Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 1, с. 99–103 http://www.izdatgeo.ru

УДК (534.6+53.082.4):551.34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ГРУНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ИХ ПРОМЕРЗАНИЯ

Е.А. Новиков, В.Л. Шкуратник, Р.О. Ошкин

Национальный исследовательский технологический университет (МИСиС),
119049, Москва, Ленинский просп., 4, Россия; ftkp@mail.ru

Изложены результаты экспериментальных исследований, направленных на установление закономерностей термостимулированной акустической эмиссии, возникающей в образцах грунтов с разным содержанием влаги при их замораживании и последующем оттаивании. Впервые показана возможность использования этих закономерностей для оконтуривания талых зон в массиве мерзлых грунтов и мониторинга количества содержащейся в них воды.

Термостимулированная акустическая эмиссия, мерзлый грунт, гидродинамические процессы, обводненная область

USE OF ACOUSTIC EMISSION PATTERNS IN SOILS TO DETERMINE THE DEGREE OF THEIR FROST PENETRATION

E.A. Novikov, V.L. Shkuratnik, R.O. Oshkin

National University of Science and Technology (MISiS),
119049, Moscow, pr. Lenina, 4, Russia; ftkp@mail.ru

We report results of experimental studies aimed at the determining the patterns of thermally stimulated acoustic emission in soil samples with different moisture contents during their freezing and subsequent local thawing. For the first time it is demonstrated that these patterns can be used for contouring of thaw zones in a mass of frozen soils, as well as for monitoring the amount of water contained in these zones.

Thermally stimulated acoustic emission, frozen soil, hydrodynamic processes, watered zone

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость геотехнических сооружений различного назначения, строящихся и эксплуатирующихся в условиях криолитозоны, или искусственно замораживаемых обводненных участков массива не может быть обеспечена без надежной информации о степени промерзания и оттаивания толщи грунтов, составляющей фундаментное основание этих сооружений [*Хрусталев и др., 2000*].

Для получения этой информации широко используются различные геофизические методы [*Зыков, 2007*], в частности, активные акустические методы, информативными параметрами которых выступают скорости распространения продольных и поперечных упругих волн высокочастотного сейсмического, звукового и ультразвукового диапазонов частот [*Тютюник, 1994; Воронков, 2009; Скворцов и др., 2011*].

Акустические исследования мерзлых грунтов в массиве могут быть реализованы с его поверхности (методы отраженных и преломленных волн), путем межскважинного прозвучивания или каротажа, что позволяет учесть особенности конкретных условий и задач геоконтроля. Такие исследования обеспечивают возможность идентификации геокриологических границ в силу того, что скорости распространения упругих волн в мерзлых и талых водонасыщенных породах существенно различаются [*Фролов, 1998; Rogers, Morack, 1978; Sellman, 1983*]. В то же время, как показано в [*Скворцов и др., 2014*], для водонасыщенных песчано-глинистых пород результаты такой идентификации могут быть неоднозначными, поскольку указанные скорости в общем случае являются функциями дисперсности, температуры и засоленности пород. Кроме того, длительный активный акустический мониторинг состояния мерзлых грунтов достаточно трудоемок, а его реализация сопровождается серьезными проблемами обеспечения постоянства характеристик измерительного электроакустического тракта. Такой мониторинг требует также изначально точного определения диаграммы направленности локального акустического излучателя, которая даже на одном участке геосреды может значительно различаться из-за неоднородностей его состава и строения. В связи с этим представляется актуальной задача использования для изучения качественных и количественных показателей состояния мерзлых грунтов пассивных акустических методов.

Одним из указанных методов является метод термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ). Последняя представляет собой излучение упругих волн, возникающих в процессе нагрева или остывания твердых тел вследствие протекания в них необратимых или частично обратимых структурных изменений. Эти изменения могут быть вызваны разными факторами, такими как: неравномерность температурного воздействия на геоматериал; различие термоупругих свойств и коэффициентов теплового расширения слагающих породу минералов, фазовые переходы в них; испарение или замерзание влаги, взрыв газово-жидких включений и другие, приводящие к возникновению новых или росту и движению имеющихся дефектов [*Новиков, 2012*].

К настоящему времени установлено, что метод ТАЭ позволяет оценивать структуру, свойства и состояние горных пород по параметрам акустической эмиссии, возникающей в них при внешних термических воздействиях [*Шкуратник, Новиков, 2012а,б*]. В то же время для геокриологических исследований массива метод ТАЭ ранее не использовался, хотя важность поиска новых закономерностей, потенциально пригодных для создания полевых методов изучения свойств мерзлых грунтов, представляется очевидной. В настоящей работе предлагается обоснование возможности таких исследований на основе экспериментального изучения закономерностей изменения параметров ТАЭ при замораживании и оттаивании грунтов с учетом их водонасыщения.

