

УДК (534.6+53.082.4):551.34

# Проявления акустической эмиссии в мерзлых грунтах при одновременном влиянии на них переменных механических и термических воздействий

### Е.А.НОВИКОВ , В.Л.ШКУРАТНИК, М.Г.ЗАЙЦЕВ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Предметом исследования является установление фундаментальных закономерностей акустической эмиссии в мерзлых грунтах, позволяющих создать способы контроля (мониторинга) их устойчивости под действием переменных температурных полей и квазистатических механических нагрузок от расположенных на этих основаниях инженерных объектов различного назначения. Прикладная значимость таких способов повышение скорости и снижение трудоемкости инженерно-геологических изысканий в северных регионах России, осуществляемых с целью прогноза потери устойчивости оснований зданий и сооружений для обеспечения их безопасной эксплуатации. Исследование выполнено на оригинальном аппаратурном комплексе. Дано его описание и приведены характеристики. С использованием этого комплекса изучены термоакустоэмиссионные эффекты, возникающие при многократном чередовании циклов заморозки и оттаивания грунта в ходе развития его деформированного состояния, начиная с фазы нормального уплотнения и вплоть до финальной стадии разрушения (фазы выпирания). Показано, что на основе таких информативных параметров, как термически стимулированные активность и длительность импульсов акустической эмиссии, может быть получен показатель, количественно характеризующий стадии напряженно-деформированного состояния грунтов. Приведена экспериментальная зависимость поля значений этого показателя в функции от механической нагрузки и фракционного состава испытуемого грунта. Показана качественная сходимость указанной зависимости с классической диаграммой деформирования грунтов, полученной Н.М.Герсевановым, на которой выделяются стадии уплотнения, потери устойчивости (сдвигов) и разрушения. Рассмотрены и обоснованы возможные физические механизмы и особенности формирования акустико-эмиссионного отклика на каждой из указанных стадий. Отмечено, что обоснованные в рамках проведенного исследования подходы к получению, обработке и интерпретации акустико-эмиссионной измерительной информации позволяют осуществлять контроль и мониторинг несущей способности и напряженно-деформированного состояния грунтов непосредственно в полевых условиях.

*Ключевые слова*: мерзлые и талые грунты; несущая способность; напряженное состояние; термомеханическое нагружение; акустическая эмиссия; закономерности; эксперимент

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

*Как цитировать эту статью*: Новиков Е.А. Проявления акустической эмиссии в мерзлых грунтах при одновременном влиянии на них переменных механических и термических воздействий / Е.А.Новиков, В.Л.Шкуратник, М.Г.Зайцев // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 383-391. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.383

**Введение.** Активное освоение месторождений полезных ископаемых, интенсификация промышленного и гражданского строительства в районах Крайнего Севера приводят к возрастанию рисков возникновения техногенных катастроф, связанных с потерей устойчивости грунтовых оснований инженерных объектов различного назначения. В связи с этим актуальной является проблема повышения надежности прогноза состояния указанных оснований. Для решения этой проблемы необходима разработка новых и совершенствование известных методов геоконтроля, обеспечивающих получение информации, необходимой для управления рисками возникновения соответствующих техногенных угроз и обоснования эффективных мер по их предотвращению.

Традиционные подходы [12, 14] к оценке несущей способности грунтовых оснований предполагают выполнение их пенетрационных испытаний инденторами (сваями, штампами и т.д.) различной конструкции и (или) отбор проб грунта и их последующее испытание в лабораторных условиях. Известны также методы натурного определения физико-механических свойств грунтового массива на основе сдвига или обрушения целиков, а также с помощью испытаний методами разгрузки и компрессии. Такого рода подходы к получению измерительной информации достаточно информативны, однако трудоемки и ограниченно применимы для выполнения долгосрочных наблюдений в режиме мониторинга.



Среди геофизических методов [3, 5, 6, 11, 13] для контроля состояния грунта наибольшее распространение получили акустические (сейсмоакустические, ультразвукового прозвучивания и каротажа и т.д.) и электрометрические (георадиолакация, электропрофилирование, вертикальное электрическое зондирование и т.д.) методы. Они позволяют осуществлять контроль в режиме мониторинга, однако отличаются сложностью и неоднозначностью интерпретации получаемой информации и позволяют лишь косвенно судить о состоянии грунтов, их деформационных характеристиках и несущей способности. Кроме того, выполнение исследований известными геофизическими методами трудоемко, предполагает использование дорогостоящего оборудования и узкоспециальных программных продуктов, нуждающихся в высокопроизводительных ЭВМ. Это в свою очередь создает ограничения экономического характера к применению традиционных геофизических методов для оценки состояния грунтовых оснований.

