

УДК 620.179.17/[622.(833.5+692.4:539.4):624.042.(62+63)]

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД  
РАЗЛИЧНЫХ ГЕНОТИПОВ ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ**

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

*Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",  
E-mail: ftkp@mail.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

Экспериментально исследованы и теоретически обоснованы закономерности низкотемпературной термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ), возникающей в образцах горных пород различных генотипов и пористости при одноосном механическом нагружении. Показано качественное соответствие этих закономерностей для магматических, метаморфических и осадочных горных пород. Проведено сопоставление границ стадий деформирования испытуемых горных пород, определенных по традиционной методике, основанной на деформационных измерениях, при механическом нагружении образцов, и измерении по предлагаемому ТАЭ методу. Дано объяснение механизмов, лежащих в основе рассмотренных термоакустоэмиссионных явлений, связанных с переходом объектов контроля из одной стадии деформирования в другую в зависимости от исходной дефектно-пористой структуры геоматериала. Показана возможность использования метода ТАЭ для контроля действующих в массиве напряжений и их пространственно-временной динамики.

*Горные породы, генотип, одноосное сжатие, термостимулированная акустическая эмиссия, теоретическое обоснование, напряженно-деформированное состояние, пористость*

Механическое нагружение образцов горных пород сопровождается изменением их поврежденности. Причем эти изменения в целом носят немонотонный характер и обуславливают стадийность возникающей при разрушении геоматериала акустической эмиссии (АЭ) [1, 2]. Закономерный характер стадийности создает предпосылки для использования метода АЭ для прогноза макроразрушения горной породы, а также оценки ее прочностных свойств [3, 4].

В то же время ограничением традиционного метода АЭ является его применимость только при активном деформировании геоматериала со скоростью, задаваемой испытательным прессом. Регистрируемая при этом зависимость суммарной АЭ проявляет качественное сходство с деформациями ползучести во времени [5]. Акустическая эмиссия возникает и при поддержании на постоянном уровне напряжения или деформации в объекте контроля в результате релаксации напряжений. Однако определить стадию деформирования или уровень действующих статических напряжений по параметрам АЭ в этом случае не представляется возможным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-05-00168.

В последние годы получило развитие новое направление акустоэмиссионных исследований горных пород, отличием которого является возбуждение сигналов АЭ в объекте контроля посредством создания термонапряжений при локальном неоднородном нагревании центрального участка. Последний становится источником термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ), параметры которой, регистрируемые на равноудаленных от места нагрева поверхностях образца горной породы, коррелируют с его структурной поврежденностью и прочностью [6].

Это свидетельствует о существовании связи между параметрами ТАЭ образца и его напряженно-деформированным состоянием, даже если последнее является квазистатическим. На сегодняшний день такая связь экспериментально подтверждена только на образцах Коелгинского мрамора: каждой стадии их деформирования соответствуют определенные закономерности ТАЭ, позволяющие эти стадии идентифицировать [7].

Цель настоящей работы — ответ на вопросы о том, насколько справедливы подходы и результаты, отраженные в [7], для горных пород других генотипов, а также как влияет на эти результаты исходная поврежденность геоматериала.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ, АППАРАТУРНОГО И МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРМОАКУСТОЭМИССИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Объекты испытаний — образцы (параллелепипеды размерами  $25 \times 25 \times 50$  мм) метаморфических, магматических и осадочных пород. Первые из них представлены мраморами Коелгинского и Кибик-Кордонского месторождений, вторые — гранитами Мансуровского и Суховязского месторождений, третьи — известняками месторождения Сары-Таш и Арагатского.

Каждое из месторождений, в свою очередь, представлено выборкой из 30 образцов, прошедшей предварительное цензурирование по методике, изложенной в [6]. Однородность каждой из выборок подтверждена результатами ультразвукового зондирования всех образцов на частоте 600 кГц. Относительные отклонения от среднего значения скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в каждом из образцов из выборки не превышали 1.8 и 4.1 % соответственно.

