

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

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ  
ОБРАЗЦОВ ИЗВЕСТНЯКА ПРИ ИХ ЗАМОРАЖИВАНИИ  
И ОТТАИВАНИИ В ФУНКЦИИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ  
СТАТИЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ  
И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ\***

Приведены результаты экспериментальных исследований стимулированной замораживанием и оттаиванием акустической эмиссии в статически нагруженных образцах известняков, как при влиянии на них обводненности, так и без него. Подтверждена пригодность таких исследований для оценки напряженно-деформированного состояния геоматериала. Установлено, что отмечавшиеся при локальном нагревании образцов каменной соли особенности акустической эмиссии, позволяющие прогнозировать разрушение этого геоматериала в массиве, справедливы и для замораживаемых известняков. Обнаружена характерная для образцов последних особенность частотно-температурной характеристики, принципиально пригодная для использования в качестве индикатора интенсивности дефектообразования.

Ключевые слова: Криотермическое воздействие, акустическая эмиссия, каменная соль, известняк, эксперимент, напряженно-деформированное состояние, интенсивное трещинообразование, предел длительной прочности, обводненность.

**Введение**

**Д**о настоящего времени исследования, направленные на развитие метода термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ), проводились преимущественно в температурной области свыше 0 °С. Эти исследования показали, что указанный метод позволяет оценивать физико-механические свойства, степень поврежденности и напряженно-деформированное состояние горных пород различных генотипов [1, 2, 3]. Кроме того, установлено, что информативные параметры ТАЭ чувствительны к размеру минерального зерна геоматериалов и другим особенностям их структуры [4, 5].

Однако интерес представляют также акустико-эмиссионные исследования в области криогенных температур,

а также при изменении последних от отрицательных к положительным значениям. В частности большое практическое значение имеет задача контроля процесса морозного выветривания геоматериалов под действием замерзающей воды. Эта задача, несмотря на многочисленные посвященные ее работы [6, 7, 8], все еще остается актуальной. Исходя из пригодности метода ТАЭ для комплексной оценки горных пород, следует его потенциальная применимость к решению указанной задачи.

Настоящую работу следует рассматривать как первый шаг к адаптации метода ТАЭ для контроля криологических процессов в горных породах. С этой целью проведена экспериментальная проверка справедливости полученных при нагреве горных пород

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 13-05-00168.

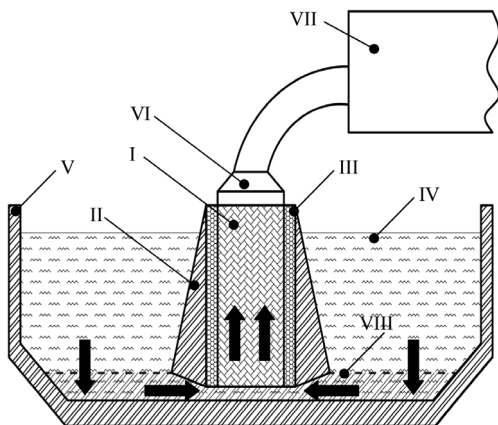
закономерностей ТАЭ для случая замораживания и последующего оттаивания водонасыщенного геоматериала, находящегося под действием статической механической нагрузки.

### Постановка экспериментов

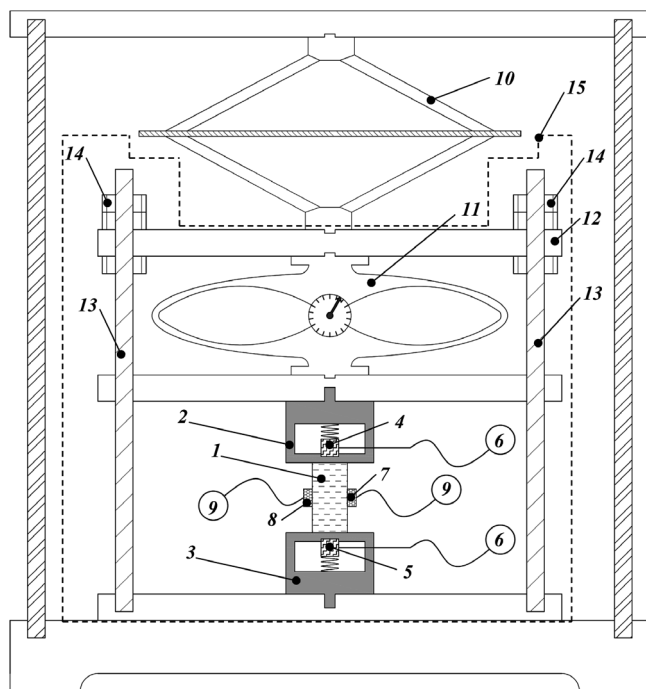
Объектом исследований являлись образцы известняка Грушевского месторождения (26 образцов), изготовленные из одного и того же куска

