

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ЦИКЛИЧЕСКОМ ОТОГРЕВЕ И МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Е.А. Новиков<sup>1</sup>, М.Г. Зайцев<sup>1</sup>

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

**Аннотация:** Дано обоснование нового способа геоконтроля, обеспечивающего мониторинг устойчивости грунтов в основаниях фундаментов зданий и сооружений, расположенных в зонах сезонной или многолетней мерзлоты. Рассмотрены вопросы геомеханики и геокриологии, т.к. на несущую способность грунтовых массивов существенное влияние оказывают как величина приложенной к ним механической нагрузки, так и колебания воздействующих на них температур. Поставлена задача проверки наличия акустико-эмиссионных эффектов памяти (термомеханических аналогов эффектов Кайзера и Фелисити) у почвенных грунтов, находящихся в условиях чередования положительных и отрицательных температур и одновременно пребывающих на различных стадиях деформированного состояния. Проведена серия экспериментов, заключавшихся в регистрации параметров акустической эмиссии при многократном циклическом термомеханическом нагружении проб грунтов различного состава и степени промерзания. Такое нагружение предполагало быстрый отогрев предварительно замороженной пробы при одновременном воздействии на нее внешней квазистатической механической нагрузки и внутренних напряжений от эффекта морозного пучения. С учетом установленных в ходе опытов закономерностей проанализирована информативность основных известных подходов к выявлению акустико-эмиссионных эффектов памяти в ледопородной матрице. Показана возможность использования этих эффектов для оценки изменения несущей способности и структурной устойчивости грунтового материала в функции от режима его нагружения. Предложен новый численный критерий для оценки процессов нарастания и релаксации напряжений в грунте в функции от стадии его деформированного состояния. Установлено, что указанный критерий может быть использован для идентификации предвестников перехода грунтового материала на стадию сдвига согласно классификации проф. Н.М. Герсеванова.

**Ключевые слова:** мерзлые и талые грунты, температурный режим, несущая способность, напряженное состояние, термомеханическое нагружение, акустическая эмиссия, закономерности, эксперимент, разработка способов геоконтроля.

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

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

---

## Using acoustic emission and memory effect in evaluation of structural stability of frozen soil under cyclic heating and mechanical loading

E.A. Novikov<sup>1</sup>, M.G. Zaytsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: e.novikov@misis.ru

---

**Abstract:** A new method is substantiated for geocontrol and monitoring of soil stability at the bottom of foundations of buildings and structures in the zones of seasonal and permanently frozen ground. The aspects of geomechanics and geocryology are discussed as load-bearing capacity of soil is greatly affected by both the applied mechanical load and the ambient temperature fluctuation. The problem is formulated to check the presence of memory effects in acoustic emission (thermomechanical equivalents of the Kaiser and Felicity effects) in subsoil subject to alternating positive and negative temperatures and simultaneously experiencing different-stage states of strain. For solving the problem, a set of experiments was carried out to record parameters of acoustic emission in multi-cyclic thermomechanical loading of soil samples of various composition and degree of freezing. The loading consisted of fast heating of a pre-frozen sample subject simultaneously to external quasi-static mechanical loading and internal stresses due to frost heave. Using the experimentally determined relationships, the information capacity of the basic known approaches to revealing memory effects in acoustic emission in ice-and-rock matrix was analyzed. It is shown that these memory effects can be used for estimation of change in the load-bearing capacity and structural stability of soil as function of soil loading conditions. The new numerical criterion is proposed for assessing increment and relaxation of stresses in soil as functions of soil strain state. This criterion is also applicable to identification of signs of soil transition to shearing stage according to the classification of Professor N.M. Gersevanov.

**Key words:** frozen and thawed soil, temperature conditions, load-bearing capacity, stress state, thermomechanical loading, acoustic emission, relationships, experiment, development of geo-control methods.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 18-77-00009.

**For citation:** Novikov E. A., Zaytsev M. G. Using acoustic emission and memory effect in evaluation of structural stability of frozen soil under cyclic heating and mechanical loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3):30-44. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-30-44.

---

### Введение

Реализация масштабных инфраструктурных проектов для освоения месторождений в северных регионах требует повышения надежности проектирования долговременных сооружений в вечной мерзлоте, в частности, ухода от допущения о гарантированном сохранении вечной мерзлоты на весь срок эксплуатации инженерного сооружения [1]. Отмеченное делает актуальным разработку подходов к оперативному и экономичному получению данных для определения текущего состояния и прогноза

эволюции состояния геоподосновы [2, 3]. Используемые в настоящее время методы и методики контроля состояния грунтов [4, 5] (активные геофизические методы, прямые деформационные измерения в грунтах в процессе вдавливания в них специальных инденторов, измерение нагрузок сжатия или среза при различных схемах механического нагружения) нельзя признать достаточно эффективными для оценки состояния криолитозоны ввиду их трудоемкости, необходимости больших временных затрат на реализацию, а также существен-

но вероятностного характера получаемых при интерпретации их результатов оценок.

Сказанное обосновывает актуальность совершенствования известных и создания новых методов изучения состояния грунтов в условиях их механического и температурного нагружения. Причем последнее может быть связано одновременно с климатическими процессами и с локальным растеплением в результате воздействия техногенных источников тепла и (или) образованием техногенных каналов миграции тепла с дневной поверхности. В качестве характерного примера здесь можно привести случай поступления тепла в основание свайного фундамента по самой металлической свае. При этом возрастание температуры вмещающей геосреды даже на 1–2 °С дает снижение несущей способности свай вплоть до 50% от изначальной величины.

В рамках предыдущего этапа исследований [6, 7] подтверждена чувствительность метода термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) [13] к деформациям структуры грунта в ходе изменения его криогенного состояния. Определены требования к приборному обеспечению и конструкции лабораторной установки, на которой могут быть выполнены рассматриваемые исследования. Обоснованы возможные механизмы формирования акустико-эмиссионного отклика грунта в функции от его остаточной несущей способности. Предложены базовые методические подходы к получению, обработке и оценке соответствующей акустико-эмиссионной измерительной информации.

