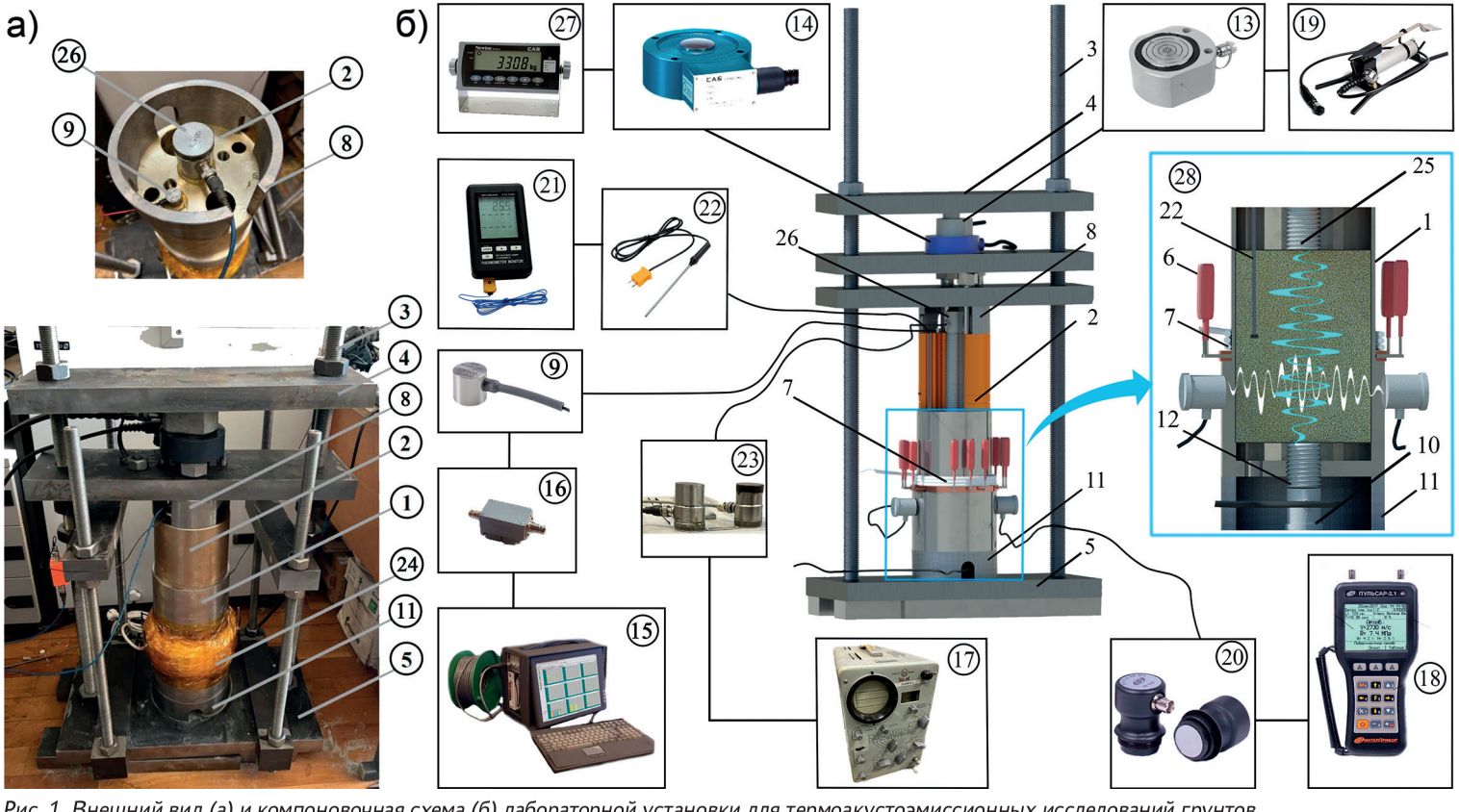


Рис. 1. Внешний вид (а) и компоновочная схема (б) лабораторной установки для термоакустоэмиссионных исследований грунтов
Fig. 1. Appearance (a) and layout diagram (b) of a laboratory setup for thermoacoustic emission studies of soils

метром до Ø100 мм и высотой 220…260 мм. По сравнению с предыдущей серией экспериментов, где отверждался весь объем испытуемого грунта, новая структурная организация проб (воспринимающий прикладываемые механические нагрузки стержень из химически консолидированного геоматериала, со всех сторон окруженный рыхлой грунтовой толщей) минимизирует передачу нагрузок на стенки колбы и, тем самым, с лучшей степенью приближения воспроизводит натурное развитие деформаций в локальной зоне закрепления грунта вокруг инъектора при обработке твердеющими растворами реального геомассива. Другими словами, если в прежних опытах металлические стенки колбы исходно соприкасались с отвержденным телом пробы и блокировали формирование в ней поперечных смещений и деформаций, выступая в роли своего рода крепи, теперь картина распределения напряжений в пробе свободна от данного искажения и более достоверно имитирует процесс натурного деформирования грунтов.

Опыты проведены на лабораторной установке, внешний вид и компоновочная схема расположения основных функциональных элементов которой проиллюстрированы на рис. 1, где: *1* — толстостенная металлическая испытательная камера (колба) для размещения проб грунтов; *2* — нагрузочный поршень с уплотнительными элементами, препятствующими выдавливанию влаги из испытательной камеры; *3* — несущие каркасные стойки с направляющими и фиксаторами; *4*, *5* — платформы нагружения, функционально совмещенные с опорными плитами для установки нагрузочного и тензометрического устройств; *6* — равномерно размещенные по периметру камеры резистивные нагреватели; *7* — высокотемпературный нагревательный кабель; *8* — верхнее защитное кольцо с пропилом для вывода цепей датчиков; *9* — акустико-эмиссионный датчик серии GT (Интерюнис); *10* — излучающий ультразвуковой преобразователь; *11* — нижнее защитное кольцо с пропилом для вывода цепей датчиков; *12* — нижний (излучающий) дюралюминиевый ультразвуковой волновод; *13* — гидравлический домкрат ДН-20П12 (КВТ)(нагрузочная способность — 20 т); *14* — датчик тензометрический LSC-20T; *15* — акустико-эмиссионная измерительная система A-Line 32D (Интерюнис); *16* — предусилители типа ПАЭФ (Интерюнис); *17* — ультразвуковой прибор УКБ-1М (продольное прозвучивание); *18* — ультразвуковой прибор Пульсар-2.1 (поперечное прозвучивание); *19* — помпа высокого давления ПМН-7012УА (КВТ) (длительное удержание давления нагрузки номиналом до 70 МПа); *20* — ультразвуковые преобразователи П111-0.06-И2 (номинальная частота 60±10 кГц); *21* — температурный измеритель-регистратор АТЕ-9380; *22* — термопары АТА-210; *23* — ультразвуковые преобразователи УКБ-1М (номинальная частота 100 кГц); *24* — кожух из термоизоляционного материала (минимизирует потери на рассеивание тепла вовне и тем самым обеспечивает эффективную подачу теплового потока внутрь испытательной камеры); *25* — верхний (приемный) дюралюминиевый ультразвуковой волновод; *26* — приемный ультразвуковой преобразователь; *27* — устройство индикации нагрузок CAS NT-201A; *28* — внутренняя часть испытательной камеры с пробой.

Пробам сообщалось от 3 до 6 циклов статического ступенчато-возрастающего псевдотрехосного сжатия с вариативным давлением бокового обжима, каждый из которых включал не менее 5 ступеней воздействия квазистатических нагрузок номиналом от 700 кг до 15 т. Шаг между последовательными ступенями нагружения составлял порядка 1800…2500 кг.

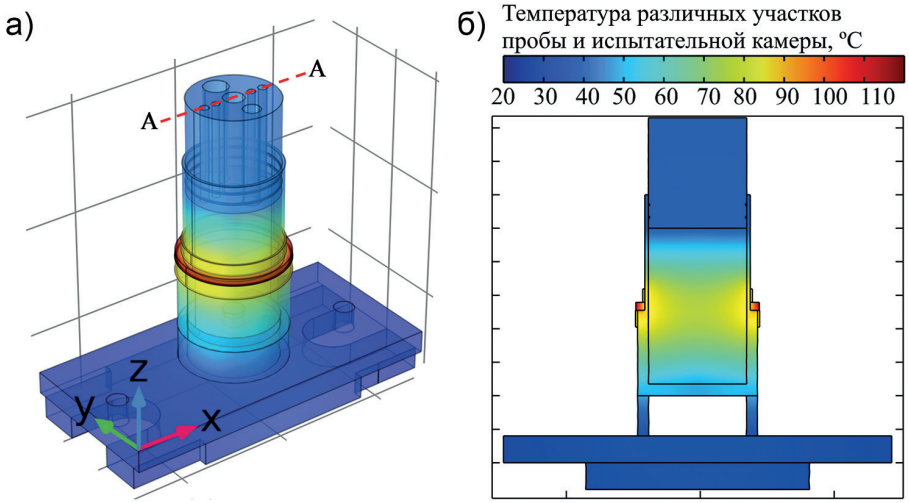


Рис. 2. Конечно-элементная модель распределения температур (°С) в испытательной камере и размещенной в ней грунтовой пробе во время ее исследования методом ТАЭ: общий вид 3D-модели и расположение плоскости А – А (а); сечение по высоте (ось Z) в плоскости А – А (б)

Fig. 2. Finite-element model of temperature distribution (°C) in the test chamber and soil sample placed in it, during its study by TAE method: general view of 3D model and location of A – A plane (a); section along the height (Z axis) in plane A – A (b)

Параллельно механическому нагружению в грунте создавалось стимулирующее генерацию полезных событий акустической эмиссии температурное поле, характеристика предельных параметров которого показана на рис. 2.