(плиты) породы в виде параллелепипедов размерами 25×25×50 мм. Каждый из этих образцов прошел визуально-измерительный контроль на отсутствие трещиновидных дефектов. С целью определения предела прочности при сжатии данного геоматериала 6 образцов были испытаны по стандартной методике. Для моделирования влияния на характер криостимулированной акустической эмиссии такого фактора как обводненность объекта контроля, перед акустико-эмиссионными испытаниями с помощью показанного на рис. 1 устройства половина образцов насыщалась водой до прироста массы в размере 25–30% от изначальной. Естественное влагосодержание образцов составляло порядка 4–5%. Оно было определено путем сравнения их массы до и после выдержки при 100 °С в течение 6 ч, проведенной по окончании акустоэмиссионных испытаний. Процесс водонасыщения осуществлялся следующим образом.

Образец I помещался в фиксатор II, оборудованный прижимной резиновой прокладкой III. К торцевой поверхности образца, расположенной выше уровня воды IV в пластиковой емкости V присоединялся рабочий орган VI вакуумного



**Рис. 1. Схема устройства для насыщения образцов водой**



**Рис. 2. Схема лабораторной установки для криотермических испытаний образцов горных пород, с функцией их одновременного статического механического нагружения**

насоса VII прокачивавшего жидкость через перфорированную трубку VIII и далее через весь объем образца. Так были получены две группы образцов влагонасыщенные и условно «сухие».

Акустико-эмиссионные испытания всех образцов вне зависимости от степени их водонасыщения были проведены с помощью лабораторной установки, представленной на рис. 2.

Работа на данной лабораторной установке велась по нижеприведенному алгоритму.

1. Образец 1 помещался между металлическими стаканами 2 и 3, содержащими приемные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) 4 и 5, сигналы с выхода которых передавались на акустико-эмиссионную измерительную систему 6 А-Line 32D.

2. На боковых взаимно противоположных сторонах образца устанавливались нагревательные элементы 7 и 8, температура которых задавалась величиной подаваемого на них электрического напряжения, регулируемого с помощью лабораторного автотрансформатора 9.

3. Посредством ромбовидного домкрата 10 образцу сообщалась нагрузка, величина которой контролировалась с помощью динамометра 11.

4. Положение плиты 12 фиксировалось по высоте направляющих стержней 13 с помощью стопорных гаек 14 (контргаяк). Это позволяло сохранить созданную на образце нагрузку после ее снятия с домкрата.

5. Съемный модуль 15 вынимался из установки и помещался в морозильную камеру (на схеме условно не показана).

6. Производилось термическое воздействие на образец, находящийся в съемном модуле: охлаждение от  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и отогрев с помощью тепловых источников 7 и 8 до не менее, чем  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В ходе этого воздействия регистрировались параметры акустической эмиссии. С помощью предварительно помещенного в морозильную камеру цифрового термометра типа МР707, синхронно записывалась термометрическая информация.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Характерный вид полученных акустограмм показан на рис. 3. Обнаружено, что у всех образцов при охлаждении до примерно  $-15\div-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается экстремум активности  $\dot{N}_{\Sigma}$  ТАЭ. При этом максимальный уровень  $\dot{N}_{\Sigma}$  тем больше, чем выше изна-