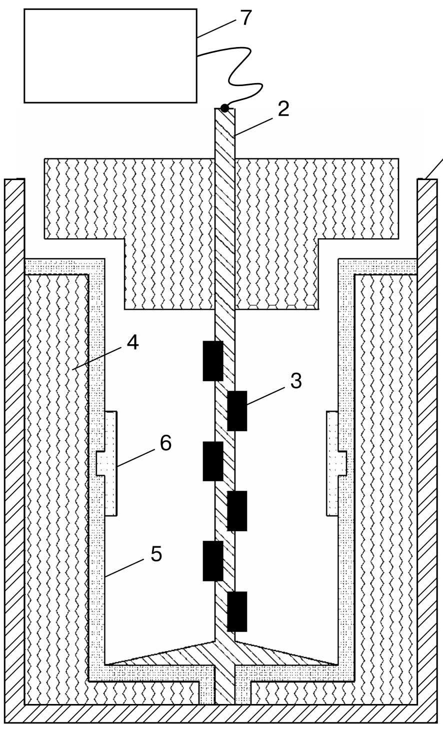

Рис. 1. Схема лабораторной установки.

1 – цилиндрическая полая металлическая колба; 2 – жесткозакрепленная стойка; 3 – приемные преобразователи; 4 – битумная мастика; 5 – фторопластовая опалубка; 6 – кольцевой электронагревательный элемент; 7 – акустико-эмиссионная измерительная система.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И СХЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Объектом исследований являлись навески песчано-глинистых грунтов по 1.5–2.0 кг с условными номерами $i = 1...10$, которые перед началом эксперимента увлажнялись порцией воды массой $m(0.10 + i \cdot 0.07)$, где m – масса грунта, кг. Равномерность распределения влаги в пробе достигалась путем перемешивания последней в течение 15–20 мин с помощью строительного миксера типа Protool MXP 1602 EQ. Полученная грунтоводяная смесь помещалась в цилиндрическую полую металлическую колбу высотой 500 мм и диаметром 400 мм, содержащую в центральной части жесткозакрепленную стойку с гирляндой вмонтированных в нее приемных преобразователей акустической эмиссии (АЭ) (рис. 1). Для исключения влияния на результаты эксперимента окружающих шумов и снижения веса конструкции внутренняя часть колбы выполнена в виде вставки из битумной мастики во фторопластовой опалубке.

В ходе эксперимента колба с образцом помещалась в лабораторный морозильник SE 10-45 на основе хладогента R404a и охлаждалась до –34 °C, выдерживалась при этой температуре в течение не менее 90 мин и затем локально оттаивалась с помощью кольцевого электронагревательного элемента, обеспечивающего нагрев по периметру центральной части образца до температуры 90 °C. Оттаивание велось вплоть до разрушения ледопородной матрицы, о котором судили по изменению температуры в различных областях центрального стержня, измеряемой с помощью набора термосопротивлений (на рис. 1 не показаны), расположенных вблизи каждого из приемных преобразователей АЭ. Этот способ контроля непригоден для определения динамики количества незамерзшей воды на различных участках в глубине ледопородной матрицы, но позволяет судить о ее полном разрушении.

Сигналы АЭ с выхода каждого из пьезопреобразователей, а также параметрическая информация с термосопротивлений регистрировалась и обрабатывалась акустико-эмиссионной измерительной системой A-Line 32D.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Характерные результаты экспериментов представлены на рис. 2. Для их численной обра-