Проводимые при отключенных излучателях упругих волн на этапах I и II акустико-эмиссионные измерения относятся к пассивным, предполагающим регистрацию пакетов событий акустической эмиссии, испускаемой непосредственно структурными связями образцов под действием внутренних напряжений, возникающих при наложении полей механических напряжений и от прогрева геоматериала.

В свою очередь, к активным относятся акустико-эмиссионные измерения, выполняемые на этапах 0 и III по схеме, совмещающей термическую активизацию структурных связей грунта с его прозвучиванием источником нормированного сигнала, по изменению параметров которого после прохождения через объект контроля судят об эволюции состояния последнего.

Акустико-эмиссионные измерения выполнялись после достижения условной стабилизации деформаций на каждой из ступеней нагружения, о наступлении которой судили по снижению активности акустической эмиссии (АЭ) до уровня, близкого к фоновому. Алгоритм данных измерений представлен на рис. 3. Перечень и базовый физический смысл определяемых параметров изложены ниже. Целесообразность выбора именно этих параметров в роли информативных подтверждена итогами статистической обработки всех зарегистрированных при выполнении экспериментов первичных измерительных данных на предмет их чувствительности к изменениям параметров структуры и напряженно-деформированного состояния геоматериалов.

1. Активность $\dot{N}_{\Sigma}$ [имп./с] — число событий АЭ за единицу времени: мера интенсивности процессов деструкции и перестройки структурных связей.

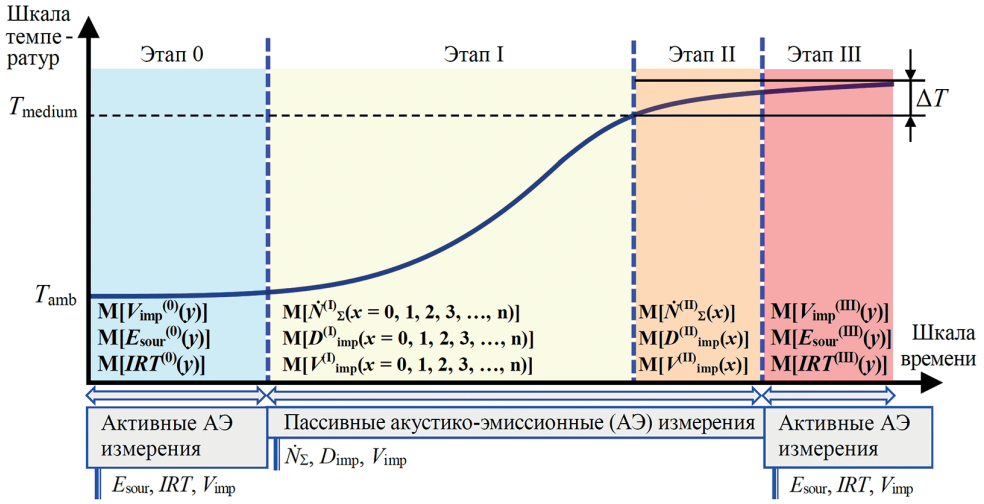


Рис. 3. Схема температурного режима экспериментов
Fig. 3. Scheme of temperature regime of experiments

2. Длительность импульса D_{imp} [мкс/с] — средний интервал времени между началом и концом испускания всех сигналов АЭ за единицу времени: мера исходной устойчивости структурных связей, ставших источниками АЭ.

3. Число выбросов в импульсе V_{imp} [выбр./с] — количество превышений пакетом событий АЭ порогового уровня, отделяющего полезный сигнал от фоновых шумов: критерий оценки повторяемости событий АЭ, определяющий степень доверия к несомой ими информации.

4. Энергия источника E_{sour} [дБ/с] — средняя величина акустической энергии, поступающая на приемный преобразователь за единицу времени: мера сохраненной в зондирующей упругой волне энергии после ее взаимодействия с геосредой.

5. Время нарастания импульса IRT [мкс/с] — усредненный по всем пакетам событий АЭ временной интервал между началом регистрации импульсов АЭ и моментом достижения этими импульсами своего амплитудного значения: мера «емкости» структурных связей по отношению к энергии, которую им нужно аккумулировать для перехода в предельно-напряженное состояние.

Этап 0. Установочные (эталонные) активные акустико-эмиссионные измерения на грунте в исходном состоянии, выполняющиеся при естественной температуре (T_{amb}) окружающей среды, под действием на него малого механического пригруза (≈200…300 кг), обеспечивающего приемлемые контактные условия с волноводом, но не приводящего к значимому изменению свойств и состояния пробы. Усредняя все записанные на данном этапе значения V_{imp}, E_{sour}, IRT по его временной области, определяют

$$M\left[V_{imp}^{(0)}(y)\right], M\left[E_{sour}^{(0)}(y)\right], M\left[IRT^{(0)}(y)\right],$$

где y — порядковый номер периода ультразвукового прозвучивания.

Этап I. Прогрев пробы до рабочей температуры T_{medium}, когда скорость ее возрастания не превышает ΔT при работающих в постоянном режиме нагревателях (по умолчанию $\Delta T \approx 2$ К/ч). Усредняя все записанные на данном этапе значения $\dot{N}_{\Sigma}$, D_{imp}, V_{imp} по его временной области, определяют

$$\mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{I})}(x)\right], \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(x)\right], \mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(x)\right],$$

где x — порядковый номер периода температурного воздействия.

На одну фазу нагревания, как правило, приходится несколько периодов ультразвукового прозвучивания, поэтому, хотя значения x и y охватывают один и тот же численный интервал [0, 1, 2, 3, ... $n \to \infty$), между собой они не тождестенны.

Этап II. Выдержка разогретой до $T_{\mathrm{medium}}{}^{-0}_{+\Delta T}$ пробы при работающих в таком же, как на этапе I, режиме нагревателях, в течение времени, достаточного для стабилизации уровня $\dot{N}_{\Sigma}$, но не менее чем 15 мин. Усредняя все записанные на данном этапе значения $\dot{N}_{\Sigma}$, D_{imp}, V_{imp} по его временной области, определяют

$$\mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{II})}(x)\right], \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right], \mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right].$$

Этап III. Прозвучивание грунта, находящегося в неизменном, таком же как в завершении этапа II, температурном режиме, упругими волнами ультразвукового диапазона частот. Продолжительность данного этапа 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 E_{sour} и V_{imp} от своих средних величин не превышает ±3%. Усредняя все записанные на данном этапе значения V_{imp}, E_{sour}, IRT по его временной области, определяют

$$\mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{III})}(y)\right], \mathrm{M}\left[E_{\mathrm{sour}}^{(\mathrm{III})}(y)\right], \mathrm{M}\left[IRT^{(\mathrm{III})}(y)\right].$$

После завершения измерений по этапу III отключают нагреватели и дают пробе остыть естественным путем, вплоть до достижения ее температурой величины T_{amb}, когда скорость ее изменения не превышает ΔT. Далее пробе сообщают следующую механическую нагрузку и снова последовательно проводят измерения по этапам I, II и III. Измерения по этапу 0 для каждой пробы выполняют единожды, перед началом первого цикла нагружения, и в последующих циклах повторно не проводят.