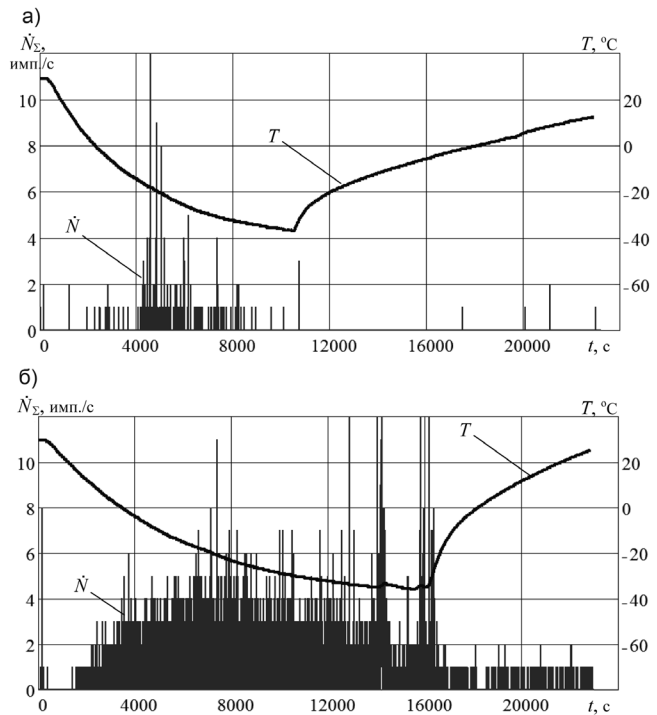
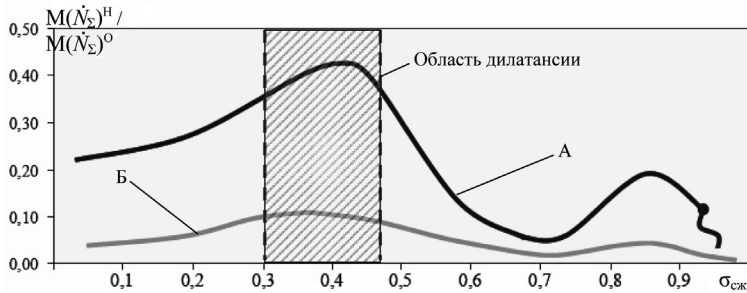


Рис. 3. Характерные экспериментальные зависимости активности  $\dot{N}_{\Sigma}$  и температуры  $T$  сухого (а) и влагонасыщенного (б) образцов известняка

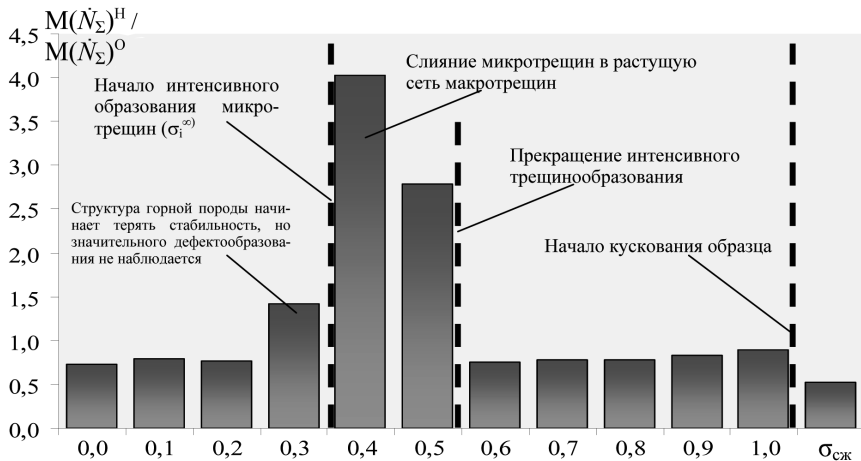


**Рис. 4.** Зависимость  $M(\dot{N}_\Sigma)^H$  к  $M(\dot{N}_\Sigma)^O$  от приложенной к обводненным (А) и «сухим» (Б) образцам механической нагрузки, выраженной в долях  $\sigma_{сж}$