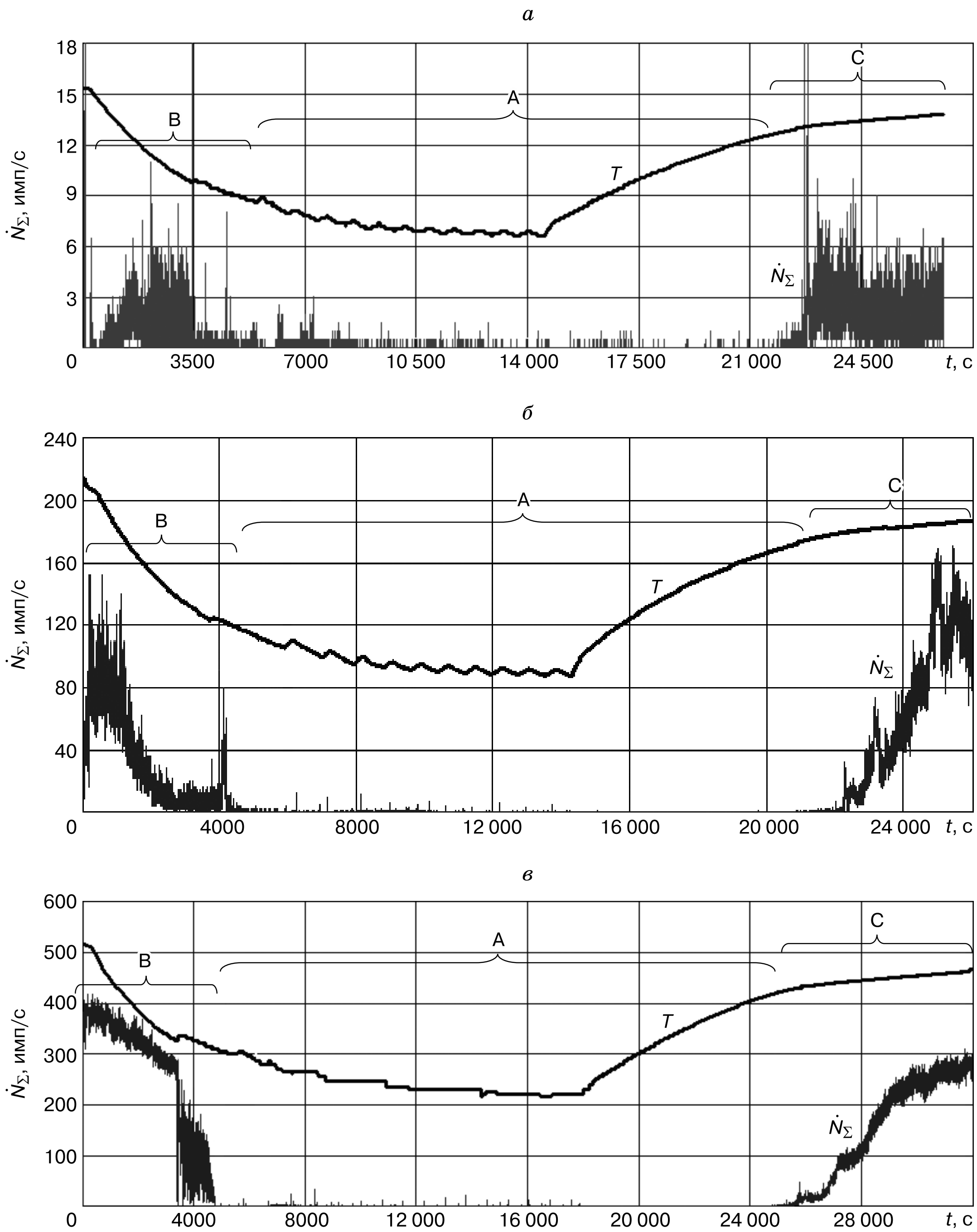

Рис. 2. Характерные экспериментальные зависимости активности $\dot{N}_\Sigma$ и температуры T в центральной части образцов грунта с содержанием воды 24 % (*а*), 52 % (*б*) и 80 % (*в*) при их полной заморозке (область А), охлаждении (область В) и оттаивании (область С).

ботки использован такой параметр, как средняя активность $\left(\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma n}\right)\right)$ ТАЭ за выбранный интервал времени, где n – номер интервала времени, для которого получено соответствующее значение $\mathrm{M}\left(\dot{N}_\Sigma\right)$.

Получено, что во всех случаях при наличии ледопородной матрицы (область А: $\mathrm{M}\left(\dot{N}_\Sigma\right)$ = = 0.038 имп/с (рис. 2, *а*); 0.055 имп/с (рис. 2, *б*); 0.049 имп/с (рис. 2, *в*)) уровень $\dot{N}_\Sigma$ значительно ниже, чем при ее формировании (область В:

$\mathrm{M}\left(\dot{N}_\Sigma\right)$ = 4.1 имп/с (рис. 2, *а*); 57.4 имп/с (рис. 2, *б*); 141.7 имп/с (рис. 2, *в*)) или разрушении оттаиванием (область С: $\mathrm{M}\left(\dot{N}_\Sigma\right)$ = 5.6 имп/с (рис. 2, *а*); 69.6 имп/с (рис. 2, *б*); 159.4 имп/с (рис. 2, *в*)).