Комплексная оценка всей совокупности измерительных данных реализована посредством показателя $RT_{пеи}^{MOD}$, являющегося усовершенствованной версией его предшественника, показателя $RT_{пеи}^{gr}$, подробно рассмотренного в работах [29, 30]:

$$RT_{пеи}^{MOD}(x;y) = \frac{\mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right]}{\mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{I})}(x)\right] \times \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(x)\right]} \times \frac{\mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{II})}(x-1)\right] \times \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x-1)\right]}{\mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{I})}(x-1)\right] \times \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(x-1)\right]} \times$$

$$\times \frac{\mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times \mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x-1)\right]}{\mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(x)\right] \times \mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(x-1)\right]} \times \frac{\mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{III})}(y)\right] \times \mathrm{M}\left[E_{\mathrm{sour}}^{(\mathrm{III})}(y)\right] \times \mathrm{M}\left[IRT^{(\mathrm{III})}(y)\right]}{\mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(0)}(y)\right] \times \mathrm{M}\left[E_{\mathrm{sour}}^{(0)}(y)\right] \times \mathrm{M}\left[IRT^{(0)}(y)\right]}.$$

По сравнению с $RT_{пеи}^{gr}$, в $RT_{пеи}^{MOD}$ принято решение отказаться от нормирования данных пассивных измерений АЭ, относительно значений

$$\left(\mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{I})}(0)\right] \times \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(0)\right] \times \mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{I})}(0)\right],\ \mathrm{M}\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times \mathrm{M}\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times \mathrm{M}\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right]\right),$$

полученных на пробе в исходном состоянии, поскольку, как показывает собранная статистика, пассивные акустические измерения характеризуются существенно большими, по сравнению с аналогичными активными измерениями, вероятностями возникновения погрешностей. Причем в случае пропуска помеховой составляющей при цензурировании эталонного замера создаются предпосылки для искажения результатов обработки вообще всех последующих измерительных данных, что неприемлемо.

Вдобавок ситуация может быть отягчена высокой сложностью акустограмм, требующих времяемкого глубокого анализа для определения способа эффективного учета и уменьшения погрешностей. Потому, с целью снижения влияния отдельного замера на достоверность всей их серии в целом и облегчения требований к доскональности анализа помехоустойчивости сигналов ТАЭ для нужд цензурирования, взамен нормирования по эталонной «нулевой» величине в $R\text{T}_{пеи}^{MOD}$ использована схема совместной оценки результатов каждого последующего (x) и каждого предыдущего ($x-1$) цикла пассивных измерений АЭ. Такой подход, реализующий принцип обработки данных «скользящим окном», способствует снижению рисков систематических погрешностей при повышении достоверности численного выражения кинетики развития и, соответственно, степени преобладания друг над другом, процессов консолидации и разупрочнения структурных связей в грунтово-тампонажном геоматериале. Равным образом включение в расчетный алгоритм, как показано выше, двух последовательно полученных блоков данных пассивных акустических измерений в случае наличия у них незначительных погрешностей позволяет отчасти их нивелировать, а если же данные блоки содержат в себе преимущественно лишь помеховую составляющую, последняя будет усилена и, как следствие, при статистической обработке проявится более резко, чем намного упростит установление и выбраковку скомпрометированных измерительных данных.

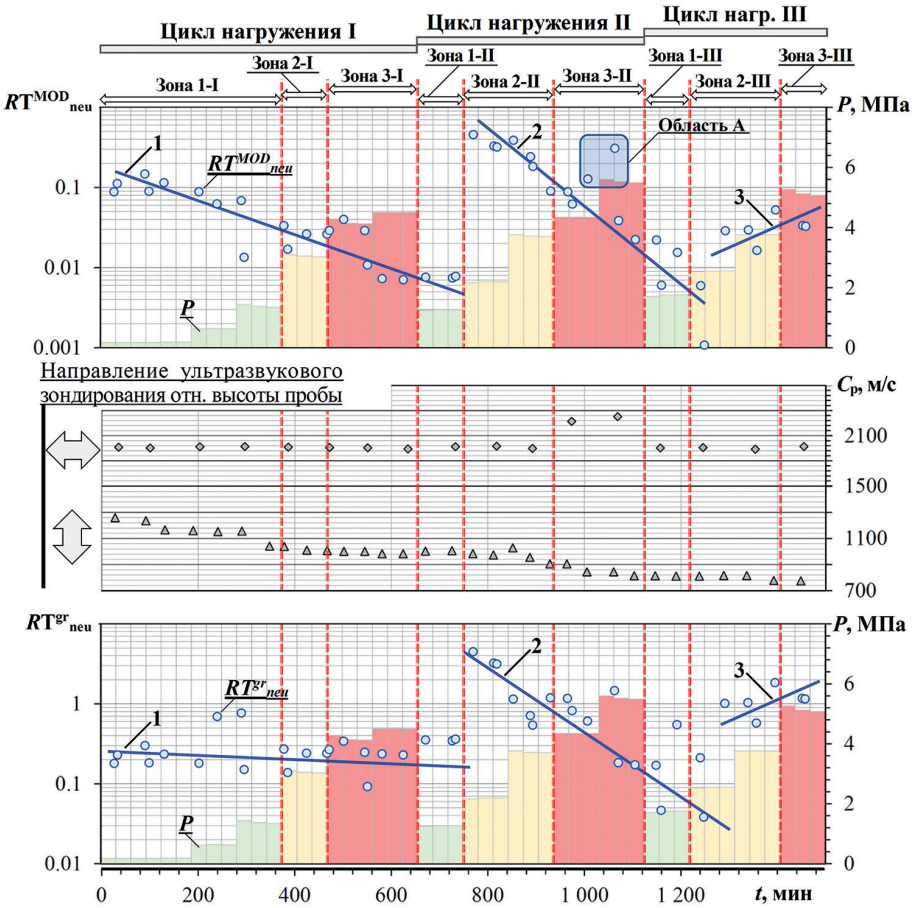
При этом показатели $R\text{T}_{пеи}^{gr}$ и $R\text{T}_{пеи}^{MOD}$ имеют одинаковый физический смысл, а именно — мера структурной устойчивости геосреды, учитывающая, насколько нарушен геоматериал в абсолютном выражении, а также принимающая в расчет кинетику процессов развития деформированного состояния геоматериала.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Далее рассмотрим отдельные наиболее показательные итоги экспериментов.

Сравнительное сопоставление получаемых посредством $R\text{T}_{пеи}^{MOD}$ и $R\text{T}_{пеи}^{gr}$ результатов, необходимое для наглядного подтверждения факта повышения достоверности численных оценок деформированного состояния геоматериала, при их выполнении посредством нового вышеобоснованного показателя, на примере пробы 2-06 (глина: 13,7%; песок: 30,6%; чернозем: 25,6%; жидкость средней степени минерализации: 14,2%), отвержденной цементным раствором марки М500 в количестве 16,3% от общей массы рыхлого грунта в составе пробы, представлено на рис. 4. Для упрощения восприятия данные измерений на стадии набора твердеющим веществом прочности здесь не показаны.

Взаимосвязь *1* с рис. 4 отражает процесс потери устойчивости грунтоцементным столбом ≈Ø100 мм и высотой порядка 240 мм, сформированным вокруг пересекающего в центральной плоскости пробы по всей ее высоте канала инъецирования. Так как отвердителя в данном случае введено относительно мало и ввиду того, что составляющие пробу грунты имели существенно различные коэффициенты фильтрации и водопоглощения, пропитка тампонажным раствором тела пробы носила неоднородный характер. Наряду с областями, аккумулировавшими значительное количество цемента, были широко представлены недостаточно закрепленные участки с малой концентрацией твердеющего агента. В силу чего уже в процессе первого цикла нагружения фиксировались значительные просадки, обусловленные обжатием слабо закрепленных локальных объемов грунта, а в завершение цикла I произошло разделение грунтоцементной агломерации на несколько крупных



зона 1 — $P < 0{,}5\times\sigma_{сж}$; зона 2 — $0{,}5\times\sigma_{сж} \leqslant P < 1{,}0\times\sigma_{сж}$; зона 3 — $1{,}0\times\sigma_{сж} \leqslant P < 1{,}5\times\sigma_{сж}$,

$\sigma_{сж}$ — математическое ожидание предела прочности составляющего пробу тампонажно-грунтового материала, определенное из испытаний контрольных образцов по ГОСТ 21153.2

Рис. 4. Зависимости величин показателей RT_{neu}^{gr}, RT_{neu}^{MOD} сообщаемой пробе нагрузки P и скорости C_p распространения в ней ультразвуковых волн от времени t с начала эксперимента

Fig. 4. Regularities between values of indicators RT_{neu}^{gr}, RT_{neu}^{MOD}, provided to sample loads P and velocities C_p of ultrasonic waves propagation in it, based on t time from the beginning of experiment

блоков, независимо воспринимающих прикладываемые к пробе сжимающие усилия.

Тем не менее суммарная прочность данных блоков оказалась даже выше прочности исходного грунтоцементного столба, что объясняется:

- возросшей общей площадью поверхность распределения нагрузки при разделении грунтоцементного столба на блоки;
- склонностью грунтоцементного столба к изгибной деформации, влияния которой менее протяженные блоки практически не испытывают;
- априори более высокой концентрацией цемента в частях пробы, сохранивших целостность после первого цикла нагружения.