Вместе с тем многие аспекты реализации метода ТАЭ применительно к контролю эволюции структуры и состояния криогенных грунтов остались неохваченными. В частности, необходимо разработать подходы к оценке не толь-

ко деформационного состояния грунта, но и процессов аккумуляции и последующего высвобождения действующих в нем напряжений. Кроме того, следует определить и учесть при интерпретации измерительной информации вклад акустико-эмиссионных эффектов памяти в особенности реализации закономерностей акустико-эмиссионного отклика грунта на его термомеханическое нагружение.

### **Постановка экспериментов**

Использованная лабораторная установка подробно описана в [10] и проиллюстрирована рис. 1, на котором приведены условные обозначения следующих ее основных элементов: содержащая пробу грунта герметичная металлическая колба 1 с подвижным поршнем 2 в верхней части; гидравлическое давящее устройство 3, сообщающее нагрузку поршню 2; расположенный на штырях 4 по периметру центральной части колбы блок нагревательных элементов 5 и акустико-эмиссионный датчик серии ГТ 6 в донной части колбы, соприкасающийся с металлическим волноводом 7.

Кроме того, в состав установки входит следующее оборудование, которое на рис. 1 условно не показано: блок датчиков температуры АТА-210, подключенных к регистратору АТЕ-9380; лабораторный автотрансформатор, контролирующий подачу напряжения на нагревательные элементы, что определяет генерируемый ими тепловой поток; тензометрический датчик LSC-20Т с устройством индикации и отображения CAS NT-201А (при нагрузках от 3,5–4,0 т до 19–20 т) или динамометр ДОСМ-3-5У (при нагрузках до 3,5–4,0 т); предусилитель типа ПАЭФ, являющийся звеном передачи измерительной информации с акустико-эмиссионного датчика серии ГТ на многоканальную модульную систему сбора и обработки акустико-эмиссионной ин-

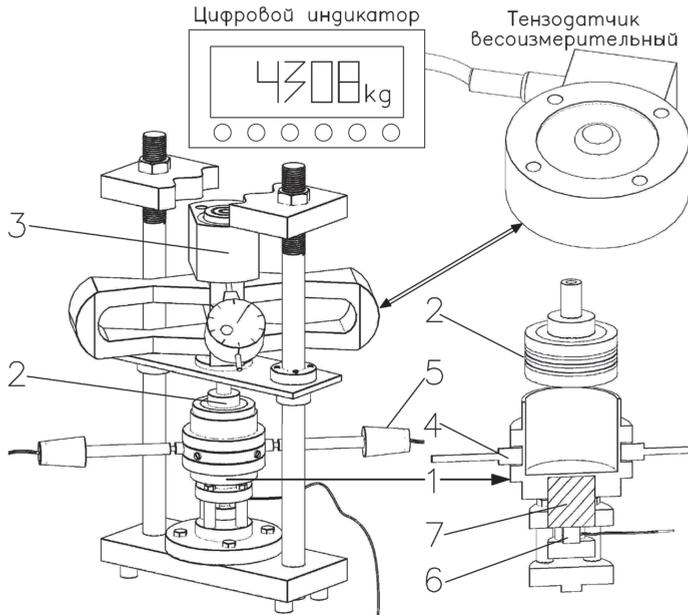


Рис. 1. Изометрическое представление модуля термомеханического нагружения грунта в составе лабораторной установки

Fig. 1. Isometric presentation of thermomechanical loading modulus in soil on laboratory setup

формации A-Line 32D; морозильная камера SE 20-45, внутри которой в ходе экспериментов размещалась приведенная на рис. 1 конструкция.

Испытывались пробы с содержанием влаги порядка 20–30% от массы сухой части из намывного карьерного песка с основной фракцией 0,5–1,0 мм, глины, почвенного грунта (чернозема) в соотношениях 2:1:0; 1:1:0; 1:2:0 и 1:1:2 соответственно.

Термомеханический режим экспериментов предполагал механическое нагружение грунта во время его промерзания, производившегося в течение не менее чем 120 мин при  $T_{amb} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и последующего отогрева до  $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Прогрев пробы до такой температуры в среднем занимал порядка 90–120 мин. Затем с пробы снималась нагрузка, и она за счет естественного конвекционного теплопереноса остывала до комнатной температуры  $+20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после чего выполнялся следующий цикл термомеханиче-

ского нагружения. Параллельно велась регистрация параметров акустической эмиссии (АЭ).

Также проведен эксперимент, заключающийся в регистрации сигналов АЭ без изменения температурного режима пробы, т.е. при повторно-переменной механической нагрузке полностью смерзшейся ледопородной матрице. Этот эксперимент имел методическую направленность и прежде всего ставил своей задачей определение оптимального режима стимуляции информативного акустико-эмиссионного отклика, позволяющего достоверно оценить эволюцию напряженно-деформированного состояния криогенного грунтового материала.

### Методические подходы к обработке измерительной информации

Далее приведен перечень и толкование физического смысла использованных в настоящей работе параметров

АЭ. Дается краткий анализ применимости этих параметров для решения рассматриваемых задач. На рис. 2 приведена характерная форма сигнала АЭ, показывающая, какие особенности сигнала описывает каждый из этих параметров.

Кроме отображенных на рис. 2 был также использован параметр «активность АЭ»  $\dot{N}_\Sigma$  — число зарегистрированных акустико-эмиссионных событий за единицу времени, что характеризует интенсивность деструкции структурных связей в материале. Однако на  $\dot{N}_\Sigma$  влияет как деструкция слабых водно-коллоидных связей, которые почти не сказываются на несущей способности грунта, так и разрушение прочных химических и кристаллических связей, исчерпание запаса которых определяет эволюцию свойств грунтового материала. Причем поток АЭ событий от слабых связей зачастую замусоривает акустограмму и

значительно осложняет прослеживаемость хода более высокоуровневых процессов.

В свою очередь параметр «длительность импульса АЭ»  $D_{imp}$  позволяет вычленив в потоке событий ТАЭ те из них, которые относятся к переходу в напряженное состояние более прочных связей. Последние дольше выдерживают нагрузку, сохраняя целостность, что дает пропорционально более длительные сигналы ТАЭ.

