

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2020.3.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Н.Л. Бельтюков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассмотрен перспективный метод оценки степени нарушенности материалов при нагружении по изменению параметров импульсов акустической эмиссии. Проведены исследования по апробации метода применительно к соляным породам. В условиях одноосного сжатия образца установлено изменение параметров импульсов в зависимости от величины действующей нагрузки. Показано, что данное явление связано с особенностями механизма разрушения соляных пород.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, соляные породы, разрушение, трещины, параметры импульсов, механизм трещинообразования, растяжение, сдвиг, одноосное сжатие.

Контроль состояния нагруженных элементов камерной системы разработки является важной задачей обеспечения безопасных условий ведения горных работ, особенно на месторождениях водорастворимых руд, где разрушение таких элементов может привести к затоплению рудника. Данная задача на Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) в основном решается инструментальными наблюдениями за деформированием выработок [1]. Значительная сложность и трудоемкость работ при организации наблюдений накладывают ограничения на развертывание сети из подземных наблюдательных станций с большой площадью покрытия шахтного поля. Это обуславливает развитие альтернативных способов контроля, среди которых наиболее перспективным представляется метод акустической эмиссии (АЭ). Метод основан на регистрации в массиве упругих волн, возникающих при деформировании и разрушении пород вследствие перераспределения напряжений, вызванного ведением горных работ [2]. Несмотря на успешные примеры использования метода при контроле подземных сооружений в массиве соляных пород [3, 4] поиск надежных АЭ-критериев их устойчивого состояния остается актуальным вопросом. В качестве таких критериев могут выступать особенности изменения параметров импульсов АЭ при разрушении соляных пород.

В процессе нагружения горных пород наиболее существенными источниками акустической эмиссии считаются: рост или закрытие трещин; скольжение по поверхностям существующих в породе трещин, нарушений, границам зерен; схлопывание пор и др. Типичная осциллограмма импульса АЭ представлена на рис. 1. Выделяют следующие основные параметры импульса: A_{max} – максимальная амплитуда; $T_{дл}$ – длительность импульса; $T_{нар}$ – время нарастания (время, прошедшее с момента первого пересечения сигналом порога регистрации до прихода максимальной амплитуды сигнала); $N_{выбр}$ – количество выбросов (количество пересечений сигналом порога за время $T_{дл}$) [5].

По результатам экспериментальных исследований [6-8] установлена явная зависимость от степени поврежденности материала таких производных параметров импульсов, как средняя частота импульса (F_{avg}) и RA -параметр, которые определяются через основные по следующим соотношениям:

$$F_{avg} = \frac{N_{выбр}}{T_{дл}}; \quad RA = \frac{T_{нар}}{A_{max}}$$

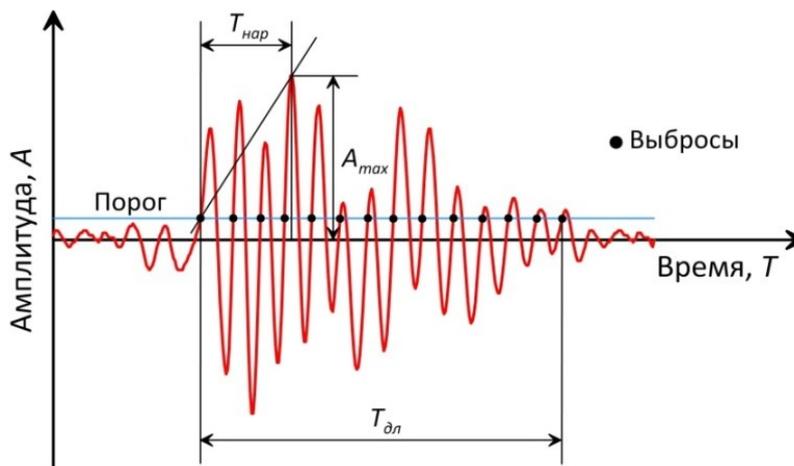


Рис. 1. Осциллограмма импульса АЭ и определяемые параметры

Данная закономерность объясняется следующей моделью разрушения многих материалов, которая также справедлива и для соляных пород. В условиях одноосного или трехосного осесимметричного нагружения на начальном этапе по всему объему образца возникают трещины растяжения (рис. 2). С последующим увеличением нагрузки происходит слияние трещин растяжения в протяженные магистральные трещины сдвига, которые приводят к потере устойчивости и в конечном итоге разрушению образца [9]. При этом импульсы АЭ от трещин растяжения характеризуются высокой частотой и низким значением RA-параметра, а трещинам сдвига присущи более низкочастотные импульсы с высоким RA-параметром (рис. 3). Тогда наблюдая за изменением АЭ-параметров в процессе нагружения материала можно не только определить тип активных в данный момент трещин, но и оценить степень его поврежденности [5].