Отмеченное предопределяет важность привлечения для такой оценки новых экономичных и нетрадиционных методов геоконтроля. Одним из них является метод термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) [14], который уже зарекомендовал себя как эффективный инструмент изучения структурных изменений, зернистости [15], прочностных свойств и напряженнодеформированного состояния скальных и полускальных горных пород [9, 10, 17], а также для контроля морозного выветривания углей [7, 8]. Однако существуют лишь единичные попытки использования этого метода для оценки состояния грунтов. В частности, в работе [16] экспериментально подтверждена применимость метода ТАЭ для исследования динамики деформированного состояния находящихся под механической нагрузкой талых грунтов. Установлены особенности характера акустической эмиссии при замораживании и оттаивании грунтов в функции от относительного содержания в них глинистых и песчаных частиц. Однако представленные в [16] исследования выполнялись на грунтах с достаточно однородной зернистостью (фракция 0,1-0,25 мм) и каждое измерение проводилось на свежей пробе. Это не позволяет говорить о изученности особенностей проявления термоакустоэмиссионных эффектов при многократном механическом и термическом нагружении и разгрузке одного и того же объема грунта с различной зернистостью, хотя именно такие условия характерны для реальных грунтовых оснований.

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям взаимосвязей между динамикой несущей способности мерзлых грунтов с существенно неоднородной зернистостью, подверженных многократному знакопеременному термомеханическому нагружению, и параметрами стимулированной этим нагружением акустической эмиссии.

**Постановка экспериментов.** Объектом исследований являлись навески песчано-глинистой смеси из глины Чкаловского месторождения Ленинградской области (30 % от сухой массы навески), намывного карьерного песка (70 % от сухой массы навески) и воды – 20-30 % от сухой массы. Эксперименты выполнены на навесках трех типов, отличавшихся фракционным составом песчаного наполнителя: 0,1-0,2 мм (мелкозернистый), 0,5-1,0 мм (среднезернистый); 0,8-2,0 мм (крупнозернистый). Эксперименты проведены на лабораторной установке (рис.1).

Более подробно конструкция устройства для термомеханического нагружения грунтов представлена на рис.2.

После обеспечивающего равномерность структуры перемешивания миксером навеска грунта 1 размещалась в металлической колбе 2, верхняя часть которой запечатывалась поршнем 3 с уплотнительными кольцами в нижней части. Механическое воздействие рычажно-механического пресса (на рис.2 не показан) через плиту 4 передавалось на динамометр 5 и далее через поршень на грунтовую навеску. При достижении нагрузкой заданной величины плита 4 фиксировалась на резьбовых стержнях 6 с помощью стопорных гаек 7. Это позволяло сохранять созданную на грунте нагрузку после извлечения устройства из-под пресса. Далее на расположенные в центральной части колбы стержни 12 надевались нагревательные элементы 8 в виде электроводных спиралей (на рис.2,  $\delta$  не показаны). К акустико-эмиссионной системе A-Line 32D через предусилитель типа ПАЭФ-014 подключался размещенный в нижней части колбы пьезоэлектрический преобразователь типа GT-2009, принимающий формирующиеся в грунте сигналы акустической эмиссии через дюралюминиевый волновод 10.

Для морозного воздействия на грунт устройство помещалось в климатическую камеру SE 20-45. Переход температур из отрицательной в положительную область и обратно, а также установление подаваемого на грунт теплового потока достигали путем регулировки с помощью



#### Е.А.Новиков, В.Л.Шкуратник, М.Г.Зайцев

Проявления акустической эмиссии в мерзлых грунтах...



Рис.1. Блок-схема лабораторной установки

ЛАТРа, подаваемого на нагревательные элементы электрического напряжения. Контроль за температурным режимом в ходе эксперимента осуществлялся с помощью измеритель-регистратора температуры АТЕ-9380 с термопарой АТА-210, установленной в верхней части колбы. АТЕ-9380 размещался вне морозильной камеры.