С использованием стандартных методик и оборудования [8, 9] на шести образцах каждой из выборок получены характерные значения предела прочности при сжатии  $\sigma_c$  и пористости  $m$ .

Для создания в образцах одноосных механических, а затем локальных термических напряжений при одновременном измерении параметров АЭ использовалась установка, упрощенная структурная схема которой представлена на рис. 1.

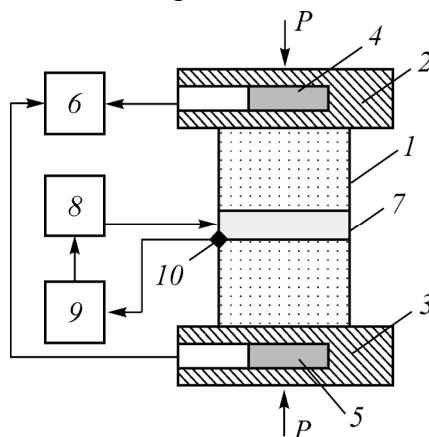


Рис. 1. Структурная схема испытательной установки

Давление  $P$ , создаваемое прессом, передается на образец  $1$  через контактные плиты  $2$  и  $3$ , в которые вмонтированы приемные пьезопреобразователи  $4$  и  $5$ . Сигналы АЭ с их выходов регистрируются и обрабатываются акустико-измерительной системой  $6$ . Электронагревательный элемент  $7$ , охватывающий центральную часть образца по его периметру, запитывается источником напряжения  $8$ , управляемым контроллером  $9$ . Последний запрограммирован на поддержание постоянной температуры  $90^\circ\text{C}$  в точке размещения термодпары  $10$ .

Экспериментальные исследования по установлению влияния величины  $P$  на параметры возбуждаемой и регистрируемой в образцах ТАЭ заключались в следующем. Каждый образец из выборки подвергался индивидуальной, возрастающей от образца к образцу с шагом  $0.1\sigma_c$ , постоянной механической нагрузке. Возникающая при этом АЭ через временной интервал  $\Delta t \approx 25$  мин снижалась до фонового уровня, что позволяло перейти к следующему этапу эксперимента. Не снимая механической нагрузки на образец, осуществлялся нагрев локальной области (рис. 1) до температуры  $90^\circ\text{C}$ . Возникающие в этой области сигналы ТАЭ, распространяющиеся к торцевым поверхностям образца, регистрировались и обрабатывались акустико-измерительной системой. В качестве примера на рис. 2 представлены характерные экспериментальные зависимости активности  $N_\Sigma(t)$  и суммарного счета  $N(t)$  ТАЭ при нагревании образца мрамора Коелгинского месторождения.

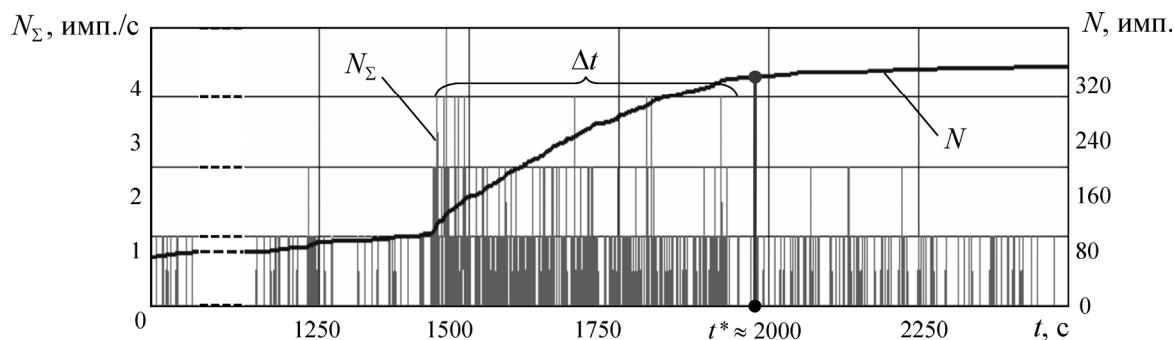


Рис. 2. Характерные экспериментальные зависимости активности  $N_\Sigma(t)$  и суммарного счета  $N(t)$  акустической эмиссии при нагревании образца мрамора Коелгинского месторождения: интервал  $\Delta t$  — область нагрева