Параметр «амплитуда сигнала АЭ»  $A_{imp}$  рассматривается как мера максимального запаса энергии, которую может удержать связь перед потерей целостности. Данная мера также может быть применена для оценки прочностных свойств связи, ставшей источником ТАЭ. Совместная оценка с применением  $D_{imp}$  и  $A_{imp}$  минимизирует риски промаха.

Параметр «число выбросов в импульсе АЭ»  $V_{imp}$  показывает количество

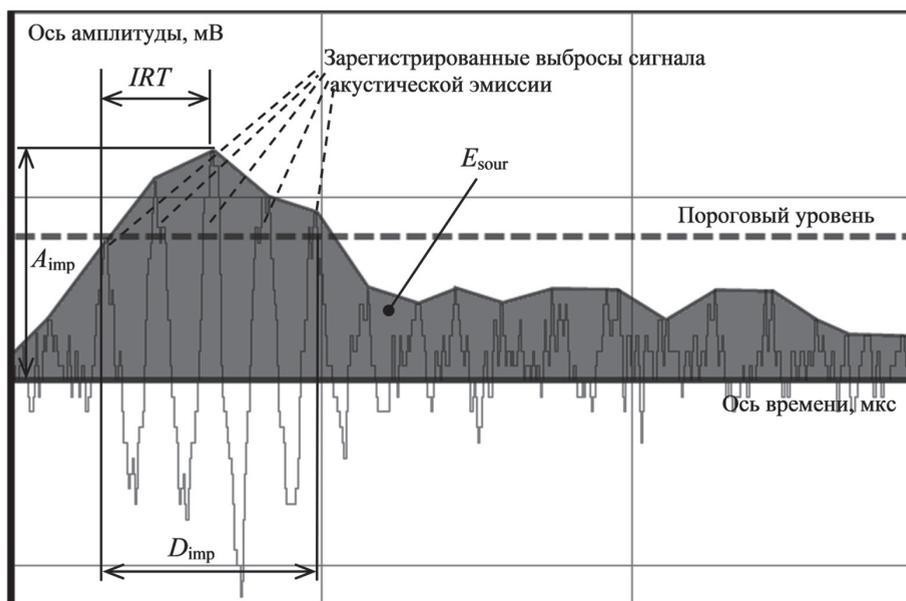


Рис. 2. Характерная форма сигнала акустической эмиссии и основные параметры, используемые для ее численной оценки:  $IRT$  — время нарастания импульса АЭ;  $E_{sour}$  — энергия источника АЭ;  $D_{imp}$  — длительность импульса АЭ;  $A_{imp}$  — амплитуда сигнала АЭ

Fig. 2. Representative signal waveform of acoustic emission and key parameters for numerical evaluation:  $IRT$ —AE impulse rise time;  $E_{sour}$ —AE source energy;  $D_{imp}$ —AE impulse duration;  $A_{imp}$ —AE impulse amplitude

превышений сигналом ТАЭ порогового уровня, отделяющего полезный сигнал от фоновых шумов. Соответственно  $V_{imp}$  позволяет численно определить повторяемость зарегистрированного пакета событий АЭ для того, чтобы отбросить те из них, которые не представительны и с наибольшей вероятностью являются единичными случайными всплесками.

Параметр «энергия источника АЭ»  $E_{sour}$  согласно ГОСТ Р 55045 характеризует величину акустической энергии, выделяемой в месте локальной перестройки структуры грунтового материала. Однако это определение не в полной мере отражает физический смысл  $E_{sour}$ . Перестройка структуры грунтового материала, например, эффект переориентации зерен грунта в направлении, перпендикулярном оси преобладающей нагрузки [14], происходит с поглощением энергии. Поэтому записанные в ГОСТе «структурные изменения» в грунтовом материале как раз сопровождаются релаксацией действующих в нем напряжений и снижением  $E_{sour}$ . Однако параллельно с процессами релаксациями идет формирование концентраторов напряжений, которые даже при относительно малых нагрузках со временем способны аккумулировать напряжения, достаточные для деструкции твердых элементов грунта и генерации высокоэнергетических всплесков. На начальных стадиях деформированного состояния материала число таких концентраторов не велико и преобладают релаксационные процессы. На стадии потери грунтом устойчивости наблюдается обратная картина.

Исходя из сказанного, физический смысл  $E_{sour}$  следует определить как меру напряжений, сохранившихся после затрат на релаксационную структурную перестройку (закрытие пор, выдавливание газовой-жидких включений и т.д.) грунтового материала и приведших к

необратимым деформациям его структурных элементов, сопровождающихся высвобождением энергии в форме упругой волны.

Параметр «время нарастания импульса АЭ»  $IRT$  отражает интенсивность аккумуляции напряжений в подверженных их действию структурных связях, что позволяет судить о взаимном соотношении процессов нарастания и релаксации напряжений. Также  $IRT$  пригоден для идентификации перехода в напряженное состояние исходно прочных структурных связей, способных накапливать гораздо большие объемы энергии. В общей совокупности  $E_{sour}$  и  $IRT$  позволяют судить как о величине аккумулированных в грунте напряжений, так и о его к ним устойчивости.

### **Результаты экспериментов и их обсуждение**

Классический подход к выявлению акустико-эмиссионных эффектов памяти предполагает установление какой-либо характерной особенности АЭ отклика, по условиям формирования которой судят о нагрузке, воздействовавшей на объект контроля до этого.