Термическое нагружение выполнялось быстрым нагревом размещенного по центру колбы металлического хомута 11 (рис.2) до температуры  $\approx$ 95 °C. Согласно расчетам, созданный таким образом тепловой поток прогревал грунтовую навеску со средней скоростью 4-6 °C/мин. Характерный пример использованных в экспериментах режимов термомеханического нагружения образцов показан на рис.3. Из-за большой длительности каждого из экспериментов (до  $\approx$  18-20 ч), требовалось проведение его в несколько этапов. Между ними грунтовые пробы при выключенном регистрирующем оборудовании оставлялись в колбе под действием отрицательных температур и при той же механической нагрузке, которая действовала на пробу в момент окончания очередного этапа. Это не приводило к потере полезной информации, поскольку отражающий со-



## Е.А.Новиков, В.Л.Шкуратник, М.Г.Зайцев

Проявления акустической эмиссии в мерзлых грунтах...



Рис.2. Конструкция устройства для термомеханического нагружения грунтов (а) и внешний вид испытательной колбы (б)



Рис.3. Характерный вид первичной измерительной информации на примере временной зависимости N<sub>∑</sub> в функции от температуры *T* и механической нагрузки *P* образца грунта с фракцией песчаного наполнителя 0,8-2,0 мм

стояние грунта акустико-эмиссионный отклик формируется либо при перераспределении действующих в грунте механических напряжений, либо на стадии нагрева и по инерции ограниченное время после его окончания. На рис.3 места соединения отдельных акустограмм, полученных в ходе последовательных этапов регистрации, данных на одной и той же грунтовой навеске, отмечены символом *S*.

Первичная измерительная информация и методика ее обработки. Изменения активности  $\dot{N}_{\Sigma}$  ТАЭ во времени *t* с начала эксперимента под влиянием динамики действующих на образец механической нагрузки *P* и температуры *T* представлены на рис.3. Для повышения детальности отображения акустограмма условно разделена на две части.

Показанный на рис.3 параметр  $\dot{N}_{\Sigma}$  традиционно используется для оценки интенсивности деструктивных процессов в твердых телах. Однако применительно к рыхлым грунтам однозначная взаимосвязь между стадией деформированного состояния образца и значениями активности ТАЭ отсутствует. Это связано со специфическими особенностями организации структурных связей



в грунтовом материале и весьма сложным механизмом взаимодействия между его частицами. Так, в скальных и полускальных горных породах определяющую роль играют кристаллизационные связи, которые не восстанавливаются после разрушения. Поэтому разрушившаяся кристаллизационная структурная связь больше не может стать источником ТАЭ. Соответственно конечность возможного числа событий ТАЭ и четкая привязка их реализации к стадии напряженнодеформированного состояния геоматериала значительно упрощают обработку и интерпретацию измерительной информации. Это иллюстрируется рис.4, где приведена типичная температурная зависимость параметра  $\dot{N}_{\Sigma}$  образца гранита, находящегося под постоянной механической нагрузкой величиной 0,8  $\sigma_{cж}$ .

Следовательно, по интенсификации активности ТАЭ, как это показано в области A (рис.4), можно судить о начале лавинообразного дефектообразования, а последующее, вызванное истощением запаса потенциальных источников ТАЭ (сохранивших целостность структурных связей), снижение  $\dot{N}_{\Sigma}$  до фоновых величин (область Б, рис. 4) служит индикатором перехода геоматериала на финальную стадию напряженно-деформированного состояния, завершающуюся скорым расчленением горной породы трещинами на отдельные куски. Последнее сопровождается формированием единичных высокоамплитудных выбросов  $\dot{N}_{\Sigma}$  в области B (рис.4).

