

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2023.3.7

ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЭЛЕМЕНТАХ КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ КАЛИЙНОГО РУДНИКА

Н.Л. Бельтюков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье представлены результаты натурных исследований по регистрации акустической эмиссии в элементах камерной системы разработки калийного рудника. Установлены особенности распределения параметров акустической эмиссии по сечению целиков и характер их изменения во времени. В результате анализа полученных закономерностей сделан вывод о состоянии целиков.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, калийный рудник, деформация, целики, параметры импульсов, контроль состояния.

Безопасное ведение горных работ и защита рудников от затопления при освоении калийных месторождений напрямую зависят от устойчивости элементов камерной системы разработки – прежде всего целиков различного назначения, поддерживающих налегающую водозащитную толщу пород. Поэтому актуальной задачей остается разработка методов контроля состояния данных элементов, среди которых стоит выделить метод акустической эмиссии (АЭ). В основе метода лежит явление излучения объектом контроля акустических волн в процессе пластической деформации и роста трещин под воздействием нагрузки [1]. Механизм образования акустической эмиссии аналогичен механизмам, ответственным за (микро-) сейсмические явления. Однако, в отличие от последних, метод АЭ имеет дело с более высокочастотными и низкоэнергетическими событиями. Например, на сегодняшний день в горных породах регистрация упругих волн осуществляется в диапазонах от 1 до 200 кГц при натурных исследованиях и от 100 кГц до нескольких мегагерц при лабораторных исследованиях [2]. Кроме того, в результате развития АЭ-аппаратуры в последние десятилетия чувствительность метода достигла высокого уровня по сравнению с другими методами. Так, в производственных условиях метод АЭ позволяет выявить приращение трещины порядка десятых долей миллиметра, что невозможно обеспечить ни одним из традиционных методов неразрушающего контроля [1]. Вследствие перечисленных особенностей ожидается, что применительно к поставленной задаче метод АЭ позволит определять начало процесса разрушения и потери устойчивости элементами системы разработки на ранних стадиях. В связи с этим с целью разработки метода контроля состояния элементов камерной системы разработки на основе явления акустической эмиссии в условиях одного из калийных рудников России были проведены натурные эксперименты по изучению характера проявления АЭ в целиках различного назначения.

Рудник разрабатывает сильвинитовый пласт мощностью от 2 до 20 м на глубине 1100-1300 м камерной системой с оставлением барьерных и междукамерных целиков (рис. 1). Регистрация акустической эмиссии выполнялась с помощью АЭ-преобразователя с частотным диапазоном 30-100 кГц, размещаемого в горизонтальных скважинах, пробуренных в целиках (рис. 2). Для обеспечения контакта преобразователя со стенкой скважины было разработано специальное прижимное устройство, основным элементом которого является мини-пневмоцилиндр. Давление в пневмоцилиндр нагнеталось с помощью ручного насоса. На каждой точке

наблюдения запись АЭ-импульсов выполнялась портативным регистратором в течение нескольких минут, после чего прижимное устройство перемещалось на следующую точку с шагом 0,3 м.

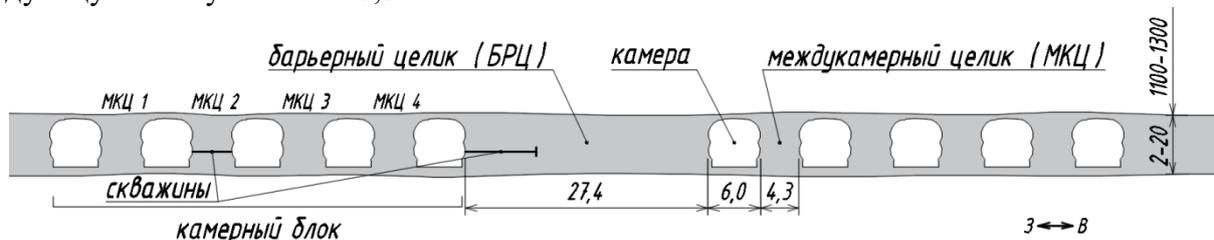


Рис. 1. Схема разработки сильвинитового пласта с оставлением барьерных и междуканальных целик