На представленных на рис. 2 зависимостях четко выделяется временной интервал  $\Delta t$  активного нагрева, началу которого соответствует скачкообразное увеличение величины  $N_\Sigma$  относительно фонового значения и квазилинейный рост величины  $N$ . Концу этого интервала примерно соответствует момент времени  $t^*$ , когда завершается процесс установления термического равновесия образца с окружающей средой, что приводит к падению величины  $N_\Sigma$  до исходного фонового уровня и выполаживанию зависимости  $N(t)$ . Средняя активность ТАЭ  $\bar{N}_\Sigma$  в интервале  $\Delta t$ , где имеет место неустановившийся температурный режим, в дальнейшем принималась в качестве информативного параметра, характеризующего взаимосвязь ТАЭ образца с напряженно-деформированным состоянием.

### ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Результаты испытаний выборок образцов в порядке возрастания их пористости приведены на рис. 3. За границы стадий деформирования (показаны штриховыми линиями) приняты экстремумы  $\bar{N}_\Sigma$ .

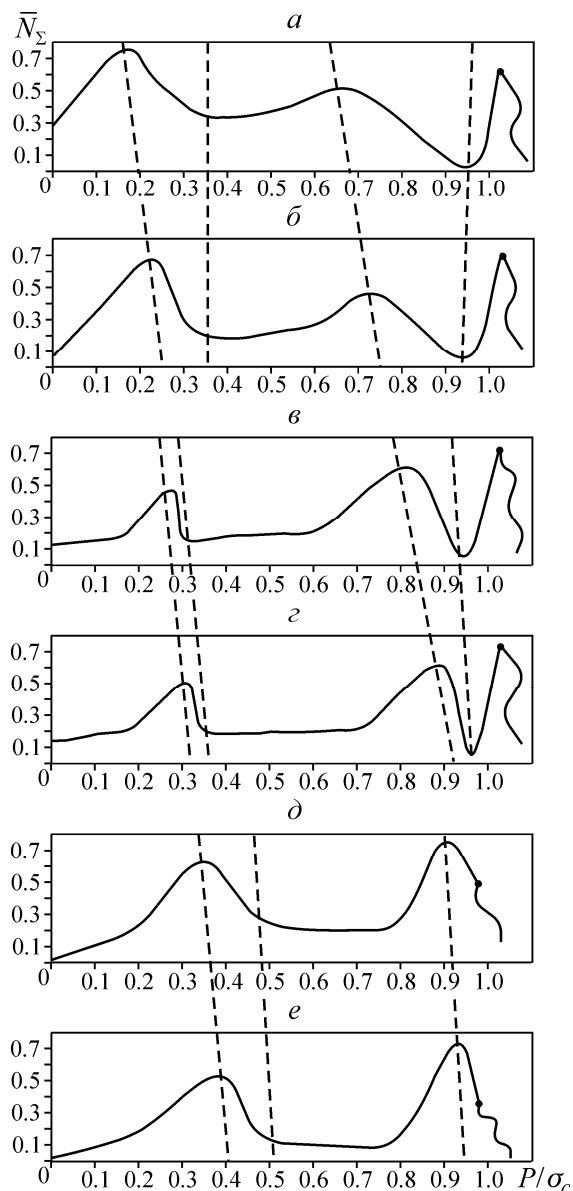


Рис. 3. Функция  $\bar{N}_\Sigma$  от выраженной в долях  $\sigma_c$  нагрузки, приложенной к образцам мраморов Кибик-Кордонского (а) и Коелгинского (б), гранитов Мансуровского (в) и Суховязского (г), известняков Араратского (д) и Сары-Ташского (е) месторождений