В рыхлых грунтах наряду с кристаллизационными связями широко распространены водноколлоидные связи, которые весьма пластичны и способны создавать новые соединения сразу после разрушения старых. Другими словами, при нагружении грунтового материала в нем одновременно протекают как процессы деструкции, так и консолидации, заключающиеся в формировании новых структурных связей (потенциальных источников ТАЭ), что значительно осложняет интерпретацию динамики параметра  $\dot{N}_{\Sigma}$ . Таким образом, сам по себе этот параметр не позволяет определить текущую стадию деформированного состояния грунта и идентифицировать его переход в состояние опасного развития сдвиговых процессов и потери устойчивости. Понятно, что для контроля и прогноза последней наиболее важна информация о деструкции исходно устойчивых структурных связей, которые определяют стабильность грунтового основания. При этом акустико-эмиссионный отклик от новообразующихся временных и исходно не стабильных связей также имеет значение, но в меньшей степени, поскольку такие связи характеризуются малой прочностью и, соответственно, гораздо меньшим образом сказываются на несущей способности грунта. В то же время такой отклик содержит большое количество событий акустической эмиссии и выступает в роли помеховой составляющей, затрудняющей выделение более информативных с точки зрения оценки динамики прочностных свойств грунта упругих импульсов от деструкции кристаллизационных связей.

Для учета вклада в суммарный характер ТАЭ импульсов от разрушения различных типов структурных связей введем параметр  $D_{имп}$  – средняя длительность импульса ТАЭ. Физический смысл  $D_{имп}$  – время, в течение которого структурная связь сохраняет свою целостность, пребывая в напряженном состоянии под действием внешних нагрузок. Соответственно устойчивые связи характеризуются большими величинами  $D_{имп}$ .



Рис.4. Характерная зависимость активности ТАЭ N<sub>∑</sub> от температуры *T* при термическом разрушении твердого тела, находящегося при одновременном действии постоянной механической нагрузки



Отдельно рассмотрим ТАЭ на стадии оттаивания грунта и после его длительного прогрева. В начале термического воздействия акустические импульсы преимущественно генерируются за счет актов деструкции ледопородной матрицы и характеризуют ее прочностные свойства. В свою очередь характер ТАЭ после длительного прогревания грунта служит показателем интенсивности структурных изменений в грунте, лишенном мерзлого глинистоводного цемента. Сравнивая показатели ТАЭ на этих стадиях растепления грунта, можно дать общую оценку устойчивости геосреды к действию заданной нагрузки и определить, насколько наличие ледового каркаса влияет на несущую способность грунта.

С учетом изложенных выше физических предпосылок для обработки первичной измерительной информации будем использовать следующие три группы показателей:

1)  $M(\dot{N}_{\Sigma p}^{B}), M(\dot{N}_{\Sigma p}^{H})$  – величины активности ТАЭ  $\dot{N}_{\Sigma}$ , усредненные по временным областям,

соответствующим термическому нагружению полностью оттаявшего грунта  $M(\dot{N}_{\Sigma p}^{\text{в}})$  и тепловому разрушению ледопродного каркаса  $M(\dot{N}_{\Sigma p}^{\text{н}})$ , при одновременном воздействии механической нагрузки P;

2)  $D_{\mu M \Pi}^{B}$  и  $D_{\mu M \Pi}^{H}$  – значения средней длительности импульсов акустической эмиссии, рассчитанные относительно каждой из стадий прогрева уже оттаявшего грунта, находящегося под действием механической нагрузки *P*, и каждой из стадий растепления ледопородной матрицы образца соответственно;

3)  $M(\dot{N}_{\Sigma p})D_{\rm имп}$  – средневзвешенная интенсивность деструкции грунтового материала под действием локальной термической и квазистатической механической нагрузок. Значения  $D_{\rm имп}$  у мало влияющих на несущую способность грунта слабых структурных связей значительно ниже, чем величина этого параметра у прочных связей. Поэтому показатель  $M(\dot{N}_{\Sigma p})D_{\rm имп}$  позволяет вычленить в общем характере ТАЭ события деструкции, в большей степени определяющие эволюцию несущей способности грунта. Таким образом, показатель  $M(\dot{N}_{\Sigma p})D_{\rm имп}$  отражает интенсивность деструкции наиболее устойчивых структурных связей грунта, определяющих его несущую способность в целом, и позволяет отслеживать эволюцию и стадийность деформированного состояния грунта.

Введем комплексный показатель  $R^{\text{т.rp}} = (M(\dot{N}_{\Sigma p}^{\text{в}}) D_{\text{имп}}^{\text{в}})/(M(\dot{N}_{\Sigma p}^{\text{н}}) D_{\text{имп}}^{\text{н}})$ . Физический смысл  $R^{\text{т.rp}}$  – отношение устойчивости к термомеханическому воздействию грунтового материала с полностью оттаявшим связующим глинистоводным цементом к стойкости этого же грунта в промерзшем состоянии к такой же нагрузке. Таким образом,  $R^{\text{т.rp}}$  показывает разницу в устойчивости талого и мерзлого грунта к действию заданной механической нагрузки при определенном режиме растепления локального участка геосреды.