Процесс последующего разуплотнения таких частей описывается взаимосвязью *2*, а взаимосвязь *3*, в свою оче-

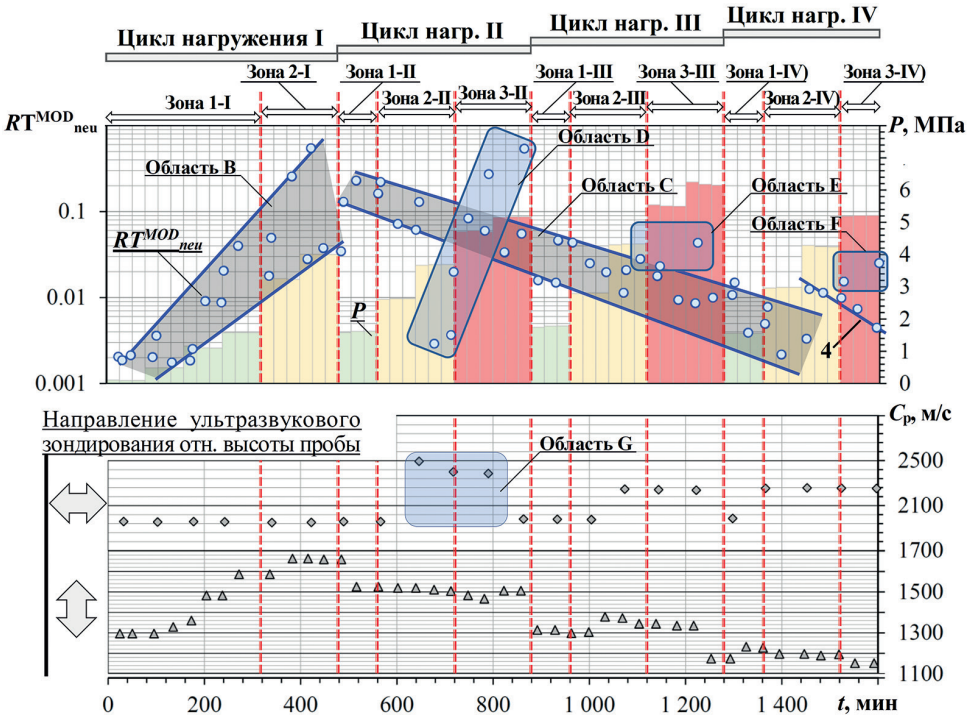
редь, характеризует переуплотнение («утрамбовку») обломков, образовавшихся в результате окончательного развала вышеуказанных блоков. При этом сами по себе данные обломки не имеют несущей способности и, пропорционально возрастанию степени своего уплотнения, передают всю большую долю работы нагрузочного устройства стенкам камеры, выступающей теперь в роли опалубки. Как следствие, зоны *2-III* и *3-III* (см. рис. 4) уже не столько отражают прочность геоматериала, сколько описывают процесс компрессионного прессования его навески в условно «неразрушимой» пресс-форме, по мере которого грунт в самом деле приобретает дополнительную устойчивость за счет исчерпания возможности к дальнейшей просадке при объективной невозможности боковых смещений.

Таким образом, из рис. 4 нетрудно увидеть, что в отношении локальных актов деструкции и структурных преобразований в относительно устойчивых геообъектах (зоны с *1-I* по *1-II*) $RT_{пеи}^{MOD}$ обладает существенно лучшей, чем у $RT_{пеи}^{gr}$, чувствительностью, при сопоставимой достоверности численного отображения хода процессов эволюции объемных деформаций в значительно нарушенных тампонажно-грунтовых агломератах (зоны с *2-II* по *3-III*).

Также стоит особо отметить восприимчивость $RT_{пеи}^{MOD}$ применительно к развитию деформаций, как в продольной плоскости, что подтверждается показанными на рис. 4 данными ультразвукового прозвучивания по направлению вдоль высоты пробы, проводимого одновременно с ее испытаниями по методу ТАЭ, так и к поперечным деформациям. Последнее следует из всплеска значений $RT_{пеи}^{MOD}$ в области *A* (см. рис. 4), что связывается с временной консолидацией грунта в горизонтальной плоскости, установленной из экстремума распределения величин $C_р$, полученных при проведении поперечного ультразвукового прозвучивания во время термоакустоэмиссионных испытаний зоны *3-II* (см. рис. 4).

С целью подтверждения справедливости вышеизложенных выкладок и интерпретации механизмов развития деформированного состояния по изменениям характера взаимосвязей $RT_{пеи}^{MOD}(P; t)$ и $C_р(P; t)$ приведем итоги испытания пробы 2-07 (рис. 5): 13,3% глины; 30,6% песка; 26,6% чернозема; 14,0% воды и 24,6% цемента марки М500, относительно объема грунта внутри зоны инъецирования. Отличительной особенностью данной пробы является наличие мощного слоя чернозема в центральной по высоте области (подробно — на рис. 6).

Распределение значений $RT_{пеи}^{MOD}(P; t)$ в области *B* описывает консолидацию пробы по мере завершения схватывания тампонажного раствора. Причем большой разброс данных значений показывает попеременное превалирование противоположно направленных процессов новообразования кристаллических структурных связей между частицами грунта при переходе обволакивающего их цементного теста в каменный материал и распада еще не успевших набрать прочность подобных связей при подаче на пробу очередной ступени нагружения. Далее, после окончания твердения связующего вещества, запускается процесс постепенного разуплотнения сформированной в результате инъецирования грунтоцементной несущей колонны, сообразного ее нагружению. Протекание вышеозначенного процесса, состоящего в накоплении в тампонажно-грунтовом агломерате дефектов микроуровня (см. рис. 5, зоны *1-II* и *2-II*), возникновении одиночных, преимущественно невзаимодействующих друг с другом, но соизмеримых с размерами пробы, разрывных макронарушений (см. рис. 5, зоны *3-II*, *1-III* и *2-III*), очаговой интенсификации



зона 1 — $P < 0{,}5\times\sigma_{сж}$; зона 2 — $0{,}5\times\sigma_{сж} \leqslant P < 1{,}0\times\sigma_{сж}$; зона 3 — $1{,}0\times\sigma_{сж} \leqslant P < 1{,}5\times\sigma_{сж}$,

$\sigma_{сж}$ — математическое ожидание предела прочности составляющего пробу тампонажно-грунтового материала, определенное из испытаний контрольных образцов по ГОСТ 21153.2

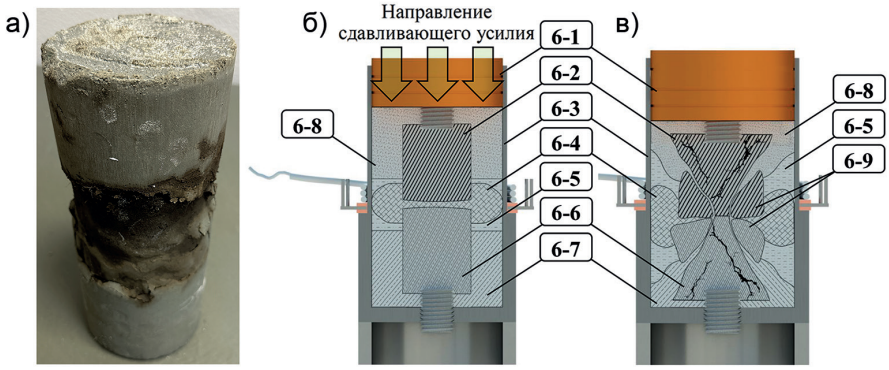
Рис. 5. Зависимости величин $RT_{неu}^{MOD}$ сообщаемой пробе нагрузки P и скорости C_p распространения в ней ультразвуковых волн от времени t с начала эксперимента

Fig. 5. Regularities between values of indicators $RT_{неu}^{MOD}$, provided to sample loads P and velocities C_p of ultrasonic waves propagation in it, based on t time from the beginning of experiment

образования деформаций на макроуровне, приводящей к формированию в столбе отвержденного грунта связанных групп магистральных трещин (см. рис. 5, зоны *3-III*, *1-IV* и частично *2-IV*), наглядно отображается облаком точек $RT_{неu}^{MOD}$ (*P*; *t*) в области *C*.

Вместе с тем, как следует из возрастания скоростей прохождения ультразвуковых колебаний в поперечной плоскости (см. рис. 5, область *G*) и согласно результатам отдельно проведенных по ГОСТ 21153.2 прессовых испытаний показанного на рис. 6 контрольного образца, на границе зон *2-II* и *3-II* произошло боковое выдавливание обладающего достаточно высокой пластичностью, но слабосвязанного слоя чернозема, сжатого сверху и снизу существенно лучше насытившимися цементом и потому более твердыми слоями супеси и суглинка, соответственно.