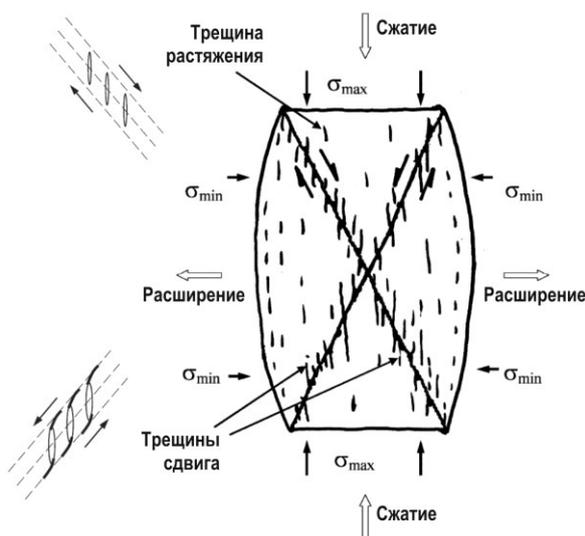


Рис. 2. Модель разрушения соляных пород в общем случае [9]

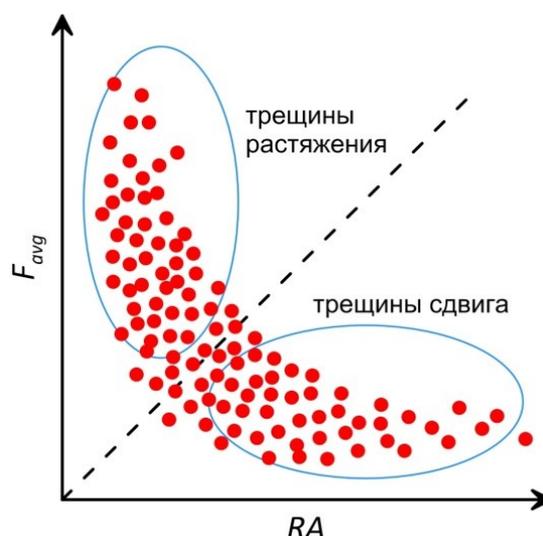


Рис. 3. Характерная корреляционная зависимость средней частоты импульсов от RA-параметра

Выполненные ранее исследования показали существование данной закономерности для образцов соляных пород в режимах условно мгновенного одноосного нагружения [10] и ползучести (при длительном воздействии нагрузки постоянной величины) [11]. С достижением нагрузкой предела прочности образца или с переходом в стадию прогрессирующей ползучести отмечается понижение частоты импульсов акустической эмис-

сии и увеличение значений RA -параметра. Однако сама по себе установленная закономерность еще не говорит о том, что ее причина обусловлена механикой процесса разрушения соляных пород при одноосном сжатии. Поэтому с целью определения параметров импульсов АЭ, которые присущи трещинам растяжения и сдвига в соляных породах, были проведены лабораторные испытания образцов в режимах, реализующих единственно растягивающие или сдвиговые деформации.

Испытания на растяжение соляных пород проводились бразильским методом на цилиндрических образцах (рис. 4, а) диаметром 55 мм и высотой 60 мм, на сдвиг – в косых матрицах на кубических образцах размером 45x45x45 мм (рис. 4, б), испытания на одноосное сжатие выполнялись на призматических образцах размером 100x50x50 мм (рис. 4, в). Необходимо отметить, что реализация чистого сдвига породы является сложной задачей. В связи с этим были пропилены по две щели с противоположных сторон образца для концентрации касательных напряжений на формируемой плоскости сдвига. Регистрация импульсов АЭ осуществлялась с помощью регистрирующей аппаратуры AMSY-6 и двух преобразователей с диапазоном рабочих частот 100-500 кГц (АЕ144А) и 450-1150 кГц (АЕ105А).