Из рис. 3 следует подобие характера представленных зависимостей, под которым понимается их качественная характеристика — наличие экстремумов ТАЭ в областях  $(0.15 \div 0.4)\sigma_c$  и  $(0.55 \div 0.95)\sigma_c$ . Также нетрудно заметить, что конкретная механическая нагрузка, при которой фиксируются максимальные значения этих экстремумов, тем больше, чем выше пористость испытываемых горных пород. Отсутствие у зависимостей  $\bar{N}_\Sigma$ , полученных на образцах известняка (рис. 3д, е), экстремума при  $P > 0.95\sigma_c$  объясняется их относительно малой длительной прочностью. Как следствие, при достижении  $\sigma_c$  они практически сразу разрушаются, не оставляя времени для регистрации величины  $\bar{N}_\Sigma$ , тогда как у образцов гранита и мрамора снижение несущей способности, заканчивающееся разрушением, происходило постепенно, в течение времени, достаточного для снятия соответствующих информативных параметров.

Таким образом, зависимости на рис. 3 свидетельствуют о стадийности характера ТАЭ горных пород как функции от значения приложенной нагрузки. Очевидно, что при одновременном термическом и механическом нагружении, в случае нагрева до малых температур, фактором, в наибольшей степени определяющим уровень  $N$ , является механическая нагрузка. Действительно, низкотемпературное воздействие на образец не способно само по себе вызвать в нем значительные деформации [6] и соответственно величина  $N$  только от нагрева будет относительно мала.

В свою очередь механическое воздействие не только нарушает структурные связи в горной породе, но и ослабляет их. Из этого следует, что в ходе нагрева преимущественно разрушаются и становятся источниками ТАЭ структурные связи, ослабленные/подготовленные именно механическим воздействием. Накопление таких связей происходит пропорционально увеличению механической нагрузки, но только в рамках единой стадии напряженно-деформированного состояния. Большая часть накопившегося “запаса” указанных связей при переходе геоматериала в следующую стадию разрушается уже при механическом нагружении и “на долю” термического воздействия практически не остается потенциальных источников АЭ. Затем процесс “накопления” и соответственно роста  $\bar{N}_\Sigma$  повторяется.

Другими словами, в отличие, например, от ультразвукового контроля, где зондирующий сигнал постоянен, в рамках единой серии экспериментов, в случае метода термостимулированной акустической эмиссии, акустическая энергия в рамках каждого эксперимента индивидуальна, так как зависит от степени нарушенности структуры конкретного образца.

Отметим, что не все дефекты могут стать источниками сигналов ТАЭ, но все они влияют на затухание этих сигналов вследствие рассеяния и диссипации упругой энергии. Таким образом, соотношение дефектов, уже ставших источниками АЭ в ходе механического нагружения и переведенных последним в стадию предреализации, т. е. пограничное состояние, когда даже незначительного термического воздействия достаточно для их становления источниками ТАЭ, во многом влияет на значения  $N$  и  $\bar{N}_\Sigma$ . С учетом изложенного рассмотрим далее природу отраженных на рис. 3 закономерностей.

При этом надо понимать, что хотя термонапряжения от нагрева до 90 °С относительно малы, но в случае образцов, находящихся вблизи или непосредственно на границе смежных стадий напряженно-деформированного состояния, этого дополнительного термического напряжения оказывается достаточно для перехода на следующую стадию, что приводит к экстремальным значениям  $\bar{N}_\Sigma$ . В частном случае геоматериала, достигшего стадии предразрушения, такое колебание температур способно привести к полному разрушению объекта контроля. Для проверки выдвинутого предположения о соответствии экстремумов ТАЭ границам стадий напряженно-деформированного состояния, последние, для каждой выборки в отдельности, были определены на основе деформационных измерений по стандартной методике [10] с учетом результатов, полученных в [11]. Соответствующие данные по определению границ стадий деформирования исследованных горных пород приведены в табл. 1.