Спад значений $RT_{неu}^{MOD}$ (*P*; *t*) в начале области *D* (см. рис. 5), корреспондирующей с областью *G* (см. рис. 5), отражает дестабилизацию пробы на момент начала процесса выдавливания слоя отвержденного чернозема, а проявившаяся затем тенденция к возрастанию значений $RT_{неu}^{MOD}$ (*P*; *t*) объясняется уплотнением данного слоя по мере достижения им металлических стенок испытательной камеры. После чего прирост нагрузки сопровождался пропорциональным увеличе-



6-1 — нагрузочный поршень; 6-2 — слой отвержденной супеси;
6-3 — металлические стенки испытательной камеры; 6-4 — слой отвержденного чернозема;
6-5 — толща неотвержденного (далее — рыхлого) чернозема; 6-6 — слой отвержденного суглинка;
6-7 — толща рыхлого суглинка; 6-8 — толща рыхлой супеси;
6-9 — обломки несущей грунтоцементной колонны из слоев 6-2 и 6-6

Рис. 6. Внешний вид (а) контрольного образца грунтоцементной колонны пробы 2-07 и упрощенные схемы ее деформированного состояния после интенсификации выпирания слоя чернозема (б) (см. рис. 5, зоны 2-II, 3-II) и на момент предразрушения (в) (см. рис. 5, зона 2-IV)

Fig. 6. External view (a) of reference piece of soil-cement column of sample 2-07 and simplified diagrams of its deformed state after intensification of the black earth layer bulging (b) (Fig. 5: zones 2-II, 3-II) and at time of pre-fracture (c) (Fig. 5: zone 2-IV)

нием степени всестороннего обжатия чернозема и, как следствие, повышением его прочностных характеристик, тогда как колба блокировала развитие продольных деформаций. В таком псевдостабильном состоянии проба пребывала вплоть до смыкания слоев *6-6* и *6-2* (рис. 6) в конце зоны *3-II* (см. рис. 5). После чего слои *6-6* и *6-2* стали воспринимать сдавливающие усилия, минуя слой *6-4* (см. рис. 6), т.е. произошло приведшее к резкому снижению значений $RT_{пеи}^{MOD}(P;\ t)$ новообразование не контактирующей со стенками испытательной камеры и не передающей им механические напряжения жесткой стержневой системы из опирающихся друг на друга отвержденных слоев супеси и суглинка, деструкция которых в дальнейшем главным образом и определяла как характер $RT_{пеи}^{MOD}(P;\ t)$, так и остаточную несущую способность пробы в целом.

Всплески $RT_{пеи}^{MOD}(P;\ t)$ в области *E* (см. рис. 5) сгенерированы отдельными актами обжатия грунтов при вытеснении в них рудиментарных остатков чернозема из промежутка между слоями *6-6* и *6-2* (рис. 6), а в области *F* (см. рис. 5) — за счет расклинивания данных слоев по вертикали, приводящего к вытеснению в боковом направлении их обломков *6-9*, выступающих по отношению к окружающим рыхлым грунтами в роли своего рода уплотнительных поршней.

Зависимость *4* на рис. 5 по физическому смыслу идентична зависимости *2* на рис. 4: характеристика деформирования совокупности крупных блоков отвержденного геоматериала, образовавшихся после развала единой несущей грунтово-тампонажной колонны.

Графические изображения взаимосвязей $RT_{пеи}^{MOD}(P;\ t)$, полученных при испытании отвержденных смоляными компаундами грунтовых проб, приводить нет смысла, поскольку их характер мало отличается от представленного на рис. 4 и 5. Разница сводится исключительно к находящей отражение в особенностях параметров распределения $RT_{пеи}^{MOD}(P;\ t)$ специ-

фике механизмов деструкции компаундированных вяжущих веществ, а именно в превалировании упругих и пластических деформаций, тогда как деструкция цементного камня в общем и целом происходит согласно модели хрупкого разрушения.

В завершение уделим внимание экспериментально установленным отличительным чертам проявления характера термостимулированной акустической эмиссии, формирование которых обусловлено цикличностью нагружения подвергнутых химическому закреплению грунтовых материалов. С терминологической точки зрения такие проявления принято обозначать как «эффекты памяти». По своей физической сущности они выражают процесс исчерпания запаса источников АЭ, т.е. сохранивших целостность структурных связей, при каждом последующем нагружении. Когда все структурные связи, неустойчивые к воздействию определенной нагрузки, в значительной мере или полностью разрушаются уже во время первого приложения к ним данной нагрузки, и потому в последующих циклах нагружения импульсов АЭ больше не испускают, говорят о наличии эффекта Кайзера. В противном случае, при частичном разрушении связей в ходе предыдущих циклов нагружения, когда в последующих его повторениях значимая акустическая эмиссия возникает ранее подачи нагрузки свыше всей той, которую ранее испытывал объект измерений, — об эффекте Фелисити.

В рамках настоящей работы получено, что в случае термомеханического нагружения химически закрепленных грунтов классический эффект Кайзера, состоящий в резком, скачкообразном возрастании активности акустической эмиссии ($\dot{N}_{\Sigma}$), ровно в момент подачи на объект измерений нагрузки величиной более той, которая ранее на него воздействовала, начинает отчетливо проявляться при исследовании методом ТАЭ грунтово-тампонажных агломератов лишь при концентрации в них связующего вещества ≥80%, что для практики укрепления грунтовых оснований в строительстве, по сути, является нонсенсом. В случае реальной необходимости обеспечения столь высокой концентрации твердеющего раствора под фундаментом здания проведение его нагнетания в грунт не является целесообразным. Вместо этого зачастую отрывают котлован нужных размеров, который затем поэтапно заполняют, к примеру, бетоном или специальным композитом.

Больший интерес представляет обнаруженный в слабо- и средненасыщенных тампонажным раствором (более подробно ниже) грунтах термомеханический аналог эффекта Фелисити. Последний, в общем случае, предполагает регистрацию всплеска $\dot{N}_{\Sigma}$ ранее достижения действующими в объекте измерений напряжениями своего максимального уровня, имевшего место в ходе всей истории оказывавшихся на него механических и других воздействий.

Опыты выполнены при концентрации связующего вещества в грунте от 11% и выше. Менее насыщенные грунтово-тампонажные материалы не исследовались, поскольку столь малое количестве отвердителя не вызывает существенного повышения прочностных свойств грунта. Вследствие чего следует ожидать, что установленные применительно к нему закономерности, равно как и для случая концентраций отвердителя свыше 80%, не будут востребованы в практике геотехнического мониторинга зданий и сооружений по причине нераспространенности на объектах строительства в такой степени укрепленных грунтов.

Между тем при исследовании проявлений эффекта памяти в грунтах классический подход, основанный на анализе

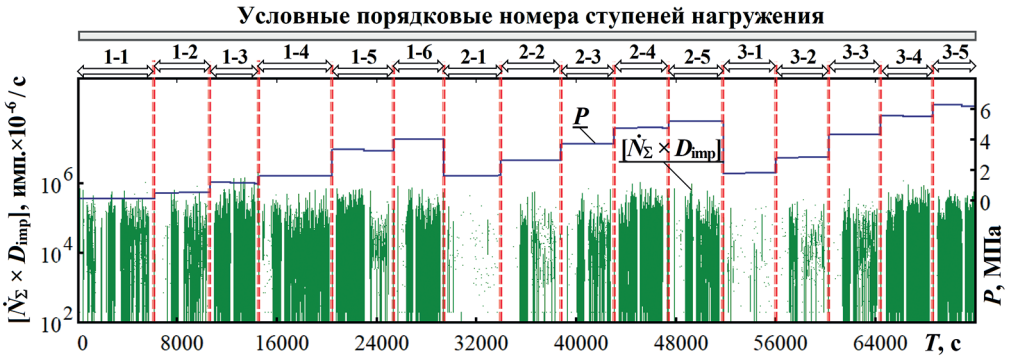


Рис. 7. Характерный пример распределения значений параметра
Fig. 7. Typical example of the parameter values distribution

распределения исключительно одного параметра, $\dot{N}_{\Sigma}$, не годится, на том основании, что если в скальных горных породах и металлах, для которых данные подходы и разработаны, практически любое проявление активности АЭ свидетельствует о трещинообразовании или актах деформирования иного типа (к примеру, не всегда сопровождающихся деструкцией явлений растяжения — сжатия), то при нагружении грунтов ассортимент потенциальных источников АЭ обычно существенно разнообразнее. Причем многие их них отражают ход процессов, не сказывающихся значимо на устойчивости грунтов (переориентация зерен, набухание глинистых частиц, движение жидких включений и др.) или даже, наоборот, приводящих к его упрочнению и, таким образом, восполнению запаса потенциальных источников АЭ (образование кристаллических связей между зернами по мере застывания отвердителя, механическое уплотнение за счет перемещения мелких частиц грунта в промежутки между более крупными частицами, обжатие минерального скелета и др.). Поэтому для выделения среди общего потока событий ТАЭ тех из них, которые несут информацию о деструкции и «остаточном ресурсе» долговременных структурных связей, что главным образом определяет устойчивость грунта к воздействию природно-техногенных нагрузок, следует применить более комплексный показатель: $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]$ (средневзвешенную $\dot{N}_{\Sigma}$ по D_{imp}), где D_{imp} — средняя продолжительность всех импульсов ТАЭ, зарегистрированных за единицу времени, связана пропорциональной зависимостью с интегральной прочностной характеристикой структурных связей, испустивших импульсы ТАЭ за этот временной отрезок. Чем данные связи прочнее, тем большее энергии им необходимо аккумулировать, чтобы перейти в возбужденное состояние и стать источниками ТАЭ, и, равным образом, тем больший промежуток времени им потребуется на полное израсходование собранного запаса энергии при достижении воздействующими на них напряжениями уровня, достаточного для их дестабилизации.