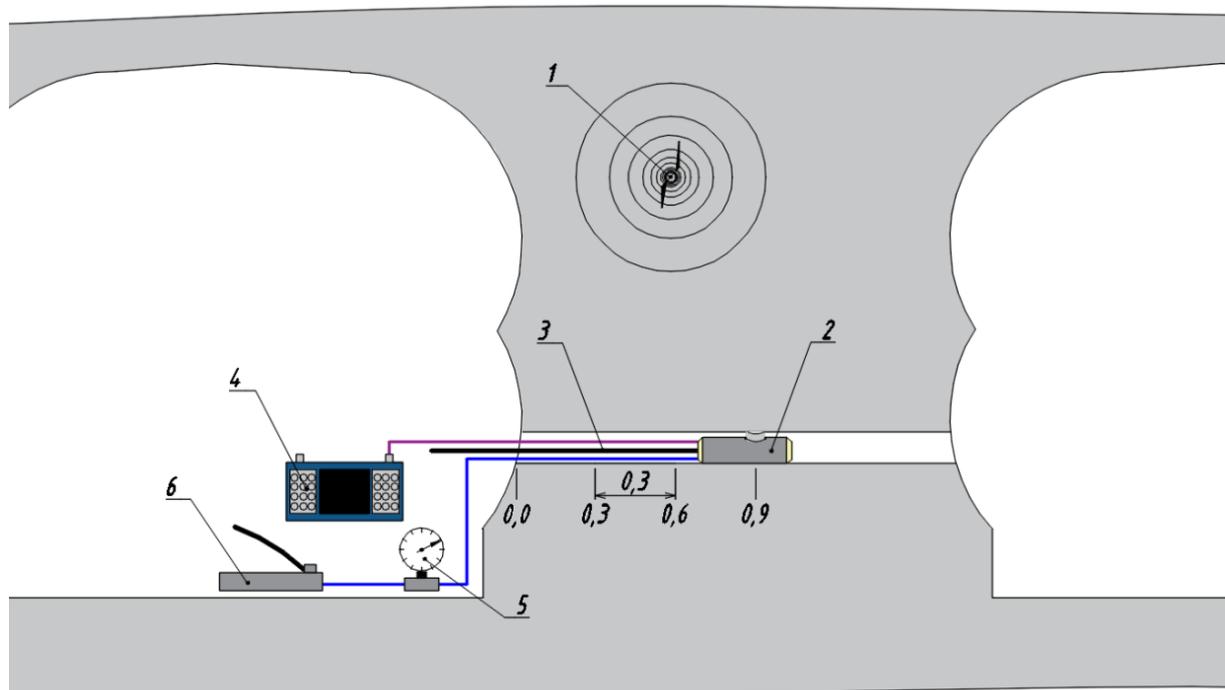


Рис. 2. Схема предлагаемого АЭ-метода контроля состояния целик:
 1 – источник АЭ; 2 – АЭ-преобразователь с прижимным устройством; 3 – досылочная штанга;
 4 – прибор регистрации АЭ; 5 – манометр; 6 – пневматический насос

Регистрация акустической эмиссии проводилась в барьерном (БРЦ) и междуканальном (МКЦ 2) целиках (рис. 1). Замеры выполнялись спустя 2, 4 и 9 месяцев после обработки камерного блока. Обработка результатов наблюдений заключалась в определении следующих параметров акустической эмиссии: максимальная амплитуда импульса (A_{max}); длительность импульса ($T_{дл}$); время нарастания импульса ($T_{нар}$) – время, прошедшее с момента первого пересечения сигналом порога регистрации до прихода максимальной амплитуды сигнала; количество выбросов ($N_{выбр}$) – количество пересечений сигналом порога за время $T_{дл}$, активность акустической эмиссии – число зарегистрированных импульсов АЭ за единицу времени [3]. Через основные рассчитывались такие производные параметры, как средняя частота импульса (f_{cp}) и RA-параметр, с помощью соотношений:

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

На рис. 3 представлены графики распределения активности АЭ по сечению целиков в различные моменты времени. Анализ результатов показал, что в первые месяцы после отработки камерного блока в барьерном целике активность АЭ принимает максимальные значения вблизи контура. Такой же высокий уровень активности наблюдается по всему сечению междукамерного целика № 2. Необходимо отметить, что в барьерном целике характер распределения активности АЭ с удалением от контура подобен соответствующим зависимостям, полученным в условиях нетронутого соляного массива [4]. Спустя 4 месяца в БРЦ активность АЭ снизилась на протяжении всего интервала скважины, а в МКЦ можно отметить уменьшение уровня активности только в средней и краевой западной частях. По прошествии 9 месяцев активность АЭ в междукамерном целике достигла минимальных значений. В барьерном также отмечается понижение уровня активности АЭ на расстоянии от 1,5 м и более от контура целика. Вблизи контура БРЦ продолжает сохраняться зона повышенной активности АЭ, однако ее ширина сократилась с 4,2 м при первоначальных наблюдениях до 1,5 м спустя 9 месяцев после отработки камерного блока. В связи с тем, что активность АЭ в породах тесно коррелирует со скоростью деформации [5], можно сделать вывод о затухающем характере деформирования целиков.