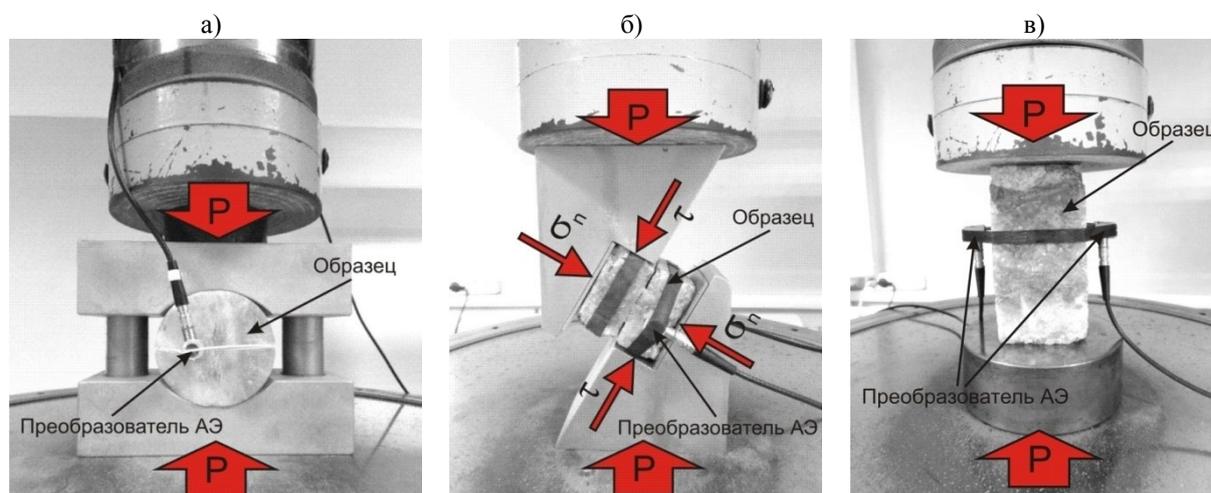


Рис. 4. Методика выполнения испытаний образцов соляных пород:
 а – на растяжение бразильским методом;
 б – на сдвиг в косых матрицах;
 в – на одноосное сжатие

Обработка результатов экспериментов заключалась в построении трехмерных призмogramм распределения [12] количества импульсов, зарегистрированных в процессе испытания, в зависимости от сочетания значений их параметров F_{avg} и RA . Суть такого подхода заключается в разбиении координатной плоскости " $F_{avg}-RA$ " прямоугольной сеткой, каждый квадрат которой является основанием призмы, а ее высота соответствует количеству импульсов, попавших в квадрат. Шаг интервалов (размер квадрата) по оси RA составлял 20 мс/В, по оси F_{avg} – 60 кГц. Для удобства призмogramмы были представлены не в трехмерном виде, а двухмерной поверхностью в координатах " $F_{avg}-RA$ ", где высота призмы отображается цветовым оттенком.

Примеры результатов испытаний образцов соляных пород на растяжение и сдвиг представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно. Анализ призмogramм распределения импульсов АЭ, зарегистрированных преобразователем АЕ144А, показал, что положение максимума количества импульсов одинаково при испытаниях соляных пород на растяжение (рис. 5, а) и сдвиг (рис. 6, а). Однако во втором случае форма призмogramмы более вытянута вдоль оси RA , что говорит о значительной доле содержания импульсов с высокими значениями данного параметра.

Призмограммы распределения импульсов, принятых преобразователем AE105A, сильнее растянуты в направлении оси F_{avg} при двух режимах испытаний, что связано скорее всего с более широким частотным диапазоном регистрации по сравнению с преобразователем AE144A. В случае растяжения большинство импульсов имеют значение RA -параметра менее 20 мс/В и почти равномерно распределены по средней частоте в интервале от 60 до 540 кГц (рис. 5, б). В отличие от этого, в процессе испытаний соляных пород на сдвиг наблюдается концентрация большого количества импульсов в более низкочастотном интервале 120-180 кГц. Также значительно расширяется диапазон изменения RA -параметра: с 0-180 мс/В при растяжении до 0-360 мс/В при сдвиге, подобно призмограммам распределения импульсов, зарегистрированных преобразователем AE144A.