Показательный отрезок зависимости распределения значений $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]$ по времени T с момента начала термомеханического нагружения, при равномерном давлении номиналами P, представлен на рис. 7. Для удобства визуализации вынесенные на него значения $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]$ в основном относятся к этапам *I* и *II*, согласно схеме на рис. 3. На протяжении условно не показанных на рис. 7 временных периодов, когда термические воздействия грунту не сообщались и он пре-

бывал исключительно под влиянием поля механических нагрузок, уровень ТАЭ превышал фоновый не более чем в пределах погрешности.

Для численной оценки плотности распределения $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}](T; P)$ рассчитаны средние значения $M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]$ данного параметра за периоды времени T, в течение которых выдерживались соответствующие ступени нагружения P.

Из рис. 7 следует высокая плотность $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]$ при всех ступенях подачи сжимающих усилий (с *1-1* по *1-6* включительно) первого цикла нагружения.

На нижней ступени (*2-1*) второго цикла нагружения значимые события ТАЭ практически не фиксировались и в явном виде проявились лишь на ступени *2-2* ($M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}2} = 2{,}66\times10^{-2}$ имп./с), при подаче нагрузки $P_{2\text{-}2} \approx 2{,}6$ МПа, не доходящей до максимально ранее подаваемой $P_{1\text{-}6} \approx 4{,}0$ МПа.

На последующей ступени *2-3*, при нагрузке $P_{2\text{-}3} \approx 3{,}7$ МПа, превышающей сообщавшуюся пробе на ступени *1-5*, но все еще чуть ниже имевшейся на ступени *1-6*, уровень ТАЭ возрос до

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}3} = 3{,}08\times10^{-2}$ имп./с,

однако, как и прежде, не достиг порогового уровня ступени *1-5*:

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{1\text{-}5} = 5{,}51\times10^{-2}$ имп./с.

Данный порог оказался приблизительно взят лишь на ступени *2-4* при $P_{2\text{-}4} \approx$ $\approx 4{,}7$ МПа $> P_{1\text{-}6}$:

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}4} = 5{,}20\times10^{-2}$ имп./с.

Далее, при $P_{2\text{-}5} \approx 5{,}1$ МПа произошло снижение уровня ТАЭ до

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}5} = 3{,}17\times10^{-2}$ имп./с.

Что можно объяснить малой разницей между нагрузками $P_{2\text{-}4}$ и $P_{2\text{-}5}$. Как следствие, значительная доля неустойчивых к $P_{2\text{-}4}$ и $P_{2\text{-}5}$ источников ТАЭ вырабатывалась (оказалась разрушена) уже во время испытаний по ступени *2-4*, а весьма небольшого прироста напряжений, при переходе со ступени *2-4* на *2-5*, оказалось недостаточно для включения в процесс генерации ТАЭ существенного количества новых ее источников.

В третьем цикле нагружения вышеизложенная на примере анализа характера ТАЭ во II цикле картина во многом осталась без изменений, с той лишь разницей, что уровень ТАЭ в цикле III незначительно увеличился, хотя на ступени *3-1* все еще остался пренебрежимо малым. На последующих ступенях испытания получено:

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}2} = 2{,}71\times10^{-2}$ имп./с.,

против

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}2} = 2{,}66\times10^{-2}$ имп./с

у примерно совпадающей по параметрам нагружения ступени *2-2*;

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}3} = 3{,}12\times10^{-2}$ имп./с.

($M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}3} = 3{,}08\times10^{-2}$ имп./с);

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}4} = 5{,}48\times10^{-2}$ имп./с

($M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}4} = 5{,}20\times10^{-2}$ имп./с);

$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}5} = 5{,}36\times10^{-2}$ имп./с

($M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}5} = 3{,}17\times10^{-2}$ имп./с).

Анализ отмеченного позволяет следующим образом сформулировать изложенные ниже основные положения.

1. Повышенные показатели ТАЭ в цикле I обусловлены распадом исходно пребывавших в поврежденном состоянии жестких структурных связей конденсационно-кристаллизационного типа и по своей физической сущности малопрочных коагуляционно-тиксотропных (водно-коллоидных) связей. При этом поскольку в зонах *2-1* и *3-1* значимых проявлений ТАЭ не наблюдалось — иначе говоря, не сохранилось потенциальных ее источников, склонных к дестабилизации и генерации сигналов ТАЭ при нагрузках порядка $P_{1\text{-}1}$, $P_{1\text{-}2}$, $P_{1\text{-}3}$, $P_{1\text{-}4}$, $P_{2\text{-}1}$, $P_{3\text{-}1}$, с уверенностью можно диагностировать полную дезинтеграцию вышеобозначенных связей.

2. Структурные связи, формирующие характер ТАЭ в зонах *2-2, 2-3, 3-2* и *3-3*, оказались существенно нарушены в предшествующем цикле I нагружения, но, вместе с тем, их значимая доля сохранила целостность. Поэтому, хотя в указанных зонах проявления ТАЭ имеют достаточный представительный характер, но все же плотность распределения $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}](T; P)$ при $P_{2\text{-}2}$, $P_{2\text{-}3}$, $P_{3\text{-}2}$ и $P_{3\text{-}3}$ заметно ниже, чем при подаче на пробу сопоставимой $P_{1\text{-}5}$.

3. При оказании на пробу нагрузки $P_{2\text{-}4}$, превышающей максимальную нагрузку $P_{1\text{-}6}$ установочного цикла I, призванного сымитировать влияние внешних нагрузок на подвергнутый закреплению твердеющими растворами натурный грунтовый материал, равно как и при переходе от $P_{3\text{-}3}$ к $P_{3\text{-}4}$, являющейся первым превышением в цикле III максимальной нагрузки цикла II, происходит бросающееся в глаза повышение плотности распределения значений параметра $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}](T; P)$. Иными словами, имеет место несомненный эффект «запоминания» максимальной ранее испытанной нагрузки. Лежащий в его основе физический механизм состоит в недостаточности действующих в пробе при $P \geqslant P_{2\text{-}4}$ напряжений, для интенсивного разрушения выдержавших все ранее приложенные нагрузки структурных связей. Последние излучают сигналы ТАЭ за счет перехода в напряженное состояние, но не по причине распада. После снятия нагрузки такие связи возвращаются в состояние, близкое к исходному (за вычетом неизбежного накопления усталостных повреждений) и при повторном нагружении вновь формируют поток событий ТАЭ в прежнем объеме.

Также следует заметить, что именно нарастанием усталостных повреждений объясняется обозначенное выше явление повышения уровня ТАЭ в цикле III по сравнению с отмеченным в цикле II, при воздействии равнозначных нагрузок.

4. На ступени нагружения, следующей за той, на которой была превышена максимальная нагрузка предыдущего цикла, происходит некоторое снижение величин $M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]$. Так,

$$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}4} = 5{,}20 \times 10^{-2} \text{ имп./с}$$

(первое превышение в цикле II P_{max} цикла I), тогда как

$$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}5} = 3{,}17 \times 10^{-2} \text{ имп./с}$$

и $M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}4} = 5{,}48 \times 10^{-2}$ имп./с (первое превышение в цикле III P_{max} цикла II), тогда как

$$M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}5} = 5{,}36 \times 10^{-2} \text{ имп./с.}$$

Причем чем меньше в рамках одного и того же цикла повышение нагрузки при переходе на последующую ступень нагружения со ступени, нагрузка которой в текущем цикле первый раз превысила максимальную нагрузку предыдущего цикла, тем более четко проявляется данное явление. Поясняем:

$$P_{2\text{-}5} - P_{2\text{-}4} \approx 0{,}35 \text{ МПа}$$

$$\text{и } M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}4} - M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{2\text{-}5} = 2{,}03 \text{ имп./с,}$$

в то время как

$$P_{3\text{-}5} - P_{3\text{-}4} \approx 0{,}7 \text{ МПа}$$

$$\text{и } M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}4} - M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{imp}]_{3\text{-}5} = 0{,}12 \text{ имп./с.}$$

5. В неконсолидированных грунтах рассматриваемый эффект памяти отсутствует.