чальное содержание влаги в образце. В случае «сухих» образцов речь идет о естественной химически связанной влаге. Рост  $\dot{N}_\Sigma$  в температурной области до  $-15^\circ\text{C}$  и спад в интервале от  $-25^\circ\text{C}$  до  $-35^\circ\text{C}$  пропорционален интенсивности дефектообразования в матрице горной породы, вызванного переходом содержащейся в ней воды в твердую фазу. Относительно низкий уровень  $\dot{N}_\Sigma$  при оттаивании известняка связан со снижением мощности деструктивных явлений на этой стадии, т.к. при переходе воды в жидкую фазу ее объем уменьшается и матрица геоматериала не испытывает распорных напряжений. Некоторый уровень

ТАЭ на рассматриваемой стадии в основном вызван перетоками воды по трещинно-поровому пространству образцов.

Для систематизации и численного рассмотрения содержащейся на акустограммах информации произведен расчет средней активности АЭ за время нагрева и остывания, соответственно  $M(\dot{N}_\Sigma)^H$  и  $M(\dot{N}_\Sigma)^O$ . Зависимость величины отношения  $M(\dot{N}_\Sigma)^H / M(\dot{N}_\Sigma)^O$  от нагрузки, на которой были получены соответствующие значения  $M(\dot{N}_\Sigma)$  приведена на рис. 4. Для сравнения на рис. 5 представлена полученная в [9] аналогичная зависимость для каменных солей, образцы которых, нахо-



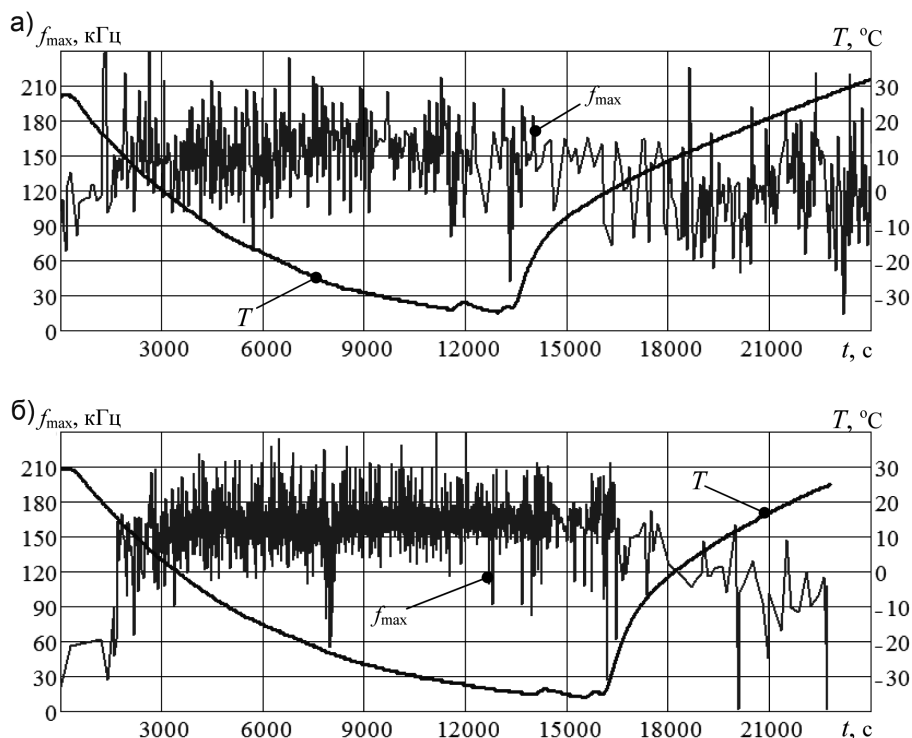
**Рис. 5.** Зависимость  $M(\dot{N}_\Sigma)^H$  к  $M(\dot{N}_\Sigma)^O$  от выраженной в долях  $\sigma_{сж}$  механической нагрузки, приложенной к образцам каменной соли Верхнекамского месторождения в ходе их нагрева

дившиеся под действием статической механической нагрузки, для возбуждения АЭ нагревались до  $T = 130 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью порядка  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ .

Из высокой сходимости характера приведенных на рис. 4 и 5 зависимостей следует, что параметры стимулированной нагревом и криотермическим воздействием акустической эмиссии имеют примерно одинаковую чувствительность к изменениям напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород и равнозначны для ее оценки. В тоже время в работах [1–5, 9] показана пригодность метода высокотемпературной акустической эмиссии для определения параметров структуры, свойств и состояния геоматериалов различных генотипов. Таким образом, ТАЭ можно рассматривать как эффективный инструмент для изучения протекания любых криологических про-

цессов, так или иначе затрагивающих указанные параметры. При этом, если все образцы характеризуются примерно одинаковым влажосодержанием, оно не является помеховым фактором, а играет роль катализатора, упрощающего выявление этих процессов.

Кроме абсолютных показателей ТАЭ рассмотрены распределения максимальных частот  $f_{\text{max}}$  АЭ сигналов (импульсов), зарегистрированных в определенный момент времени  $t$ , в функции от температуры  $T$  образца. Характерный вид этих распределений показан на рис. 6. Из которого следует, что при нагрузках ниже уровня начала дилатансии, в ходе охлаждения геоматериала частоты возникающих в нем АЭ сигналов в среднем выше, чем при последующем отогреве. Это показывает, что дефектообразование идет только при охлаждении горной породы



**Рис. 6. Частотно-температурная характеристика образцов известняка, нагруженных вплоть до уровня начала дилатансии (а) и ниже него (б)**

и вызвано распорными напряжениями, возникающими в ней при превращении воды в лед. При оттаивании такие напряжения спадают, другие значимые механизмы дефектообразования при нагреве вплоть до 60 °С отсутствуют [2], поэтому происходит наблюдаемое снижение частотной характеристики. В свою очередь, равномерность частотно-температурной характеристики у образцов, нагруженных до уровня начала дилатансии, обосновывается характерной для этой стадии НДС интенсификацией деструктивных процессов, идущих как при нагреве, так и при остывании образца.

Таким образом, наблюдая за динамикой  $f_{max}$  во времени, можно судить о текущем приросте дефектов в объекте контроля.

### Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что чувствительность параметров акустической эмиссии, стимулированной криотермическим воздействием, к изменениям напряженно-деформированного состояния геоматериала сопоставима с аналогичным показателем у акустико-эмиссионных ис-

следований в высокотемпературной области.

2. Полученные ранее при температурах выше 0 °С функциональные зависимости параметров акустической эмиссии горных пород от их напряженно-деформированного состояния, позволяющие охарактеризовать стабильность последнего и выявить нагрузку начала дилатансии, полностью справедливы для случая работы в отрицательном ( $T < 0$  °С) температурном диапазоне.

3. Обводненность горной породы в случае исследования ее напряженно-деформированного состояния методом криостимулированной акустической эмиссии не является помеховым фактором, а наоборот повышает четкость определения НДС.

4. При интенсификации дефектообразования в замораживаемой горной породе наблюдается пропорциональное возрастание максимальных частот происходящих при этом акустико-эмиссионных событий. Это явление принципиально может быть использовано в качестве индикатора степени развития деструктивных процессов в объекте контроля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shkuratnik V.L., Novikov E.A., Oshkin R.O. Experimental analysis of thermally stimulated acoustic emission in various-genotype rock specimens under uniaxial compression // Journal of Mining Science March, 2014, Volume 50, Issue 2, pp 249–255.

2. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. Correlation of thermally induced acoustic emission and ultimate compression strength in hard rocks // Journal of Mining Science July 2012, Volume 48, Issue 4, pp. 629–635.

3. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А. Диагностика структурных нарушений образцов скальных геоматериалов по параметрам термостимулированной в них акустической эмиссии / 13-ая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», материалы конференции. – М.: ИГЕМ РАН, 2012. – С. 291–294.

4. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials // Journal of Mining Science. January 2012, Volume 48, Issue 1, pp. 9–14.

5. Вознесенский А.С., Набатов В.В., Куркин Я.О., Новиков Е.А. Структурная диагностика горных пород на основе анализа термоакустической эмиссии / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды Всероссийской конференции, посвященной 80-летию академика М.В. Курлени, т. 1. – Новосибирск, 2011. – С. 299–304.