Интерпретация и обсуждение результатов экспериментов. Результаты расчета  $R^{\text{т.гр}}$  по всем выполненным экспериментам представлены на рис.5. Каждая точка на нем является





388



сводной оценкой данных по всем событиям акустической эмиссии, происшедшим в образце при определенной нагрузке *P* за полный цикл термического воздействия протяженностью до 240 мин. Каждый такой цикл включал три стадии:

• заморозка образца вплоть до его полного промерзания, о наступлении которого судили по снижению активности ТАЭ до фоновых значений;

• разрушение ледопородной матрицы отогревом (контролировалось по данным термометрических измерений);

• термическое нагружение оттаявшего грунта вплоть до завершения в нем структурных изменений и стабилизации деформированного состояния, о чем также судили по снижению активности ТАЭ.

Полученное распределение  $R^{\text{т.rp}}(P)$  в функции от среднего размера зерна испытуемого грунта согласуется с известными теоретическими предпосылками, согласно которым возрастание зернистости наполнителя песчано-глинистой смеси при прочих равных условиях приводит к пропорциональному возрастанию несущей способности. Форма распределения облака значений функции  $R^{\text{т.rp}}(P)$  также демонстрирует сходимость с видом классической диаграммы деформированного состояния грунта. Однако приведенные на рис.5 значения P превышают содержащиеся в справочниках значения несущей способности, схожие с испытанными грунтовыми материалами. Это связано с тем, что металлическая колба, в которой размещались грунтовые навески, сыграла роль жесткой опалубки, значительно затруднившей развитие сдвиговых деформаций и формирование явлений ползучести. Другими словами, из сходства функций  $R^{\text{т.rp}}(P)$  и S(P) следует, что механизмы снижения устойчивости грунтового основания под действием квазистатической внешней нагрузки сохранились в полной мере, однако для реализации этих механизмов потребовалась более мощная стимуляция.

Таким образом, характер функции  $R^{\text{т.гр}}(P)$  связан с реализацией следующих механизмов формирования акустико-эмиссионного отклика.

На стадии I (фаза нормального уплотнения – деформации преимущественно за счет закрытия пустот между частицами грунта; риск потери устойчивости отсутствует или крайне мал) создаваемые термомеханическим нагружением напряжения не достаточны для деструкции грунтового материала. Акустико-эмиссионный отклик формируется за счет плавления ледового каркаса, миграции жидкости внутри пробы и трения частиц при закрытии (обжатии) пустот в грунтовом материале. Поскольку фрикционный контакт между частицами грунта практически не сопровождается актами деструкции, возникающие в ходе этих контактов импульсы акустической эмиссии имеют среднюю длительность ( $D_{имп}^{в}$ ) выше, чем у импульсов, сформировавшихся при растрескивании ледовой матрицы ( $D_{имп}^{H}$ ) в начале термического нагружения. Это обосновывает наблюдаемые на данной стадии значения  $R^{т.гp}$  до нескольких десятков единиц.

На стадии II (фаза сдвигов – грунт теряет устойчивость, возникают значительные сдвиговые деформации; интенсифицируется деструкция сохранившихся до этого момента стабильных структурных связей) происходит формирование локальных концентраторов напряжений в областях грунта, на которых дальнейшее уплотнение за счет закрытия пустот уже невозможно. В этих областях интенсифицируется деструкция структурных связей, в том числе происходит

И переизмельчение связующего растрескивание глинистого цемента. По мере деструкции последнего пропорционально снижается несущая способность грунта. На параметрах ТАЭ это отражается в снижении значения  $D_{\rm имп}$ , что говорит об исчерпании запаса прочных структурных связей, способных, сохраняя целостность, долго выдерживать термические И напряжения. средняя механические При этом активность формирования новых событий ТАЭ  $[M(\dot{N}_{\Sigma p})]$ на данной стадии может как превышать величину  $M(\dot{N}_{\Sigma p})$ на стадии I, так и оставаться на том же уровне или даже быть чуть ниже. Это связано с тем, что на фазе сдвигов (по классификации проф. Н.М.Герсеванова, рис.6) на