Качественное соответствие результатов, полученных по традиционной методике [10], основанной на деформационных измерениях при механическом нагружении образцов, и по предлагаемому ТАЭ методу доказывает достоверность и обоснованность последнего.

Из представленных на рис. 3 и в табл. 1 экспериментальных данных следует, что у горных пород, даже различного вещественного состава и генотипа, с ростом пористости происходит увеличение “протяженности” I и III стадий деформирования за счет сокращения II и IV стадий. Это может быть объяснено следующим образом.

ТАБЛИЦА 1. Границы стадий деформирования образцов горных пород различных месторождений в долях  $\sigma_c$ , полученные на основе деформационных измерений (в числителе) и метода ТАЭ (в знаменателе)

Месторождение исследуемой выборки	$\sigma_c$ , МПа	$m$ , %	Стадия деформирования			
			I – начальная (пригрузка)	II – линейно-упругая	III – упруго-пластическая	IV – предразрушения
Кибик-Кордонское (мрамор)	80	$0.7 \pm 0.05$	$\frac{0}{0} \div \frac{0.15}{0.18}$	$\frac{0.15}{0.18} \div \frac{0.35}{0.35}$	$\frac{0.35}{0.35} \div \frac{0.60}{0.66}$	$\frac{0.60}{0.66} \div \frac{1.0}{0.95}$
Коелгинское (мрамор)	58	$1.2 \pm 0.1$	$\frac{0}{0} \div \frac{0.20}{0.22}$	$\frac{0.20}{0.22} \div \frac{0.35}{0.35}$	$\frac{0.35}{0.35} \div \frac{0.70}{0.72}$	$\frac{0.70}{0.72} \div \frac{1.0}{0.93}$
Мансуровское (гранит)	130	$2.2 \pm 0.1$	$\frac{0}{0} \div \frac{0.25}{0.27}$	$\frac{0.25}{0.27} \div \frac{0.35}{0.32}$	$\frac{0.35}{0.32} \div \frac{0.80}{0.81}$	$\frac{0.80}{0.81} \div \frac{1.0}{0.94}$
Суховязское (гранит)	150	$2.7 \pm 0.2$	$\frac{0}{0} \div \frac{0.30}{0.30}$	$\frac{0.30}{0.30} \div \frac{0.40}{0.36}$	$\frac{0.40}{0.36} \div \frac{0.90}{0.88}$	$\frac{0.90}{0.88} \div \frac{1.0}{0.95}$
Арагатское (известняк)	38	$10.2 \pm 0.4$	$\frac{0}{0} \div \frac{0.35}{0.33}$	$\frac{0.35}{0.33} \div \frac{0.50}{0.48}$	$\frac{0.50}{0.48} \div \frac{0.90}{0.91}$	$\frac{0.90}{0.91} \div \frac{1.0}{> 0.91}$
Сары-Ташское (известняк)	52	$14.7 \pm 0.5$	$\frac{0}{0} \div \frac{0.35}{0.38}$	$\frac{0.35}{0.38} \div \frac{0.50}{0.50}$	$\frac{0.50}{0.50} \div \frac{0.90}{0.93}$	$\frac{0.90}{0.93} \div \frac{1.0}{> 0.93}$

На стадии I происходит сжатие минерального скелета и закрытие имеющихся дефектов, которые в рассматриваемом случае представлены в основном порами. Соответственно, чем их больше, тем большая относительная нагрузка требуется для достижения точки максимального уплотнения геоматериала. При этом в результате схлопывания имеющихся малых дефектов затухание сигналов ТАЭ уменьшается, а количество структурных неоднородностей, способных под воздействием температуры стать источниками АЭ при соответствующем уровне механического нагружения, остается практически постоянным.