Характерный пример — эффект Кайзера, состоящий в формировании резкого всплеска активности АЭ при достижении максимальных напряжений предыдущего цикла нагружения. Однако такой эффект справедлив только для тел с крайне упорядоченной структурой, в которых после снятия нагрузки не происходит релаксационной перестройки, приводящей к формированию новых структурных связей. Кроме того, необходимо, чтобы весь запас структурных связей, которые при данной нагрузке способны испускать импульсы АЭ, был полностью разрушен действием этой нагрузки. В результате, до тех пор пока установочная нагрузка не будет превышена и не будут инициированы

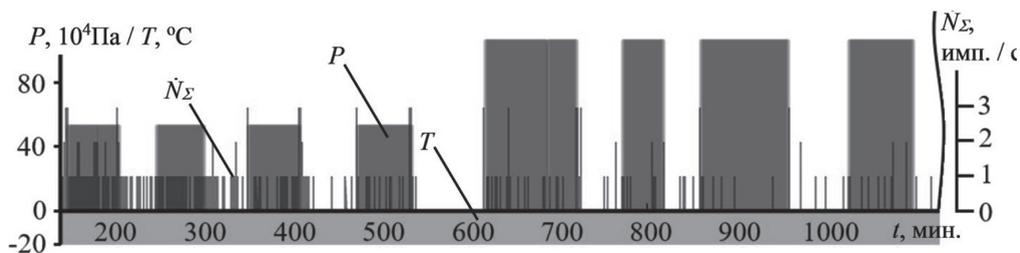


Рис. 3. Часть акустограммы (зависимость  $\dot{N}_\Sigma$  от времени  $t$  с начала эксперимента), полученная при нагружении промерзшего до минус  $20\text{ }^\circ\text{C}$  грунта

Fig. 3. Fragment of acoustogram (dependence of  $\dot{N}_\Sigma$  on time  $t$  since the test onset) obtained in loading of soil frozen to minus  $20\text{ }^\circ\text{C}$

до этого инертные структурные элементы, уровень  $\dot{N}_\Sigma$  не превысит фонового. Россыпной грунт не удовлетворяет ни одному из этих условий. Его частицы постоянно перестраиваются и образуют новые связи различной природы. При нагружении формируется ядро уплотнения, границы которого сдвигаются с течением времени. Поэтому в каждом последующем цикле нагружения картина распределения напряжений претерпевает изменения, захватывая новые структурные элементы, которые до этого сохранились не по причине высоких прочностных свойств, а потому, что до этого давление не воздействовало на них в полной мере. С учетом сказанного среди почвенных грунтов предпосылками к проявлению некоего аналога эффекта Кайзера обладает только обводненный грунтовый материал на стадии глубокой проморозки, когда существует монолитная ледопородная матрица.

На рис. 3 представлена характерная акустограмма при циклическом механическом нагружении предварительно замороженной до минус  $20\text{ }^\circ\text{C}$  пробы из 30% глины, 70% песка фракции 0,5–1,0 мм с содержанием воды 30% от массы сухой составляющей.

На рис. 3 акустограмма сокращена до первых 1230 мин. Весь эксперимент длился более 35 ч. Пробе по четыре раза последовательно сообщалась каждая из следующих нагрузок  $P$ : 529,2 кПа; 1,05 МПа; 1,58 МПа; 2,12 МПа.

Из функции  $\dot{N}_\Sigma(t)$  на рис. 3 следует отсутствие аналога эффекта Кайзера.

Более интересные результаты получены при использовании подхода, лежащего в основе эффекта Фелисити — явления формирования АЭ при создании в пробе напряжений, значение которых ниже значения предварительно приложенных. Существует несколько подходов к оценке эффекта Фелисити. Их суть состоит в прослеживании изменения величин параметров акустико-эмиссионного отклика на повторяющиеся воздействия или в определении разницы во времени между формированием характерных точек этого отклика.

В данном случае для оценки использовано отношение показателей  $R_m$  в циклах нагружения  $n'' = 1\text{--}16$  к величине  $R_m$  в установочном цикле  $n_0$  (рис. 4), где выполнена регистрация параметров АЭ при замораживании грунта без приложения механической нагрузки.

$$R_m(n'' / n_0) = \frac{M\langle \dot{N}_\Sigma(n'') \rangle \cdot M\langle D_{imp}(n'') \rangle \cdot M\langle A_{imp}(n'') \rangle \cdot M\langle V_{imp}(n'') \rangle}{M\langle \dot{N}_\Sigma(n_0) \rangle \cdot M\langle D_{imp}(n_0) \rangle \cdot M\langle A_{imp}(n_0) \rangle \cdot M\langle V_{imp}(n_0) \rangle} \quad (1)$$

Физический смысл  $R_m$  — отношение средней мощности актов деструкции в исходной ледопородной матрице во время первичного нагружения к средней мощности импульсов, испускаемых структурными связями льда при их переходе в напряженное состояние под действием каждого последующего цикла механической нагрузки и эффекта морозного пучения (при наличии).

На рис. 4 группы значений I и II относятся к стадиям эволюции деформированного состояния, когда структура грунта достаточно стабильна. В зоне I напряжений еще недостаточно для интенсификации закрытия пустот между частицами грунта и уплотнения ледяного каркаса. При этом пластичность льда позволяет ему до определенного предела амортизировать нагрузки без необратимых деформаций. Этот процесс занимает зону II. После исчерпания возможности для обжатия ледопородной матрицы (стадия III) происходит накопление концентраторов напряжений и переход льда в область хрупкого разрушения. На стадии IV убыстряется расстрескивание ледовой матрицы, дробление смерзшегося грунта и деструкция связующего глинистого цемента.

Таким образом представленная на рис. 4 взаимосвязь подтверждает предположение о существовании в почвен-

ных грунтах аналога эффекта Фелисити. Тем не менее поток информативных событий АЭ (рис. 3) оказался низок. Это означает высокую чувствительность к единичным случайным выбросам и помехам от фоновых шумов, защиту от которых крайне затруднительно обеспечить при работе в полевых условиях. Поэтому для создания возможности перехода от лабораторных испытаний к натурным исследованиям необходимо повысить интенсивность акустико-эмиссионного отклика, чтобы полезная составляющая в общем потоке акустических сигналов значительно перекрывала помеховую. Такое повышение решено обеспечить стимуляцией информативного отклика за счет отогрева пробы до  $65\text{ }^\circ\text{C}$ . Характерный вид полученных при этом акустограмм показан на рис. 5. Неравномерность нагрузки  $P$  связана с эффектом морозного пучения, активизацию которого авторы объясняют нарушением термического равновесия грунта при его циклическом локальном растеплении.