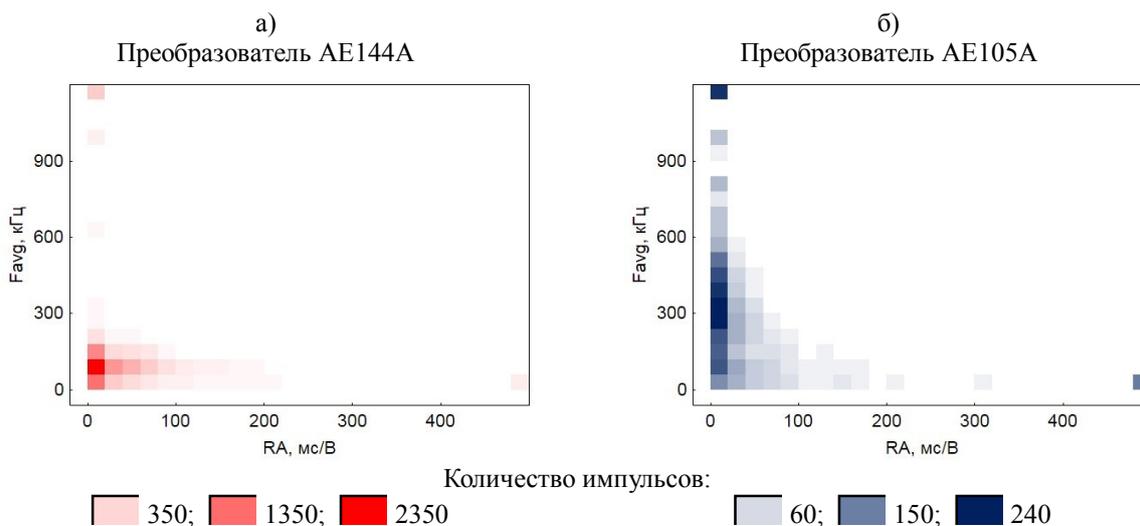


Рис. 5. Призмограммы распределения импульсов АЭ, зарегистрированных в процессе испытания образца соляной породы на растяжение преобразователем:
a – AE144A; *б* – AE105A

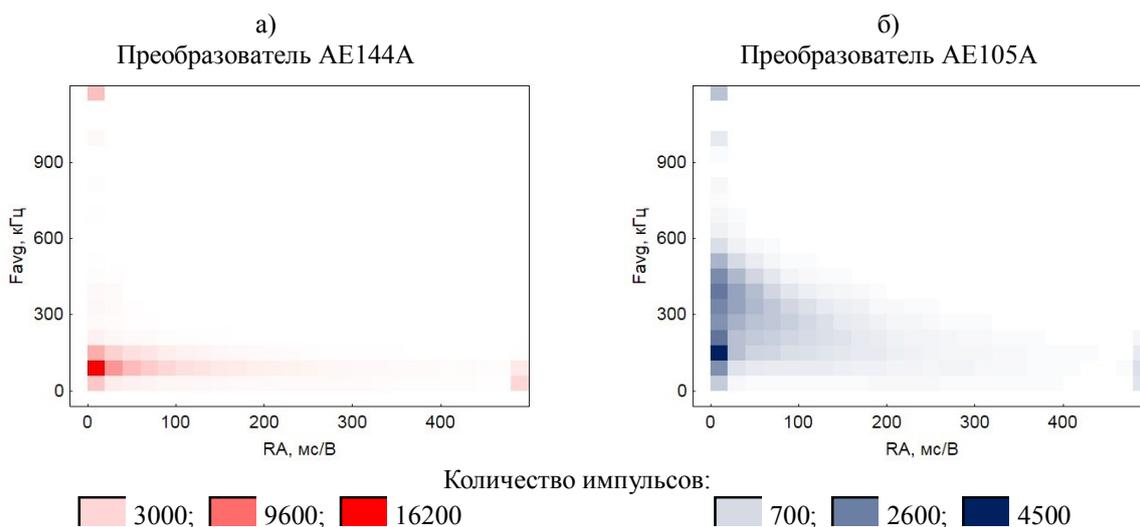


Рис. 6. Призмограммы распределения импульсов АЭ, зарегистрированных в процессе испытания образца соляной породы на сдвиг преобразователем:
a – AE144A; *б* – AE105A

Выявленное отличие в характере распределения импульсов АЭ, зарегистрированных в процессе испытаний соляных пород на растяжение и сдвиг, подтверждает предполо-

жение, что импульсы от трещин разной моды [13] имеют различные параметры. Трещинам растяжения (мода I) свойственны более высокая средняя частота и пониженные значения RA -параметра, а трещины сдвига (мода II) характеризуются относительно низкой частотой и повышенным RA -параметром.