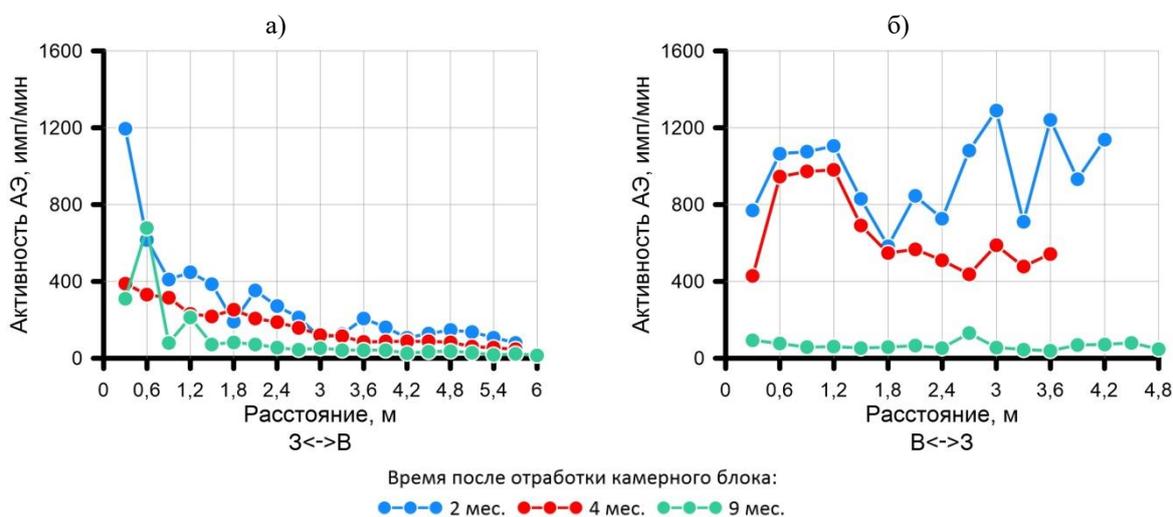


Рис. 3. Распределение активности АЭ по сечению целиков:
а – барьерного (в интервале бурения скважины) б – междукамерного № 2

В процессе параметрического анализа АЭ для каждого параметра находилось медианное значение выборки из импульсов, зарегистрированных в каждой точке наблюдения. Распределение полученных срединных значений параметров по интервалу бурения скважины в барьерном целике представлено на рис. 4. На графиках можно увидеть, что с течением времени значительных изменений в параметрах импульсов АЭ не наблюдается. С удалением от контура БРЦ средняя частота импульсов снижается, а RA-параметр увеличивается. В предыдущих работах [3, 5, 6] в ходе проведения лабораторных экспериментов было показано, что такой характер изменения данных параметров говорит о прогрессирующем процессе разрушения соляной породы. Однако в текущих условиях эксперимента априори известно, что краевые части целиков из-за концентрации напряжений являются более нарушенными по сравнению с центром. Возникшее противоречие результатов лабораторных и натурных экспериментов можно объяснить различием в масштабах объекта контроля. Увеличение размера объекта приводит к увеличению расстояния между ис-

точником АЭ и приемником, что оказывает влияние на первоначальные параметры импульса, когда он преодолевает данное расстояние, в связи с затуханием упругих волн. Как известно, наиболее сильному затуханию подвержены высокочастотные составляющие волнового пакета. В результате средняя частота и амплитуда импульса АЭ уменьшаются, а его временные характеристики – RA-параметр и длительность – увеличиваются. Это и наблюдается на рис. 4 с увеличением расстояния от контура БРЦ, если предположить, что основные источники АЭ сконцентрированы в приконтурной зоне. В пользу последнего говорит также высокий уровень активности АЭ вблизи контура БРЦ (рис. 3а). Следует отметить, что установленные закономерности распределения параметров импульсов могут быть обусловлены не только затуханием, но и особенностью амплитудно-частотной характеристики АЭ-преобразователя и настройками аппаратуры. В проведенных экспериментах данные факторы оставались неизменными при выполнении наблюдений.