Рис.6. Классическая диаграма деформированного состояния грунта по Н.М.Герсеванову, показывающая общий вид зависимости приращения деформаций *S* грунта от воздействующей на него нагрузки *P* 



величину  $M(\dot{N}_{\Sigma p})$  прежде всего влияет деструкция новообразующихся непосредственно в ходе нагружения слабых водно-коллоидных связей. Их число велико, но создаваемые ими импульсы акустической эмиссии быстро затухают. Поэтому, если концентраторы напряжений сформировались в грунтовой навеске на удалении от приемного преобразователя, их влияние на общий характер ТАЭ будет незначительным. В таком случае ТАЭ будет формироваться преимущественно за счет высокоэнергетических исходно прочных связей, количество которых по мере нагружения уменьшается.

Стадия III (фаза выпирания грунта – разрушение грунтового основания; при невозможности выхода грунта из зоны нагрузки за счет сдвига или выпирания происходит интенсивное дробление отдельных частиц грунта) характеризуется предельным обжатием всего объема нагружаемого грунта. При этом уровень ТАЭ на стадии оттаивания остается прежним, так как прочность смерзшейся в грунте жидкости не зависит от степени его деформирования. Однако на стадии прогрева полностью оттаявшего грунтового материала, перешедшего на III стадию, значения  $D_{имп}$ ,  $M(\dot{N}_{\Sigma p})$  находятся на минимальном уровне. Это указывает на исчерпание возможности дальнейшего обжатия минерального каркаса и истощение запаса потенциальных источников ТАЭ, которыми являются сохранившие целостность структурные связи. При дальнейшем нагружении происходит дробление отдельных частиц грунта, что приводит к лавинообразному возрастанию  $M(\dot{N}_{\Sigma p})$ , но значения  $D_{имп}$  при этом остаются низкими, поскольку каждое отдельное событие дробления протекает достаточно быстро.

Протяженность стадий деформированного состояния и распределение значений функции  $R^{\text{т.гр}}(P)$  напрямую зависят от прочностных свойств грунта (см. рис.5). У мелкозернистых грунтовых навесок, обладающих исходно меньшей несущей способностью, значения  $R^{\text{т.гр}}$  существенно более низкие, чем у средне- и крупнозернистых грунтовых навесок. У крупнозернистого грунта также спад функции  $R^{\text{т.гр}}(P)$  более плавный, чем у среднезернистого. У последнего, в свою очередь, огибающая функции  $R^{\text{т.гр}}(P)$  более пологая по сравнению с мелкозернистым грунтом.

Заключение. Выполнено экспериментальное исследование акустико-эмиссионных эффектов в мерзлых и талых обводненных грунтах различной зернистости при их циклическом одновременном термическом и механическом нагружении, производимом как с постоянной, так и с возрастающей или уменьшающейся от цикла к циклу максимальной нагрузкой. Характер термостимулированной акустической эмиссии исследован при многократном механическом нагружении одних и тех же проб. Такой режим соответствует условиям проведения натурных мониторинговых измерений на одном и том же участке циклически растепляемого грунтового основания, в котором зачастую имеют место искажающие результаты контроля усталостные явления от ранее выполненных воздействий.

На основе установленных закономерностей характера ТАЭ разработан и обоснован численный показатель  $R^{\text{т.rp}}$ , позволяющий судить о деформированном состоянии грунта с существенно неоднородной зернистостью. Обоснованные в работе методические подходы к получению, обработке и интерпретации измерительной информации позволяют осуществлять контроль несущей способности и деформационного состояния грунтов в режиме мониторинга непосредственно в полевых условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние условий оттаивания и вида испытаний на деформационные характеристики оттаивающих грунтов / П.И.Котов, Л.Т.Роман, И.И.Сахаров, В.Н.Парамонов, М.В.Парамонов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 5. С. 8-13.

2. Грунтоведение / Ю.А.Васильчук, Е.А.Вознесенский, Г.А.Голодковская, Р.С.Зиангиров, В.А.Королев, В.Т.Трофимов. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.

3. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.