На рис. 2 также видно, что величина $\dot{N}_\Sigma$ в зависимости от содержания воды меняется пропорционально убыванию или возрастанию температуры и по окончании разрушения ледопородной матрицы достигает примерно исходного уровня. Это явление объясняется идущими в грунте гидродинамическими процессами, например, перераспределением жидкой фазы в твердой под действием гравитации (перетоки).

Таким образом, чем больше интенсивность криологических процессов, тем выше уровень активности акустической эмиссии как функции от количества участвующей в них жидкости. Рассчитав отношение значения средней активности $\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma 0}\right)$, зарегистрированного в образце, когда не менее 80 % воды в нем находилось в жидкой фазе, к значению $\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma i}\right)$, измеренному в ходе оттаивания или замораживания этого образца, можно определить долю жидкости, перешедшей в твердую фазу на момент данного измерения. Несколько более высокий уровень $\dot{N}_\Sigma$ во время оттаивания связан с тем, что в ходе этого процесса плотность ледопородной матрицы увеличивается, а сигналы АЭ испытывают меньшие диссипативные потери, чем при замораживании, когда каналы передачи акустических импульсов не так развиты.

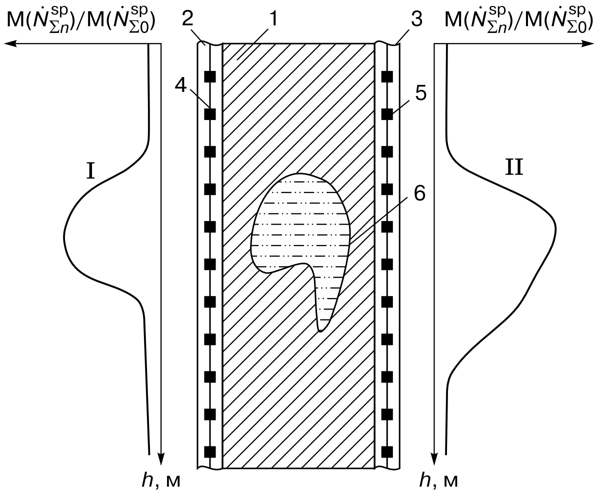

Рис. 3. Схема реализации способа определения количества и местоположения незамерзшей воды в мерзлых грунтах, основанного на анализе их акустической эмиссии.

1 – участок геосреды; 2, 3 – скважины; 4, 5 – гирлянды акустических преобразователей; 6 – талая зона в массиве мерзлых грунтов. Кривые I, II – зависимость параметра $\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma n}\right)\big/\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma 0}\right)$ от глубины *h*.

ВОЗМОЖНОЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные закономерности изменения ТАЭ в зависимости от состояния мерзлых грунтов можно использовать для определения количества и местоположения содержащейся в них незамерзшей воды (рис. 3). На участке геосреды 1 в ходе бурения замораживающих (или под свайный фундамент) скважин 2 и 3 проводят отбор керна (на рис. 3 не показан). Далее керн разделяют на образцы, которые используют для определения по стандартной, основанной на весовых измерениях, методике изменения содержания воды C_i в ходе оттаивания [*ГОСТ 5180-84*]. Параллельно регистрируют ТАЭ и рассчитывают ее удельную активность $\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma}\right)$ – среднее число сигналов, принятых с каждого кубического сантиметра объекта контроля за дискретный интервал времени. Кроме того, экспериментально определяется индивидуальная для каждого типа грунта предельная дальность эффективной регистрации акустических сигналов, исходя из которой выбирают максимальный шаг размещения приемных акустических преобразователей в ледопородном массиве.

Далее строят распределения $C_i\left[\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma}\right)\right]$ и суммарного содержания влаги в керне $C_\Sigma = \sum_i C_i$ по глубине *h* для каждой скважины в отдельности. После этого в указанных скважинах по их глубине размещают гирлянды акустических преобразователей 4 и 5 с шагом между ними 0.8–1.0 м.

Для скважин под свайный фундамент акустические преобразователи могут быть вмонтированы в сваи по аналогии с конструкцией центрального стержня лабораторной установки (см. рис. 1). Каждым из преобразователей регистрируют АЭ, генерируемую гидродинамическими процессами в геосреде. Через последовательные и сопоставимые по продолжительности (~30 мин) периоды времени рассчитывают среднюю за соответствующий период *n* активность акустической эмиссии $\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma}\right)$. При этом период регистрации ТАЭ должен подбираться так, чтобы он не совпадал с вызывающими значительные колебания грунта строительными и эксплуатационными операциями (например, для ночного времени).