Далее были выполнены испытания соляных пород на одноосное сжатие, пример результатов которых представлен на рис. 7. С целью изучения характера преобразования призмограмм распределения в зависимости от уровня действующей на образец нагрузки их построение выполнялось по последовательным выборкам импульсов равного объема на стадиях нагружения: 1) $0 < \sigma < 0,6\sigma_{np}$; 2) $0,6\sigma_{np} < \sigma < 0,9\sigma_{np}$; 3) $0,9\sigma_{np} < \sigma < \sigma_{np}$. Как и в случаях испытаний соляных пород на растяжение и сдвиг, преобразователь АЕ144А оказался почти не чувствителен к изменению средней частоты импульсов. Поэтому с увеличением нагрузки на образец трансформация призмограммы, полученной с помощью данного преобразователя (рис. 7, а), заключается только в растягивании вдоль оси RA при неизменном положении максимума плотности распределения.

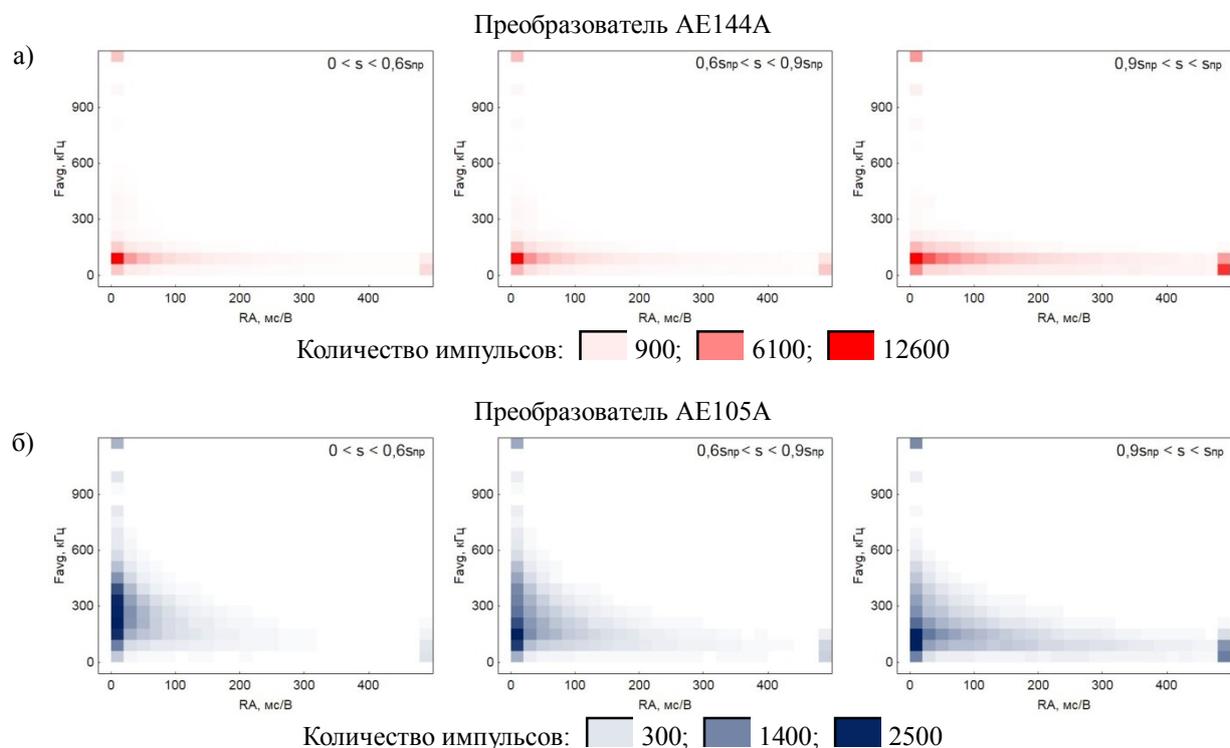


Рис. 7. Призмограммы распределения импульсов АЭ, зарегистрированных в процессе испытания образца соляной породы на одноосное сжатие преобразователем:
а – АЕ144А; б – АЕ105А