Приведенный на рис. 5 режим термомеханического нагружения подразделяется на три последовательные стадии с различными механизмами генерации сигналов АЭ:

1) Стадия полного промерзания: ледовый каркас демпфирует приложенные

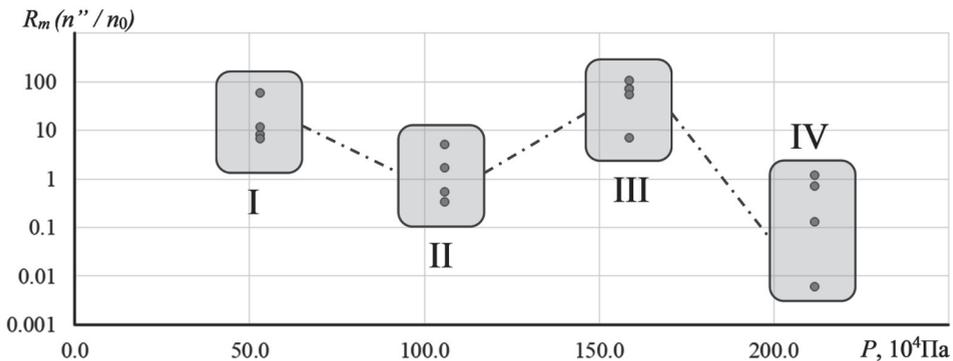


Рис. 4. Зависимость отношения  $R_m(n''/n_0)$  в функции от нагрузки в цикле  $n''$

Fig. 4. Ratio  $R_m(n''/n_0)$  as function of loading in cycle  $n''$

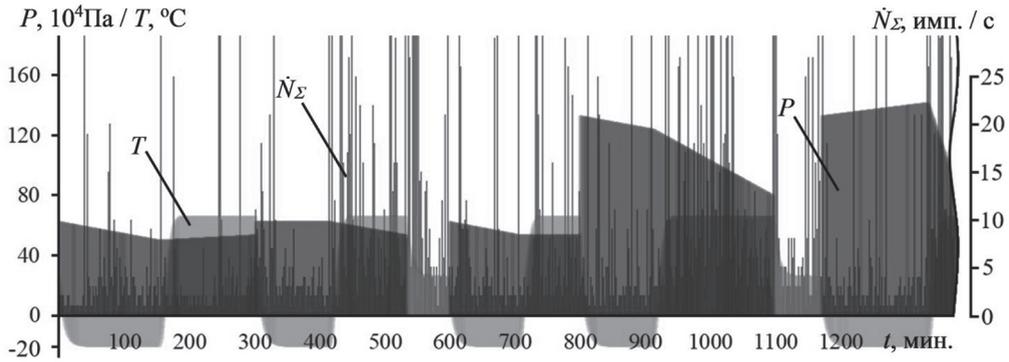


Рис. 5. Часть акустограммы, полученной при циклическом отогреве промерзшего грунта, находящегося под действием одноосной механической нагрузки

Fig. 5. Fragment of acoustogram in cyclic heating of frozen soil subject to uniaxial mechanical load

нагрузки, в результате чего преобладают процессы перераспределения и релаксации напряжений. Для оценки целесообразнее использовать энергетические параметры АЭ:  $A_{imp}$ ,  $V_{imp}$ ;

2) Стадия локального растепления: ледовая матрица еще сохраняет целостность, но активизируются процессы деструкции. Начинается дробление ледопородных агрегатов, глинистого цемента и т.д., происходит переориентация зерен грунта;

3) Стадия кускования и перехода ледового каркаса в жидкую фазу: структурные связи грунта полностью воспринимают приложенную к пробе механическую нагрузку. Процессы деструкции достигают высшей точки своего развития. Поэтому среди параметров АЭ наиболее информативны  $\dot{N}_{\Sigma}$  и  $D_{imp}$ .

С учетом сказанного для случая термической стимуляции АЭ расчетную формулу  $R_m$  следует привести к виду

$$R'_m = \frac{\frac{M\langle A_{imp}^3(N_n) \rangle \cdot M\langle V_{imp}^3(N_n) \rangle}{M\langle A_{imp}^{OT}(N_n) \rangle \cdot M\langle V_{imp}^{OT}(N_n) \rangle}}{\frac{M\langle A_{imp}^3(N_0) \rangle \cdot M\langle V_{imp}^3(N_0) \rangle}{M\langle A_{imp}^{OT}(N_0) \rangle \cdot M\langle V_{imp}^{OT}(N_0) \rangle}} \Bigg/ \frac{M\langle \dot{N}_{\Sigma}^B(N_n) \rangle \cdot M\langle D_{imp}^B(N_n) \rangle}{M\langle \dot{N}_{\Sigma}^{OT}(N_n) \rangle \cdot M\langle D_{imp}^{OT}(N_n) \rangle}}, \quad (2)$$

где  $N_n$  — порядковый номер  $n$ -го цикла растепления геосреды и предшествующего ему цикла ее промерзания;  $M\langle A_{imp}^3 \rangle$ ,  $M\langle V_{imp}^3 \rangle$  — средние значения  $A_{imp}$ ,  $V_{imp}$  на стадии полного промерзания;  $M\langle A_{imp}^{OT} \rangle$ ,  $M\langle V_{imp}^{OT} \rangle$ ,  $M\langle \dot{N}_{\Sigma}^{OT} \rangle$ ,  $M\langle D_{imp}^{OT} \rangle$  — средние значения  $\dot{N}_{\Sigma}$ ,  $D_{imp}$ ,  $A_{imp}$ ,  $V_{imp}$  на стадии локального растепления;  $M\langle \dot{N}_{\Sigma}^{OT} \rangle$ ,  $M\langle D_{imp}^{OT} \rangle$  — средние значения  $\dot{N}_{\Sigma}$ ,  $D_{imp}$  во время кускования и перехода ледового каркаса в жидкую фазу.

В такой редакции  $R'_m$  является мерой снижения стабильности грунтового материала к действующей на него механической нагрузке после снятия опорного ледового каркаса. Другими словами, величина  $R'_m$  служит критерием оценки опасности потери грунтовым материалом устойчивости при его растепления в функции от существующего на данный момент в ледопородной матрице напряженно-деформированного состояния.