Сказанное позволяет классифицировать замеченный акустико-эмиссионный эффект как эквивалент эффекта Фелисити, специфичный для подвергнутых инъецированию связующими агентами грунтов, пребывающих под влиянием изменяющихся термобарических условий.

Выводы

Обоснованы оригинальные приемы, направленные на совершенствование

методики обработки и интерпретации данных, получаемых при измерениях по методу ТАЭ. Представлены итоги экспериментов, объективно свидетельствующие о результативности данных приемов с позиции повышения достоверности метода ТАЭ, как применительно к прослеживанию на качественном уровне динамики развития деформированного состояния стабилизированных тампонажными растворами грунтовых материалов, обусловленной влиянием внешних природно-техногенных нагрузок, так и для численного оценивания реально достигнутой прочности физико-химического закрепления склонных к просадкам и(или) опасных по смещениям грунтов. Последнее может быть реализовано путем сопоставления натурных значений $R\text{T}_{пеи}^{MOD}$ с эталонными значениям $R\text{T}_{пеи}^{MOD\{L\}}$, полученными путем сравнительных лабораторных испытаний по методу ТАЭ и согласно ГОСТ 21153.2 в различной степени укрепленных проб грунтов с обследуемого участка геомассива.

Также отмечено отсутствие признаков искажения достоверности отображения экспериментальными закономерностями ТАЭ эволюции параметров структуры и состояния грунтов с ярко выраженной слоистостью, высоким содержанием чернозема, а также в ситуациях многократного воздействия повторно-переменных термомеханических нагрузок, при условии использования предлагаемой методики многопараметрической обработки результатов термоакустоэмиссионных измерений.

Описан экспериментально установленный присущий грунтово-тампонажным материалам акустико-эмиссионный эффект памяти, который, исходя из специфики физических механизмов его реализации, следует рассматривать как термомеханический аналог эффекта Фелисити, при сверхбольших концентрациях тампонажного раствора переходящий в подобие классического эффекта Кайзера.

Обнаруженный эффект памяти заключается в плавном возрастании плотности распределения $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{\text{imp}}]$ (численным показателем которой является $M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{\text{imp}}]$) при каждом повышении ступенчато сообщаемой объекту испытания квазистатической нагрузки, вплоть до превышения ее значением величины максимальной, ранее воздействовавшей на данный объект, нагрузки, в момент чего происходит скачкообразное возрастание показателя $M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{\text{imp}}]$, а затем, при дальнейшем наращивании нагрузки, наблюдается его спад. Причем последний тем значительнее, чем меньше разница между уровнем нагрузки, на которой зафиксировано резкое возрастание $M[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{\text{imp}}]$, и ее значением на последующей ступени нагружения.

Возможное практическое применение отмеченного эффекта:

1. Определение уровня действующих в натурном массиве грунтов нагрузок путем равномерного ступенчато возрастающего, выполняемого со стабилизацией деформацией на каждой ступени нагружения, отобранных из него по ГОСТ 12071-2014 кернов, где о величине искомого уровня судят по экстремуму $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{\text{imp}}]$.

2. Качественная оценка концентрации твердеющего раствора в геомассиве, для чего, так же как и в п. 1, проводятся отбор и испытания кернового материала, а о его насыщенности связующим веществом судят по степени приближения проявления рассматриваемого эффекта к эффекту Кайзера, т.е. по численному отношению $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{\text{imp}}]$ на ступени нагружения, при которой произошло скачкообразное возрастание данного параметра, к величине $[\dot{N}_{\Sigma} \times D_{\text{imp}}]$ на предыдущей ступени нагружения. При прочих равных, чем это отношение больше, тем пропорционально выше концентрация

отвердителя в испытуемой пробе. С другой стороны, чем рассматриваемое отношение ниже, тем в большей степени в геосреде превалируют упругие деформации.

3. Экспресс-проверка формирования в грунте несущего каркаса из тампонажного материала. До завершения данного процесса и(или) при инъецировании недостаточного количества твердеющего раствора, либо по другой причине, приведшей к сохранению на укрепляемом участке геосреды обширных объемов грунта в рыхлом (неконсолидированном) состоянии, при исследовании по методу ТАЭ отобранных с этого участка проб, данный акустико-эмиссионный эффект памяти фиксироваться не будет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanova T., Turchin V., Yudina L., Krutikov V., Sychugov S., Gmizov Y., Ziking K.* Binding and hardening operations of loess collapsing soils under the school reconstruction in the city of Malgobek, the Republic of Ingushetia // Procedia Engineering. 2017, vol. 172, pp. 393 — 400. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.006.

2. *Amiri M., Sanjari M., Porhonar F.* Microstructural evaluation of the cement stabilization of hematite-rich red soil // Case Studies in Construction Materials. 2022, vol. 16, article e00935. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00935.

3. *Vakili M. V., Chegenizadeh A., Nikraz H., Keramatikerman M.* Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag // Applied Clay Science. 2016, vol. 124 — 125, pp. 243 — 251. DOI: 10.1016/j.clay.2016.02.019.

4. *Yanru Zhao, Xiangsheng Chen, Tiande Wen, Pinghao Wang, Wanshuang Li* Experimental investigations of hydraulic and mechanical properties of granite residual soil improved with cement addition // Construction and Building Materials. 2022, vol. 318, article 126016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126016.

5. *Yu Xiao, Liyuan Tong, Hongbo Che, Qiwen Guo, Huangsong Pan* Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers // Construction and Building Materials. 2022, vol. 344, article 128242. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128242.

6. *Opukumo A. W.* Sodium silicate stabilization of collapsible clayey calcareous soils. Newcastle University, School of Civil Engineering and Geosciences. 2019, 348 p.

7. *Nazar R. S., Ahmed M. D., Al-Obaidi A. L.* Assessment of bearing capacity and settlement characteristics of soft soils reinforced by crushed concrete and sodium silicate columns / Materials Today: Proceedings. 2022, vol. 61, part 3, pp. 781 — 785. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.037.

8. *Yitian Xu, Yan Zhang, Junjie Huang, Guoqing Chen* Mechanical properties, microstructure and consolidation of sand modified with sodium silicate // Engineering Geology. 2022, vol. 310, article 106875. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106875.

9. *Moslemi A., Tabarsa A., Mousavi S. Y., Monfared M. H. A.* Shear strength and microstructure characteristics of soil reinforced with lignocellulosic fibers-Sustainable materials for construction // Construction and Building Materials. 2022, vol. 356, article 129246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129246.

10. *Chowdary B., Ramanamurty V., Pillai R. J.* Fiber reinforced geopolymer treated soft clay — An innovative and sustainable alternative for soil stabilization / Materials Today: Proceedings. 2020, vol. 32, part 4, pp. 777 — 781. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.574.

11. *Штефан Ю. В., Бондарев Б. А., Янковский Л. В.* Укрепление глинистых грунтов временных лесовозных дорог отходами промышленности и металлургическими шлаками // Строительные материалы. — 2020. — № 4-5. — С. 80 — 89. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89.

12. *Ларионова Н. А.* Влияние состава сланцевых зол на эффективность укрепления глинистого грунта // Инженерная геология. — 2021. — Т. 16. — № 2. — С. 42—51. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-2-42-51.

13. *Нямдорж Сетев, Дашжамц Далайн, Одонтуяа Нямдорж* Определение модуля деформации грунтовых подушек с геосинтетическими армированиями на замоченных просадочных основаниях // Университет еңбектері — Труды университета. — 2022. — № 4(85). — С. 132—140. DOI: 10.52209/1609_1825_2021_4_132.

14. *Степанищев К. Ю.*, *Сидоров В. В.* Исследование напряженно-деформированного состояния отдельных элементов грунтовой ячейки, армированной вертикальными железобетонными элементами // Геотехника. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 24—40. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-24-40.

15. *Кукина О. Б.*, *Волокитин В. П.*, *Волков В. В.*, *Ким М. С.*, *Чунихина А. С.* Методология и эксперименты по проектированию грунтовых подушек на основе слабых грунтов // Строительная механика и конструкции. — 2022. — № 4 (35). — С. 82—91. DOI: 10.36622/VSTU.2022.35.4.009.

16. *Игошева Л. А.*, *Гришина А. С.* Обзор основных методов укрепления грунтов основания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2016. — Т. 7. — № 2. — С. 5—21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.

17. *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.

18. *Болдырев Г. Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: Монография. — Пенза: ПГУАС, 2008. — 696 с.

19. *Supasit Pongsivasathit, Suksun Horpibulsuk, Suthee Piyaphipat* Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils // Case Studies in Construction Materials. 2019, vol. 11, article e00301. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00301.

20. *Калач Ф. Н.* Оценка эффективности использования технологии инъекционного укрепления слабых грунтов в основании фундаментов мелкого заложения саморасширяющимися растворами // Construction and Geotechnics. — 2020. — Т. 11. — № 2. — С. 62—77. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06.