Призмограмма распределения импульсов, зарегистрированных преобразователем АЕ105А (рис. 7, б), на начальной стадии нагружения при $0 < \sigma < 0,6\sigma_{np}$ имеет высокую плотность в широком частотном диапазоне 60–420 кГц и значениях RA менее 20 мс/В. Как показывают испытания на растяжение соляных пород, данные параметры характерны для трещин растяжения (рис. 5, б). С повышением уровня напряжений возрастает доля импульсов, обладающих пониженным значением F_{avg} и высоким RA -параметром. Это приводит к смещению максимума плотности распределения в более низкочастотную область 60–180 кГц и растягиванию призмограммы вдоль оси RA . В результате призмограмма принимает форму, близкую к той, что была получена при испытаниях соляных пород на сдвиг (рис. 6, б). Следовательно, источником импульсов с такими значениями параметров можно считать трещины сдвига.

Таким образом, выполненные исследования подтверждают предложенный механизм разрушения соляных пород в условиях одноосного (или трехосного осесимметричного) сжатия, согласно которому рост трещин сдвига говорит о значительной степени нарушенности образца. В свою очередь было показано, что начало активизации данного типа трещин можно определить благодаря наблюдению за изменением параметров импульсов АЭ, возникающих в процессе деформирования соляных пород. Простота концепции, относительно низкие стоимость и трудоемкость реализации обуславливают перспективность такого подхода при контроле состояния нагруженных элементов камерной системы разработки калийных месторождений. Однако на текущий момент считать разработку метода завершённой пока нельзя, т.к. не выработан однозначный критерий начала образования трещин сдвига, являющихся предвестниками разрушения соляных пород. Даже если такой критерий будет установлен лабораторными исследованиями, то возникает вопрос о его применимости в натуральных условиях, где другие объёмы деформирования пород и частотные диапазоны регистрации акустических импульсов. К тому же, как показали эксперименты, результаты статистического анализа параметров импульсов АЭ сильно зависят от характеристик используемого преобразователя. В связи с этим полученные на текущем этапе выводы являются предварительными, а рассматриваемая тема требует проведения дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 105-107.
2. Петухов И.М., Смирнов В.А., Винокур Б.Ш., Дальнов А.С. Геофизические исследования горных ударов. – М.: Недра, 1975. – 134 с.
3. Becker D., Cailleau B., Kaiser D., Dahm T. Macroscopic Failure Processes at Mines Revealed by Acoustic Emission (AE) Monitoring // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2014. – V. 104, № 4. – P. 1785-1801.
4. Hesser J., Kaiser D., Schmitz H., Spies T. Measurements of Acoustic Emission and Deformation in a Repository of Nuclear Waste in Salt Rock // Engineering Geology for Society and Territory. – Springer, 2015. – V. 6. – P. 551-554.
5. Ohtsu M. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete // Materials and Structures. – Springer, 2010. – V. 43. – P. 1187-1189.
6. Ohno K., Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission // Construction and Building Materials. – 2010. – V. 24. – P. 2339-2346.
7. Omondi B., Aggelis D., Sol H., Sitters C. Acoustic Emission Behaviour of Prestressed Concrete Sleepers Under Quasi-Static Homologation Testing // 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), September 3-5, 2014. – Dresden, 2014. – P. 1-9.
8. Wang H., Liu D., Cui Z., Cheng C., Jian Z. Investigation of the fracture modes of red sandstone using XFEM and acoustic emissions // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2016. – V. 85. – P. 283-293.
9. Herget G. Stresses in Rock. – Rotterdam/Brookfield: A.A. Balkema, 1988. – 179 p.
10. Бельтюков Н.Л., Гурко В.А. Особенности изменения акустоэмиссионных параметров при деформировании образцов соляных пород // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 122-125.
11. Бельтюков Н.Л. Исследование параметров акустической эмиссии при испытании соляных пород в режиме ползучести // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 131-134.
12. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1971. – 576 с.
13. Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. – Springer, 2010. – 322 p.