Также принято во внимание, что соотношение одной и той же нагрузки грунтам различного гранулометрического и вещественного состава может привести к совершенно разнородному изменению деформированного состояния. Так почвенные лесистые грунты дают несоизмеримо большую осадку по сравнению с крупнозернистым песком. Относительно небольшой прирост количества глинистого цемента существенно повышает связанность грунтового материала и так далее. Поэтому для того, чтобы рассматривать полученные на различных грунтах результаты как единую совокупность, их нужно нормировать к показателю, отражающему изменение их напряженного состояния под действием нагрузки, а не к ее абсолютной величине. В качестве такого показателя предложен критерий  $L$

$$L = \frac{M\langle E_{sour}^3 \rangle \cdot M\langle IRT^3 \rangle}{M\langle E_{sour}^B \rangle \cdot M\langle IRT^B \rangle}, \quad (3)$$

где  $M\langle E_{sour}^3 \rangle, M\langle IRT^3 \rangle, M\langle E_{sour}^B \rangle, M\langle IRT^B \rangle$  — значения  $E_{sour}$  и  $IRT$ , усредненные по временным областям полного промерзания и окончательного оттаивания соответственно. На рис. 6 показан график распределения значений  $L$  в функции от средней нагрузки  $P$  на стадии заморозки (сумма внешней од-

ноосной нагрузки и влияния морозного пучения).

Физический смысл коэффициента  $L$  — мера интенсивности структурных перестановок и деструкции элементов грунта при перераспределении напряжений с таящего ледяного каркаса на структурные связи самого грунтового материала. Здесь можно выявить пять стадий деформированного состояния. Возникающие на нулевой стадии деформации лежат в упругой области и после снятия нагрузки грунтовой материал возвращается к исходному состоянию. Развитие деформированного состояния начинается только на последующей стадии I, где инициируется процесс пластического уплотнения за счет закрытия пустот и миграции газовой-жидких включений. Спад функции  $L(P)$  на стадии I показывает постепенное расширение ядра уплотнения по объему пробы и перевод в напряженное состояние все новых ее элементарных участков. Лавинообразно закрываются микропустоты, идет отжатие влаги из частиц грунта и происходит переориентация их структуры относительно главного вектора приложения нагрузки.

При этом до конца стадии I в грунте еще остаются элементарные участки, на которых упругие деформации превалируют над пластическими. В момент

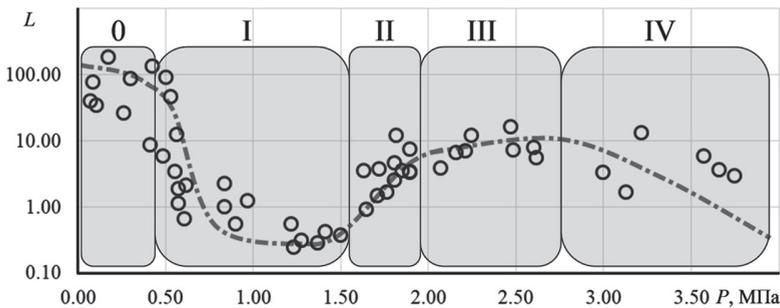


Рис. 6. Распределение значений функции  $L(P)$ , построенной по результатам испытания всех использованных проб грунта с существенно различным вещественным составом

Fig. 6. Distribution of values of function  $L(P)$  plotted by test data of all soil samples of essentially different composition

исчерпания потенциала грунта к релаксации напряжений за счет просадок наступает стадия II, в течение которой грунтовый материал стремится к перуплотненному состоянию, когда структурные связи химической и кристаллизационной природы теряют целостность и происходит резкое ухудшение качества сцепления. Далее на стадии III разрушаются оставшиеся связи и начинается дробление отдельных зерен грунта. В полевых условиях созданные на стадии III напряжения зачастую достаточны для выпирания грунта в сторону от области действия нагрузки и разрушения фундамента. При невозможности выпирания, например, за счет размещения опалубки вокруг зоны действия напряжений, процесс дробления зерен и структурных связей грунтового материала будет идти вплоть исчерпания запаса потенциальных очагов деструкции. Затухание этого процесса создает снижение функции  $L(P)$  на стадии IV, где интенсивность структурных перестановок падает ввиду того, что деформированное состояние грунта достигло предела своего развития.

На рис. 7 приведена зависимость  $R'_m(L)$  для тех же проб грунтов, результаты испытания которых по стадиям 0, I, II показаны на рис. 6. Стадии III и IV

исключены из рассмотрения, поскольку структурные связи, являющиеся носителями информации о ранее испытанных грунтом воздействиях, здесь лавинообразно разрушаются и к завершению стадии III уже практически отсутствуют.

На рис. 7 обозначены три уровня, позволяющие расклассифицировать склонность грунтового материала к потере устойчивости:

А — вследствие оптимального уплотнения к концу стадии I (рис. 6) образуется максимальное число контактов между соседними структурными элементами грунта. Это улучшает качество сцепления между указанными элементами и повышает степень перераспределения напряжений. Последнее позволяет снизить число их концентраторов, являющихся потенциальными очагами деструкции. Грунт обладает наивысшей несущей способностью и стабильностью структуры.

В — область перехода между состоянием устойчивого равновесия и фазой интенсивных структурных перестановок, сопряженных с потерей целостности у прочных (химических, кристаллических) структурных связей, определяющих несущую способность грунта.

С — напряжения действуют в области упругих деформаций. Структурные из-

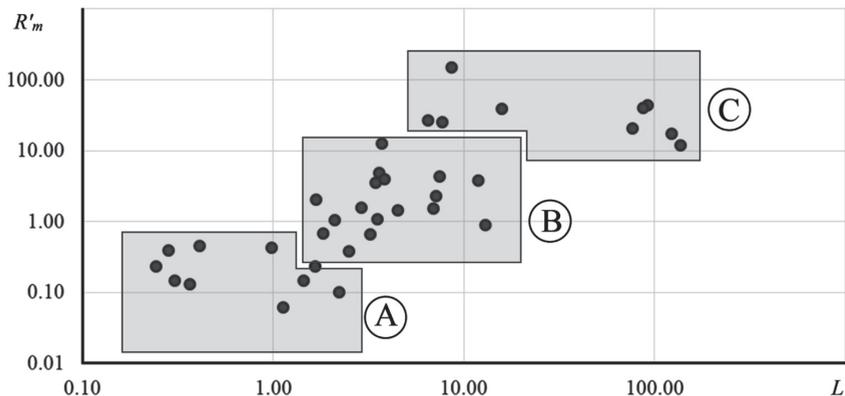


Рис. 7. Распределение значений функции  $R'_m(L)$

Fig. 7. Distribution of values of function  $R'_m(L)$

менения практически отсутствуют. Однако такой грунт следует классифицировать как склонный к значительным структурным перестановкам. Высока опасность обширных просадочных явлений даже при относительно небольшом приросте напряженного состояния геосреды.