6. Воронков О.К., Ушакова Л.Ф. Влияние физического выветривания на состояние и свойства горных пород. – СПб.: изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2007.

7. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: изд-во МГУ, 2002.

8. Познанин В.Л. Эрозионные процессы в криолитозоне // *Пространство и время*. – 2012. – № 1(7).

9. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А. Численная оценка предела длительной прочно-

сти статически напряженной каменной соли методом термостимулированной акустической эмиссии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2014. – № 8. – С. 192–197. **ПАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

Шкуратник Владимир Лазаревич – доктор технических наук, профессор,

Новиков Евгений Александрович – доцент,

Ошкин Р.О. – студент,

НИТУ «МИСиС», e-mail: ftkp@mail.ru.

---

UDC (534.6+53.082.4):551.34

## **REGULARITIES OF ACOUSTIC EMISSION IN LIMESTONE SAMPLES DURING THEIR FREEZING AND THAWING AS A FUNCTION OF THE STATIC MECHANICAL LOADING AND MOISTURE CONTENT**

Shkuratnik V.L.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Novikov E.A.<sup>1</sup>, Assistant Professor,

Oshkin R.O.<sup>1</sup>, Student,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: ftkp@mail.ru.

---

*Are given the results of the experimental study of acoustic emission in statically mechanically loaded samples of limestone during their freezing and thawing in dependence on moisture content. Confirmed that such sort of studies is appropriate for geomaterial stress-strain state assessment. Established that previously noted in locally heated rock salt samples acoustic emission characteristics, which can be used for prediction of this geomaterial destruction, are also valid for acoustic emission from frozen limestone. In addition this paper describes experimentally found feature of the acoustic emission signals frequency-temperature characteristic, which principally suitable as an indicator of defects formation intensity.*

*Key words: cryothermal exposure, acoustic emission, rock salt, limestone, experiment, stress-strain state, intense fracturing, limit long-term strength, moisture content.*

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

The work is executed at financial support of RFBR, grant no 13-05-00168.

## **REFERENCES**

1. Shkuratnik V.L., Novikov E.A., Oshkin R.O. Experimental analysis of thermally stimulated acoustic emission in various-genotype rock specimens under uniaxial compression. *Journal of Mining Science March*. 2014, Volume 50, Issue 2, pp 249–255.

2. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. Correlation of thermally induced acoustic emission and ultimate compression strength in hard rocks. *Journal of Mining Science*. July 2012, Volume 48, Issue 4, pp. 629–635.

3. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. *13-aya mezhdunarodnaya konferentsiya «Fiziko-khimicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v nauках o Zemle», materialy konferentsii* (Proceedings of XIII International Conference on Physicochemical and Petrophysical Research in the Sciences on Earth), Moscow, IGM RAN, 2012, pp. 291–294.

4. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. Physical modeling of the grain size influence on acoustic emission in the heated geomaterials. *Journal of Mining Science*. January 2012, Volume 48, Issue 1, pp. 9–14.

5. Voznesenskii A.S., Nabatov V.V., Kutkin Ya.O., Novikov E.A. *Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli. Trudy Vserossiiskoi konferentsii, posvyashchennoi 80-letiyu akademika M.V. Kurleni*, т. 1 (Proceeding of All-Russian Conference on Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior devoted to the 80th Anniversary of Academician M.V. Kurlenya, vol. 1), Novosibirsk, 2011, pp. 299–304.

6. Voronkov O.K., Ushakova L.F. *Vliyanie fizicheskogo vyvetrivaniya na sostoyanie i svoystva gornykh porod* (Influence of physical weathering on state and properties of rocks), Saint-Petersburg, izd-vo OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2007.

7. Ershov E.D. *Obshchaya geokriologiya* (General geocryology), Moscow, izd-vo MGU, 2002.

8. Poznanin V.L. *Prostranstvo i vremya*. 2012, no 1(7).

9. Shkuratnik V.L., Novikov E.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 8, pp. 192–197.