21. *Carey A. S., Howard I. L.* Backcasting and forecasting stabilized soil mechanical properties for mechanistic-empirical pavement design // Construction and Building Materials. 2022, vol. 324, article 126645. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126645.

22. *Пролыгин А. С.*, *Калинин А. Л.*, *Александров А. С.*, *Александрова Н. П.* Сравнительный анализ методов вычисления штамповых модулей деформации грунтов // Вестник СибАДИ. — 2022. — Т. 19. — № 1(83). — С. 114—130. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130.

23. *Простов С. М.*, *Герасимов О. В.*, *Никулин Н. Ю.* Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов: Монография. — Томск, 2015. — 188 с.

24. *Di Maio R., De Paola C., Forte G., Piegari E., Pirone M., Santo A., Urciuoli G.* An integrated geological, geotechnical and geophysical approach to identify predisposing factors for flowslide occurrence // Engineering Geology. 2020, vol. 267, article 105473. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105473.

25. *Lizheng Deng, Hongyong Yuan, Jianguo Chen, Zhanhui Sun, Ming Fu, Yuli Zhou, Shuan Yan, Zewei Zhang, Tao Chen* Experimental investigation on progressive deformation of soil slope using acoustic emission monitoring // Engineering Geology. 2019, vol. 261, article 105295. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105295.

26. *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, iss. 1, pp. 23—30. DOI: 10.1134/S1062739115010044.

27. *Капустин В. В.*, *Чуркин А. А.*, *Владов М. Л.*, *Засорин М. С.*, *Шмурак Д. В.* Инструментальный контроль качества грунтоцементных свай и массивов сейсмоакустическими методами // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2021. — № 6. — С. 19—26. DOI: 10.1007/s11204-022-09775-x.

28. *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.

29. *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.

30. *Новиков Е. А.*, *Клементьев Е. А.* Использование термостимулированной акустической эмиссии грунтов для оценки изменения их устойчивости при физико-химическом закреплении // Горный журнал. — 2022. — № 9. — С. 39—46. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.07. ГИАБ

REFERENCES

1. Ivanova T., Turchin V., Yudina L., Krutikov V., Sychugov S., Gmizov Y., Ziking K. Binding and hardening operations of loess collapsing soils under the school reconstruction in the city of Malgobek, the Republic of Ingushetia. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 172, pp. 393—400. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.006.

2. Amiri M., Sanjari M., Porhonar F. Microstructural evaluation of the cement stabilization of hematite-rich red soil. *Case Studies in Construction Materials*. 2022, vol. 16, article e00935. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00935.

3. Vakili M. V., Chegenizadeh A., Nikraz H., Keramatikerman M. Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. *Applied Clay Science*. 2016, vol. 124—125, pp. 243—251. DOI: 10.1016/j.clay.2016.02.019.

4. Yanru Zhao, Xiangsheng Chen, Tiande Wen, Pinghao Wang, Wanshuang Li Experimental investigations of hydraulic and mechanical properties of granite residual soil improved with cement addition. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 318, article 126016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126016.

5. Yu Xiao, Liyuan Tong, Hongbo Che, Qiwen Guo, Huangsong Pan Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 344, article 128242. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128242.

6. Opukumo A. W. *Sodium silicate stabilization of collapsible clayey calcareous soils*. Newcastle University, School of Civil Engineering and Geosciences. 2019, 348 p.

7. Nazar R. S., Ahmed M. D., Al-Obaidi A. L. Assessment of bearing capacity and settlement characteristics of soft soils reinforced by crushed concrete and sodium silicate columns. *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 61, part 3, pp. 781—785. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.037.

8. Yitian Xu, Yan Zhang, Junjie Huang, Guoqing Chen Mechanical properties, microstructure and consolidation of sand modified with sodium silicate. *Engineering Geology*. 2022, vol. 310, article 106875. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106875.

9. Moslemi A., Tabarsa A., Mousavi S. Y., Monfared M. H. A. Shear strength and microstructure characteristics of soil reinforced with lignocellulosic fibers-Sustainable materials for construction. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 356, article 129246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129246.

10. Chowdary B., Ramanamurty V., Pillai R. J. Fiber reinforced geopolymer treated soft clay — An innovative and sustainable alternative for soil stabilization. *Materials Today: Proceedings*. 2020, vol. 32, part 4, pp. 777—781. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.574.

11. Shtefan Yu. V., Bondarev B. A., Yankovskii L. V. On strengthening temporary logging road clay soil by industrial waste and metallurgical slags. *Stroitel'nye Materialy*. 2020, no. 4-5, pp. 80 — 89. [In Russ]. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89.

12. Larionova N. A. Influence of the composition of shale ash on the effectiveness of strengthening clay soil. *Engineering Geology World*. 2021, vol. 16, no. 2, pp. 42 — 51. [In Russ]. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-2-42-51.

13. Nyamdorj Setev, Dashjamts Dalayn, Odontuya Nyamdorj Determination of deformation modulus of soil cushions with geosynthetic reinforcements on soaked subsidence bases. *Universitet Enbekteri — University Proceedings*. 2022, no. 4(85), pp. 132 — 140. [In Russ]. DOI: 10.52209/1609_1825_2021_4_132.

14. Stepanischev K. Yu., Sidorov V. V. Investigation of the stress-strain state of individual elements of a soil cell reinforced with vertical reinforced concrete elements. *Geotechnics*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 24 — 40. [In Russ]. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-24-40.

15. Kukina O. B., Volokitin V. P., Volkov V. V., Kim M. S., Chunikhina A. S. Methodology and experiments on the design of ground pads on the basis of weak soils. *Structural mechanics and structures*. 2022, no. 4 (35), pp. 82 — 91. [In Russ]. DOI: 10.36622/VSTU.2022.35.4.009.

16. Igosheva L. A., Grishina A. S. Review of the basic methods of the ground improvement. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Construction and architecture*. 2016, vol. 7, no. 2, pp. 5 — 21. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.

17. 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.

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

19. Supasit Pongsivasathit, Suksun Horpibulsuk, Suthee Piyaphipat Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, vol. 11, article e00301. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00301.

20. Kalach F. N. Performance evaluation of using injection reinforcement technology with self-expanding grout of soft soils at the sub-base of shallow foundations. *Construction and Geotechnics*. 2020, vol. 11, no. 2, pp. 62 — 77. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06.

21. Carey A. S., Howard I. L. Backcasting and forecasting stabilized soil mechanical properties for mechanistic-empirical pavement design. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 324, article 126645. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126645.

22. Kalinin A. L., Prolygin A. S., Aleksandrov A. S., Aleksandrova N. P. Comparative analysis of methods for calculating stamp modules of soil deformation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022, vol. 19, no. 1(83), pp. 114 — 130. [In Russ]. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-1-114-130.

23. 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.

24. Di Maio R., De Paola C., Forte G., Piegari E., Pirone M., Santo A., Urciuoli G. An integrated geological, geotechnical and geophysical approach to identify predisposing factors for flowslide occurrence. *Engineering Geology*. 2020, vol. 267, article 105473. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105473.

25. Lizheng Deng, Hongyong Yuan, Jianguo Chen, Zhanhui Sun, Ming Fu, Yuli Zhou, Shuan Yan, Zewei Zhang, Tao Chen Experimental investigation on progressive deformation of soil slope using acoustic emission monitoring. *Engineering Geology*. 2019, vol. 261, article 105295. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105295.

26. 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, iss. 1, pp. 23 — 30. DOI: 10.1134/S1062739115010044.

27. Kapustin V. V., Churkin A. A., Vladov M. L., Zasorin M. S., Shmurak D. V. Instrumental quality control of soil-cement columns and solids by seismoacoustic methods. *Soil Mechanics and Foundation Engeneering*. 2021, no. 6, pp. 19—26. [In Russ]. DOI: 10.1007/s11204-022-09775-x.

28. Shkuratnik V. L., Novikov E. A. Thermally stimulated acoustic emission of rocks as a promising tool of geocontrol (review). *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 6, pp. 21—27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.04.

29. 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, no. 4, pp. 134—155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_134.

30. Novikov E. A., Klementyev E. A. Thermally stimulated acoustic emission to assess soil stability change in physicochemical reinforcement. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 9, pp. 39—46. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.07.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Евгений Александрович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: e.novikov@misis.ru,
Scopus ID: 55235147200,
ORCID ID: 0000-0002-6997-1097,
Клементьев Евгений Андреевич[1] — 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. Novikov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: e.novikov@misis.ru,
Scopus ID: 55235147200,
ORCID ID: 0000-0002-6997-1097,
E.A. Klementyev[1], 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 11.12.2022; получена после рецензии 23.01.2023; принята к печати 10.02.2023.
Received by the editors 11.12.2022; received after the review 23.01.2023; accepted for printing 10.02.2023.