Поскольку приведенные выше экспериментальные результаты получены на грунтовых материалах, между циклами нагружения которых в течение не менее чем 45 мин производилось полное снятие как термической, так и механической нагрузок, можно говорить о сохранении грунтом информации об интенсивности ранее протекавших в нем структурных перестановок. Таким образом, находит подтверждение существование в мерзлых и талых грунтах термомеханического аналога эффекта Фелисити.

Распределение значений функции  $R'_m(L)$  принципиально позволяет численно оценить интенсивность развития деформированного состояния грунтового массива. Для этого по его глубине и простираюнию следует отобрать и законсервировать ядерной материал таким образом, чтобы при транспортировке исключалось изменение его криогенного состояния, а также отсутствовало разрыхление, связанное с внешними механическими воздействиями. Это необходимо для предотвращения потери структурных связей, несущих информацию об эволюции напряженно-деформированного состояния массива.

Далее в лабораторных условиях производится регистрация акустико-эмиссионного отклика этого образца на термомеханическое нагружение, выполняемое по описанной выше схеме. Причем, вектор приложения механической нагрузки должен совпадать с направлением главного максимального напряжения, действующего в соответствующем

массива. Для расчета знаменателя формулы (2), принимаемого за опорное значение при определении  $R'_m$ , следует использовать параметры АЭ отклика образца того же грунта, деформированное состояние которого известно. Это может быть достигнуто путем использования пробы, состояние которой определено другими методами, или за счет использования априори ненарушенного образца, находящегося на стадии 0, согласно классификации, представленной на рис. 6. Для расчета числителя формулы (2) и величины критерия  $L$  по формуле (3) должны использоваться параметры акустической эмиссии, зарегистрированной при лабораторном испытании зерна. Полученное таким образом значение функции  $R'_m(L)$  позволяет качественно судить о максимальной интенсивности деформационных процессов, которые зерно испытывало до извлечения из массива.

### Выводы

Представлены сведения, полученные в результате цикла исследований, направленных на экспериментальную проверку существования в почвенных грунтах акустико-эмиссионных эффектов памяти. Эксперименты заключались в регистрации параметров акустической эмиссии проб грунтов вариативного состава во время их повторно-переменного термомеханического нагружения, чередующегося со стадиями полной релаксации созданных в грунтах напряжений.

Установлено наличие акустико-эмиссионного эффекта, который можно рассматривать в качестве некоего специфического, характерного для рыхлых криогенных грунтов аналога эффекта памяти (эффекта Фелисити). Суть выявленного эффекта состоит в существовании при циклическом термомеханическом нагружении мерзлых обводненных

грунтов взаимосвязи между изменением соотношения определенного набора параметров акустической эмиссии в разных циклах нагружения с одной стороны и интенсивности развития деформированного состояния, имевшего место в грунте между этими циклами, с другой. В отличие от классических эффектов памяти, здесь объект контроля сохраняет информацию не о величине максимальной ранее испытанной нагрузки, а о скорости нарастания вызванных этой нагрузкой структурных перестановок. Другими словами, обнаруженный эффект характеризует динамику устойчивости грунтового материала под действием нагрузки, но не привязан к ее абсолютной величине, а так же, как и эффект Фелисити, возникает до формирования в объекте контроля максимальных напряжений предшествующего цикла нагружения.

Данный эффект также был отмечен при механическом нагружении полностью мерзлого грунта, не подвергавшегося отогреву в ходе эксперимента. Однако полученный в этом случае акустико-эмиссионный отклик был крайне слаб и поэтому очень чувствителен к

влиянию акустических помех. Из этого следует обязательность дополнительной термической стимуляции акустической эмиссии в объекте контроля с целью получения более представительного потока информативных акустических событий.

Для численного выражения вышеописанного эффекта памяти созданы и обоснованы критерий  $L$  оценки структурной устойчивости грунта к действию нагрузки и критерий  $R'_m$ , характеризующий изменение зафиксированной в момент наблюдения меры стабильности грунтового материала относительно его исходного состояния. Показана принципиальная возможность применения функции  $R'_m(L)$  для оценки изменения структурной устойчивости грунтового материала и уточнения истории изменения его напряженного состояния.

Представленные в настоящей работе методические подходы потенциально применимы для адаптации предлагаемого метода термостимулированной акустической эмиссии к решению задачи натурального контроля напряженно-деформированного состояния массивов криогенных грунтов как в мерзлом, так и в полностью или частично талом состоянии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустовойт Г.П., Гречищева Э.С., Голубин С.И., Аврамов А.В. Влияние способа получения исходных данных на прогнозные теплотехнические расчеты при проектировании в криолитозоне // Криосфера Земли. — 2018. — Т. XXII. — № 1. — С. 51–57.
2. Шibaев И.А., Сас И.Е., Черепецкая Е.Б., Багрянцев Д.М. Обоснование возможных упрощений при оценке взаимодействия «грунт-основание» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 9. — С. 152–157. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-152-157.
3. Алексеев А.В., Иовлев Г.А. Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 75–87. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.
4. Voznesensky A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone // Journal of Mining Science, 2015, Vol. 51, No 1, pp. 23–30.
5. Voznesenskii A. S., Shkuratnik V. L., Kutkin Ya. O. Dynamics of thermal and mechanical loading as a cause of acoustic emission in rock // Rock Dynamics and Applications — State of the Art: Proceedings of the 1st International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-1). Leiden: CRC Press, 2013. Pp. 429–435.
6. Котов П.И., Роман Л.Т., Сахаров И.И., Парамонов В.Н., Парамонов М.В. Влияние условий оттаивания и вида испытаний на деформационные характеристики оттаивающих грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2015. — № 5. — С. 8–13.