На основе полученной таким образом измерительной информации рассчитывают зависимости параметра $\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma n}\right)\big/\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma 0}\right)$ от глубины *h*. Качественный вид этих зависимостей на рис. 3 иллюстрируется кривыми I и II. Под $\mathrm{M}\left(\dot{N}^{\mathrm{sp}}_{\Sigma 0}\right)$ понимается уровень активности АЭ в оттаявшем не менее чем на 80 % керне, полученном на том же участке ледопородного массива, где зарегистрировано соответствующее значение $\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma n}^{\mathrm{sp}}\right)$. Наличие и местоположение талой зоны в массиве мерзлых грунтов определяют по достижению параметром $\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma n}^{\mathrm{sp}}\right)$ на некотором участке геосреды значения, превышающего (1/3) $\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma 0}^{\mathrm{sp}}\right)$. В свою очередь, по стабильному во времени уровню $\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma n}^{\mathrm{sp}}\right)$ ниже указанного порогового значения судят о качественном промерзании грунтов. По известным координатам датчиков, показания которых удовлетворяют этому условию, строят карту наличия и расположения талых зон в массиве мерзлых грунтов.

По величине произведения зависимостей от h средней акустической эмиссии и суммарного содержания влаги $C_{\Sigma}(h)\cdot\left[\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma n}^{\mathrm{sp}}\right)\Big/\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma 0}^{\mathrm{sp}}\right)\right](h)$, полученных на одинаковой глубине в одной и той же скважине, определяют количество незамерзшей воды в изучаемой области массива мерзлых грунтов.

Отметим также, что в предлагаемом способе выбуривание керна и измерения на нем необходимы только в случае определения количества воды в талых участках геосреды. Если задача заключается лишь в выявлении и оконтуривании таких участков, а численная оценка их обводненности не требуется, то мониторинг можно существенно упростить и свести к пассивному наблюдению за динамикой уровня акустической эмиссии, который оценивают по величине $\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma n}^{\mathrm{sp}}\right)\Big/\mathrm{M}\left(\dot{N}_{\Sigma 0}^{\mathrm{sp}}\right)$ на разных участках ледопородного массива.

ВЫВОДЫ

1. С помощью разработанного авторами аппаратурного и методического обеспечения экспериментально установлены закономерности акустической эмиссии грунтов различной степени обводненности в ходе замораживания и оттаивания как функции от степени их промерзания.

2. Предложен вариант реализации основанного на указанных закономерностях способа определения количества и местоположения незамерзшей воды в массиве мерзлых грунтов. Этот способ за счет непрерывного контроля всего объема массива может обеспечить повышение точности и надежности выявления талых зон на ранних стадиях образования, а также дает возможность численного определения абсолютных показателей и динамики количества содержащейся в них воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00168).

Литература

Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов) / О.К. Воронков. СПб., ВНИИГ, 2009, 401 с.

ГОСТ 5180-84 “Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик”. (утв.: Госстрой СССР от 24.10.1984 г. № 1985). М., Изд-во стандартов, 1984.

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны / Ю.Д. Зыков. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.

Новиков Е.А. Современное состояние исследований в области термоакустической эмиссии геоматериалов (обзор) // Горн. информ.-аналит. бюл., 2012, № 5, с. 394–401.

Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 83–90.

Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. Методические особенности изучения сейсмокриологического разреза // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 110–113.

Тютюник П.М. Геоакустический контроль процессов замораживания и тампонирования пород / П.М. Тютюник. М., Недра, 1994, 251 с.

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. Пущино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.

Хрусталев Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П. Многолетнее изменение температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 35–41.

Шкуратник В.Л., Новиков Е.А. Диагностика структурных нарушений образцов скальных горных пород по параметрам термостимулированной в них акустической эмиссии // Тринадцатая междунар. конф. “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле”: материалы. М., ИГЕМ РАН, 2012а, с. 291–294.

Шкуратник В.Л., Новиков Е.А. О взаимосвязи термостимулированной акустической эмиссии скальных горных пород с их пределом прочности при сжатии // Физ.-техн. пробл. разработки полез. ископаемых, 2012б, № 4, с. 44–51.

Sellman P.V. Seismic velocities and subsea permafrost in the Beaufort sea // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, USA, 1983, vol. 1, p. 894–898.

Rogers J.C., Morack J.L. Geophysical investigations of offshore permafrost at Prudhoe Bay, Alaska // Proc. of the 3th Intern. Conf. on Permafrost, Edmonton, Canada, 1978, vol. 1, p. 560–566.

Поступила в редакцию
19 марта 2015 г.