4. Результаты исследования несущей способности и динамической вязкости глинистых грунтов с учетом температурного фактора / И.А.Иванов, М.Н.Мосягин, Ф.Х.Хабибулин, В.В.Гостев // Известия вузов. Нефть и газ. 2001. № 4. С. 62-65.

5. Скворцов А.Г. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород / А.Г.Скворцов, М.Р.Садуртдинов, А.М.Царев // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 2. С. 83-90.

6. Шевнин В.А. Петрофизический подход к электрическим свойствам рыхлых грунтов / В.А.Шевнин, Д.А.Квон, А.А.Рыжов // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 397-404. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.397

390





#### Е.А.Новиков, В.Л.Шкуратник, М.Г.Зайцев

Проявления акустической эмиссии в мерзлых грунтах...

7. Application of thermally stimulated acoustic emission method to assess the thermal resistance and related properties of coals / E.A.Novikov, R.O.Oshkin, V.L.Shkuratnik, S.A.Epshtein, N.N.Dobryakova // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. Iss. 2. P. 243-249. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.12.019

8. Changes in properties and state of coal exposed to freeze-thaw weathering: Evidence from thermally induced acoustic emission / E.A.Novikov, V.L.Shkuratnik, M.G.Zaytsev, R.O.Oshkin // Earth's Cryosphere. 2018. Vol. 22. № 4. P. 76-85. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(76-85

9. Experimental study of acoustic emission characteristics of granite thermal cracking under middle-high temperature and triaxial stress / Jin-wen, Zhao Yang-Sheng, Wan Zhi-jun, Dong Fu-ke, Feng Zi-jun, Li Yi // Rock and Soil Mechanics. 2009. № 30(11). P. 3331-3336.

10. Effect of Thermal Treatment on Fractals in Acoustic Emission of Rock Material / Z.Z.Zhang, X.L.Xu, Q.P.Sun, Y.Dong // Advances in Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 2016. Article ID 6309856. 9 p. DOI: 10.1155/2016/6309856

11. Identification of nonstationary changes in stress state of geomaterials by infrared radiometry data / V.I.Sheinin, B.V.Levin, D.I.Blokhin, A.V.Favorov // Journal of Mining Science. 2003. Vol. 39. Iss. 5. P. 431-437. DOI: 10.1023/B:JOMI.0000029305.43373.5f

12. *Kireev S.B.* The modern technology of seismic prospecting with the use of reflection method applied to oil and gas exploration / S.B.Kireev, V.S.Litvinenko, A.N.Telegin // 6-th Saint Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences 2014: Investing in the Future, 2014. P. 242-246.

13. *Likai Zhu*. Characterizing global patterns of frozen ground with and without snow cover using microwave and MODIS satellite data products / Likai Zhu, Volker C. Radeloff, Anthony R. Ives // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 191. P. 168-178. DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.020

14. Shkuratnik L.V. Thermally stimulated acoustic emission of rocks as a promising tool of geocontrol / L.V.Shkuratnik, E.A.Novikov // Gornyi Zhurnal. 2017. № 6. P. 21-26. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.04

15. Shkuratnik V.L. Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials / V.L.Shkuratnik, E.A.Novikov // Journal of Mining Science. 2012. Vol. 1. № 48. P. 9-14. DOI: 10.1134/S1062739148010029

16. Shkuratnik V.L. Effect of the Stress-Strain State of Sandy-Clay Soils on Their Thermally Stimulated Acoustic Emission / V.L.Shkuratnik, R.O.Oshkin, M.G.Zaitsev // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017. Vol. 54. Iss. 2. P. 81-86. DOI: 10.1007/s11204-017-9438-4

17. Song-Tao Zhai. Research on Characteristics of Microstructure and Acoustic Emission of Marble in the Heating Process / Song-Tao Zhai, Gang Wu, Yuan Zhang // International Society for Rock Mechanics, SINOROCK. 18-20 June, 2013. Shanghai, China. P. 245-250. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.04

Авторы: Е.А.Новиков, канд. техн. наук, доцент, e.novikov@misis.ru (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), В.Л.Шкуратник, д-р техн. наук, профессор, v.shkuratnik@misis.ru, Shkuratnik@mail.ru (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), М.Г.Зайцев, инженер, fikp@mail.ru (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия).

Статья поступила в редакцию 04.02.2019.

Статья принята к публикации 25.03.2019.