7. Хафизов Р.М. Анализ методов определения деформационных характеристик связанных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2015. — № 6. — С. 37–40.
8. Котов П.И. Обобщение деформационных характеристик оттаивающих грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2013. — № 3. — С. 23–26.
9. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. — Пенза: ПГУАС, 2008. — 696 с.
10. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Zaytsev M.G. Manifestations of acoustic emission in frozen soils with simultaneous influence of variable mechanical and thermal effects on them // Journal of Mining Institute, 2019, Vol. 238, Pp. 383–391.
11. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Oshkin R.O. Acoustic emission patterns as guides to unfrozen water in frozen soils // Earth's Cryosphere, 2016, Vol. XX, No 1, pp. 91–94.
12. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Oshkin R.O., Zaitsev M.G. Effect of the stress-strain state of sandy-clay soils on their thermally stimulated acoustic emission // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017. Vol. 54. No 2. pp. 81–86.
13. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А. Термостимулированная акустическая эмиссия горных пород как перспективный инструмент решения задач геоконтроля. — 2017. — № 6. — С. 21–26.
14. Васильчук Ю.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Королев В.А., Трофимов В.Т. Грунтоведение. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с. **РИАБ**

## REFERENCES

1. Pustovoyt G.P., Grechishcheva E.S., Golubin S.I., Avramov A.V. How the type of input data affects prognostic temperature calculations for design in permafrost. *Kriosfera Zemli*. 2018. Vol. XXII, no 1, pp. 51–57. [In Russ].
2. Shibaev I.A., Sas I.E., Cherepetskaya E.B., Bagryantsev D.M. Substantiation of possible simplifications in soil–foundation interaction estimate. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 9, pp. 152–157. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-152-157.
3. Alekseev A. V., Iovlev G. A. Adjustment of hardening soil model to engineering geological conditions of Saint-Petersburg. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;4:75-87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.
4. Voznesensky A.S., Kutkin Y.O., Krasilov M.N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone. *Journal of Mining Science*, 2015, Vol. 51, No 1, pp. 23–30.
5. Voznesenskii A.S., Shkuratnik V.L., Kutkin Ya.O. Dynamics of thermal and mechanical loading as a cause of acoustic emission in rock. *Rock Dynamics and Applications – State of the Art: Proceedings of the 1st International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-1)*. Leiden: CRC Press, 2013. Pp. 429–435.
6. Kotov P.I., Roman L.T., Sakharov I.I., Paramonov V.N., Paramonov M.V. Influence of thawing conditions and type of testing on deformation characteristics of thawing soil. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2015, no 5, pp. 8–13. [In Russ].
7. Khafizov R.M. Analysis of methods for determining the deformation characteristics of cohesive soil. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2015, no 6, pp. 37–40. [In Russ].
8. Kotov P.I. Codification of deformation characteristics of thawing soils. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2013, no 3, pp. 23–26. [In Russ].
9. Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie voprosa: monografiya* [Methods for determining the mechanical properties of soils. State-of-the-art: monograph], Penza, PGUAS, 2008, 696 p.
10. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Zaytsev M.G. Manifestations of acoustic emission in frozen soils with simultaneous influence of variable mechanical and thermal effects on them. *Journal of Mining Institute*, 2019, Vol. 238, Pp. 383–391.
11. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Oshkin R.O. Acoustic emission patterns as guides to unfrozen water in frozen soils. *Earth's Cryosphere*, 2016, Vol. XX, No 1, pp. 91–94.

12. Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Oshkin R.O., Zaitsev M.G. Effect of the stress-strain state of sandy-clay soils on their thermally stimulated acoustic emission. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. Vol. 54. No 2. pp. 81–86.

13. Shkuratnik L.V., Novikov E.A. Thermally stimulated acoustic emission of rocks as a promising tool of geocontrol. *Gornyy zhurnal*, 2017, no 6, pp. 21–26. [In Russ].

14. Vasil'chuk Yu.A., Voznesenskiy E.A., Golodkovskaya G.A., Ziangirov R.S., Korolev V.A., Trofimov V.T. *Gruntovedenie* [Soil science], Moscow, Izd-vo MGU, 2005, 1024 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Евгений Александрович<sup>1</sup> — доцент, e-mail: e.novikov@misis.ru,

Зайцев Михаил Геннадьевич<sup>1</sup> — студент, e-mail: michailzaytsev1997@gmail.com,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

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

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.A. Novikov<sup>1</sup>, Assistant Professor, e-mail: e.novikov@misis.ru,

M.G. Zaytsev<sup>1</sup>, Student, e-mail: michailzaytsev1997@gmail.com,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS»,

119049, Moscow, Russia.

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

Получена редакцией 02.12.2019; получена после рецензии 24.01.2020; принята к печати 20.02.2020.

Received by the editors 02.12.2019; received after the review 24.01.2020; accepted for printing 20.02.2020.



---

### РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЕРИЙНЫХ СЕКЦИОННЫХ И РАЗБОРНЫХ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

(№ 1217/03–20 от 05.02.2020; 19 с.)

Боярских Геннадий Алексеевич<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: igb2000@mail.ru,

Боярских Илья Геннадьевич<sup>1</sup> — преподаватель, e-mail: igb2000@mail.ru,

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет.

Разработаны вероятностные модели предельного состояния неразборных серийных и разборных опытных трехшарошечных буровых долот, позволяющих реализовать в первой конструкции предупредить или сократить преждевременные отказы конструктивных элементов, во второй создать равнопрочную и равноизносную конструкцию долот с гарантированным ресурсом.

Ключевые слова: вероятностная модель, буровое долото, конструкция, преждевременный отказ, предельное состояние, критичность отказа и предельного состояния.

#### MODELING RELIABILITY OF SERIAL SECTIONAL AND COLLAPSIBLE ROLLER BITS

G.A. Boyarskikh<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: igb2000@mail.ru,

I.G. Boyarskikh<sup>1</sup>, Lecturer, e-mail: igb2000@mail.ru,

<sup>1</sup> Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Developed probabilistic models of non-separable limit state serial and portable experienced Tricone rock drilling bits, allowing to implement in the first design to prevent or reduce premature failure of structural elements, and secondly to create a durable and ravnovesnoi design bits with a guaranteed resource.

Key words: probabilistic model, drill bit, design, premature failure, limit state, critical failure and limit state.