Для пояснения данной интерпретации ТАЭ процессов на стадии I стоит акцентировать внимание на то, что численные значения прочностных характеристик образца горной породы зависят от свойств его матрицы, а относительные — практически нет. Действительно, если при меньших нагрузках будет достигнут предел длительной прочности, то в свою очередь при пропорционально меньших нагрузках произойдет разрушение образца —  $\sigma_c$ . Следовательно, нормировав эти нагрузки к величине  $\sigma_c$ , можно корректно сопоставить результаты испытаний даже существенно разных по свойствам горных пород. В данном исследовании это необходимо, так как одной из главных его задач являлась проверка справедливости полученных результатов для пород разных генотипов: метаморфических, магматических и осадочных.

Далее, на стадии II (линейных деформаций), под влиянием внешней механической нагрузки исходная дефектность частично восстанавливается за счет раскрытия ранее (на стадии I) схлопнувшихся дефектов. Однако размер последних остается незначительным, что не позволяет им стать источниками значимой ТАЭ. Другими словами, на рассматриваемой стадии происходит рост затухания сигналов ТАЭ без увеличения их количества. В результате наблюдается снижение величины усредненной активности ТАЭ. В свою очередь протяженность стадии определяется тем, что при раскрытии ранее схлопнутых дефектов число последних не сильно влияет на нагрузку, необходимую для их раскрытия. Эта нагрузка скорее определяется прочностными параметрами геоматериала, слагающего образец, а именно его способностью амортизировать нагрузки за счет продолжающегося сжатия минерального скелета. Иначе говоря, при достижении критических напряжений начинается процесс дилатансии, который характеризует предел длительной прочности матрицы геоматериала.

В ходе стадии III (упругопластических деформаций) интенсифицируется процесс формирования новых дефектов. В дополнение к этому при индивидуальной для каждого геоматериала механической нагрузке исходные малые дефекты развиваются до размеров, достаточных для генерации значимой ТАЭ. Весь этот процесс нивелирует явление затухания и приводит к плавному росту усредненной активности ТАЭ. Таким образом происходит образование новых микротрещин и их слияние в макротрещины. Данному процессу препятствуют поры, которые выступают в роли барьеров на пути развития трещин. В результате им требуется больше энергии и соответственно бóльшие нагрузки, чтобы обогнуть поры или пройти непосредственно через них и слиться друг с другом, знаменуя переход в стадию IV (предразрушения).

В рамках стадии IV происходит формирование единой сетки макротрещин, ведущее к значительному возрастанию затухания [12, 13] и снижению числа регистрируемых событий ТАЭ. Данный процесс продолжается вплоть до начала финальной стадии разрушения образца, когда происходит его разделение на структурные элементы. Последнее сопровождается появлением высокоамплитудных событий ТАЭ во всех областях объекта испытания, в том числе и вблизи приемных преобразователей. Это ведет к формированию экстремума ТАЭ, а также сигнализирует об относительно скорой полной потере несущей способности.

Как уже отмечалось, нагрузка, соответствующая разрушению, приведенная в относительных единицах, практически не зависит от различий в свойствах вещества, слагающего матрицу объекта испытания. Можно заключить, что стадия предразрушения начинается тем позднее, чем больше пористость образца, “мешающая” сформироваться единой сетке трещин. Однако, когда сетка сформируется, влияние пор практически нивелируется и уже имеющиеся напряжения в полной мере воспринимаются матрицей геоматериала образца, соответственно сдвиги верхней границы стадии предразрушения не происходит. Это обосновывает экспериментально отмеченное снижение продолжительности стадии предразрушения геоматериала с ростом его пористости.

Бóльшая часть экспериментов, относимых к завершению стадии IV, закончилась разрушением образцов.

Говоря о практической значимости полученных результатов, нужно отметить открываемую ими потенциальную возможность использования метода ТАЭ для контроля действующих в массиве напряжений. Один из вариантов такого контроля предполагает отбор из массива кернов и изготовление из них образцов, аналогичных использованным в настоящей работе. Далее по предложенной методике получают характерную зависимость, схожую с представленными на рис. 3. Затем бурят сетку шпуров, в каждый помещают приемный преобразователь АЭ и на некотором расстоянии от него скважинный нагреватель, выполненный, например, в виде нагреваемого металлического стержня, по диаметру совпадающего со шпуром. Стержень нагревают через определенные интервалы времени, достаточные как для собственно нагрева, так и для его полного естественного остывания. Предполагается, что при стабильном во времени распределении напряжений в массиве в ходе всех циклов нагрева, при прочих равных условиях, уровень ТАЭ будет относительно стабильным. По динамике этого уровня, с учетом результатов испытаний кернов, можно качественно оценить изменения напряженного состояния массива. При переходе последнего в стадию предразрушения (свыше  $0.9\sigma_c$ ) из-за слияния трещин в единую сетку происходит рост затухания и снижение уровня ТАЭ. При достижении нагрузки более  $0.95\sigma_c$  из-за кускования породы, предвещающего ее скорое динамическое разрушение, уровень ТАЭ значительно возрастает. Отмеченный эффект резкого снижения уровня ТАЭ и его последующего значительного роста можно использовать в качестве предвестника опасных динамических явлений в приконтурной области массива.

**ВЫВОДЫ**

Экспериментально установлено наличие взаимосвязи между стадийностью напряженно-деформированного состояния образцов горных пород и характером их ТАЭ. Впервые подтверждена универсальность указанной взаимосвязи для горных пород различных генотипов: метаморфических, магматических и осадочных. Достоверность результатов, полученных по ТАЭ методу, подтверждена их удовлетворительной сходимостью с соответствующими результатами, полученными на основе измерения деформаций ползучести при механическом нагружении образцов.

Предложен и обоснован механизм, объясняющий изменения характера ТАЭ на различных стадиях деформирования образцов горных пород и длительности этих стадий в функции от уровня действующей на них механической нагрузки и их исходной пористости.

С учетом полученных результатов показана потенциальная возможность использования метода ТАЭ для контроля действующих в массиве напряжений и прогноза динамических явлений в его приконтурной области.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А.** О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
2. **Лавров В. В., Шкуратник В. Л.** Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акуст. журн. — 2005. — Т. 51 (Приложение).
3. **Вознесенский А. С., Набатов В. В., Куткин Я. О., Новиков Е. А.** Структурная диагностика горных пород на основе анализа термоакустической эмиссии // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф., посвященной 80-летию акад. М. В. Курлени. Т. 1. — Новосибирск, 2011.
4. **Шкуратник В. Л., Новиков Е. А.** Диагностика структурных нарушений образцов скальных горных пород по параметрам термостимулированной в них акустической эмиссии // XIII междунар. конф. “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле”. — М.: ИГЕМ РАН, 2012.
5. **Баранов В. М., Гриценко А. И. и др.** Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. — М.: Наука, 1998.
6. **Шкуратник В. Л., Новиков Е. А.** О взаимосвязи термостимулированной акустической эмиссии скальных горных пород с их пределом прочности при сжатии // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
7. **Шкуратник В. Л., Новиков Е. А.** О взаимосвязи термостимулированной акустической эмиссии с напряженно-деформированным состоянием геоматериала и переходом его в стадию предразрушения // Труды XX Всерос. конф. с участием иностр. ученых “Геомеханика и напряженное состояние недр Земли.” — Новосибирск, 2013.
8. **ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: Изд-во стандартов, 2001.
9. **ГОСТ 30629-2011.** Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2012.
10. **ГОСТ 28985-91.** Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: Изд-во стандартов, 1991.
11. **Филимонов Ю. Л.** Закономерности акустической эмиссии при деформировании соляных горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГУ, 2002.
12. **Вознесенский А. С., Тавостин М. Н.** Акустическая эмиссия угля в состоянии запредельного деформирования // ФТПРПИ. — 2005. — № 4.
13. **Соболев Г. А., Пономарев А. В., Кольцов А. В., Салов Б. Г., Бабичев О. В., Терентьев В. А., Патонин А. В., Мострюков А. О.** Возбуждение акустической эмиссии упругими импульсами // Физика Земли. — 2001. — № 1.

*Поступила в редакцию 2/III 2014*