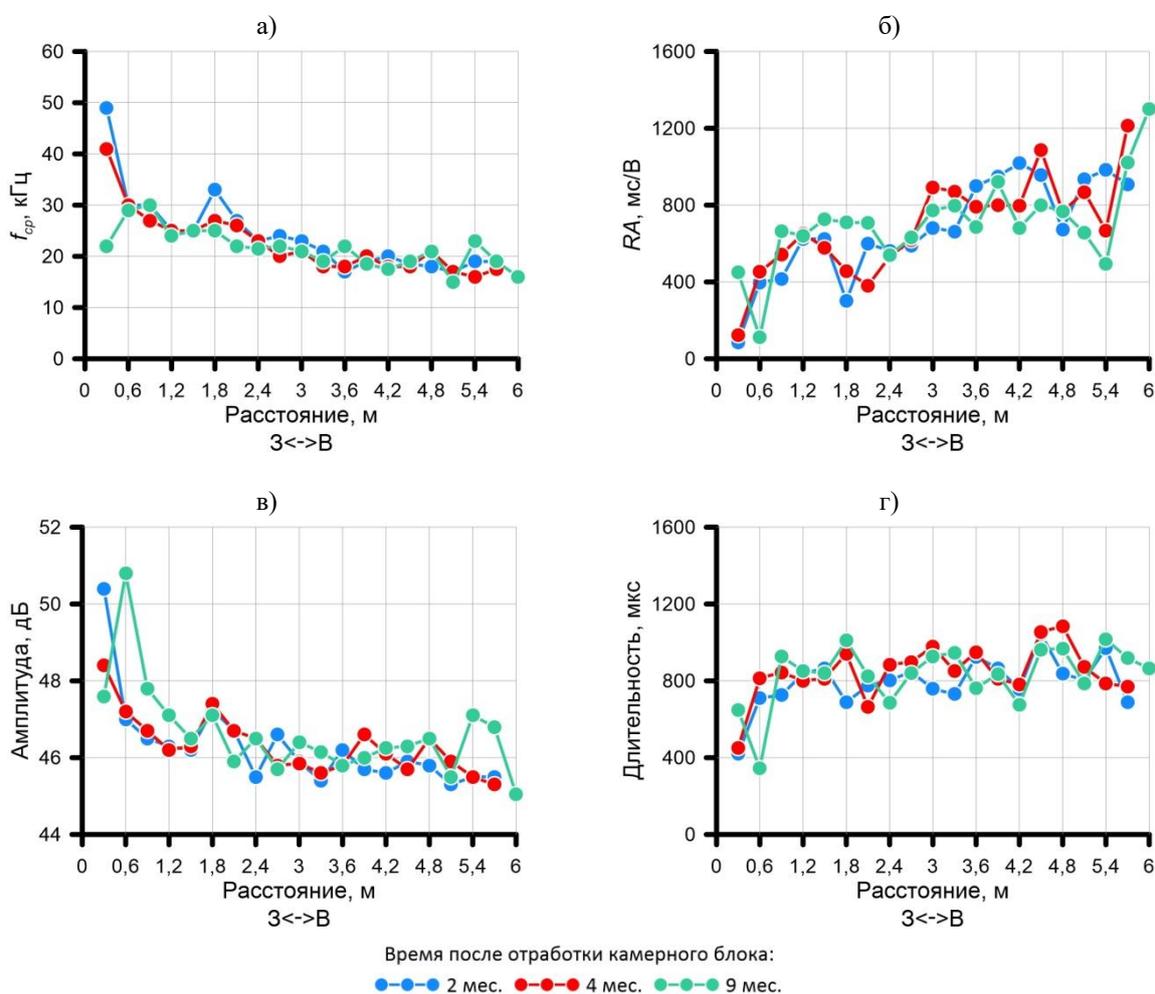


Рис. 4. Распределение параметров АЭ по сечению барьерного целика (в интервале бурения скважины): а – средняя частота; б – RA-параметр; в – амплитуда; г – длительность

На рис. 5 представлено распределение параметров импульсов АЭ по сечению междукammerного целика № 2. По прошествии 2-х месяцев после отработки камерного блока в восточной краевой части целика наблюдаются повышенные значения средней частоты и амплитуды импульсов, тогда как RA-параметр и длительность принимают пониженные значения. С удалением от восточной в сторону западной краевой части целика средняя частота и амплитуда импульсов уменьшаются, а RA-

параметр и длительность увеличиваются. Спустя 4 месяца данный характер распределения параметров импульсов сохраняется с незначительными изменениями значений. Следуя логике интерпретации натуральных результатов АЭ-контроля, изложенной выше, полученные закономерности указывают на более высокую степень концентрации источников АЭ вблизи краевой восточной части целика, что подтверждает высокий уровень активности АЭ в первые месяцы после отработки блока (рис. 3б). Из этого следует, что междукамерный целик нагружен не равномерно. На 9-м месяце наблюдается значительное снижение общего уровня средней частоты и амплитуды импульсов в целике при высоких значениях RA-параметра и длительности. Данное обстоятельство вероятнее всего обусловлено тем, что импульсам приходится преодолевать значительные расстояния от источника АЭ до приемника. Другими словами по сравнению с несколькими месяцами ранее вблизи контура скважины осталось мало активных источников, излучающих импульсы АЭ в диапазоне чувствительности преобразователя, а большая часть регистрируемых импульсов, подвергаясь затуханию, приходит из дальней зоны. Об уменьшении количества источников АЭ с течением времени в междукамерном целике также говорит затухающий характер изменения активности АЭ (рис. 3б).

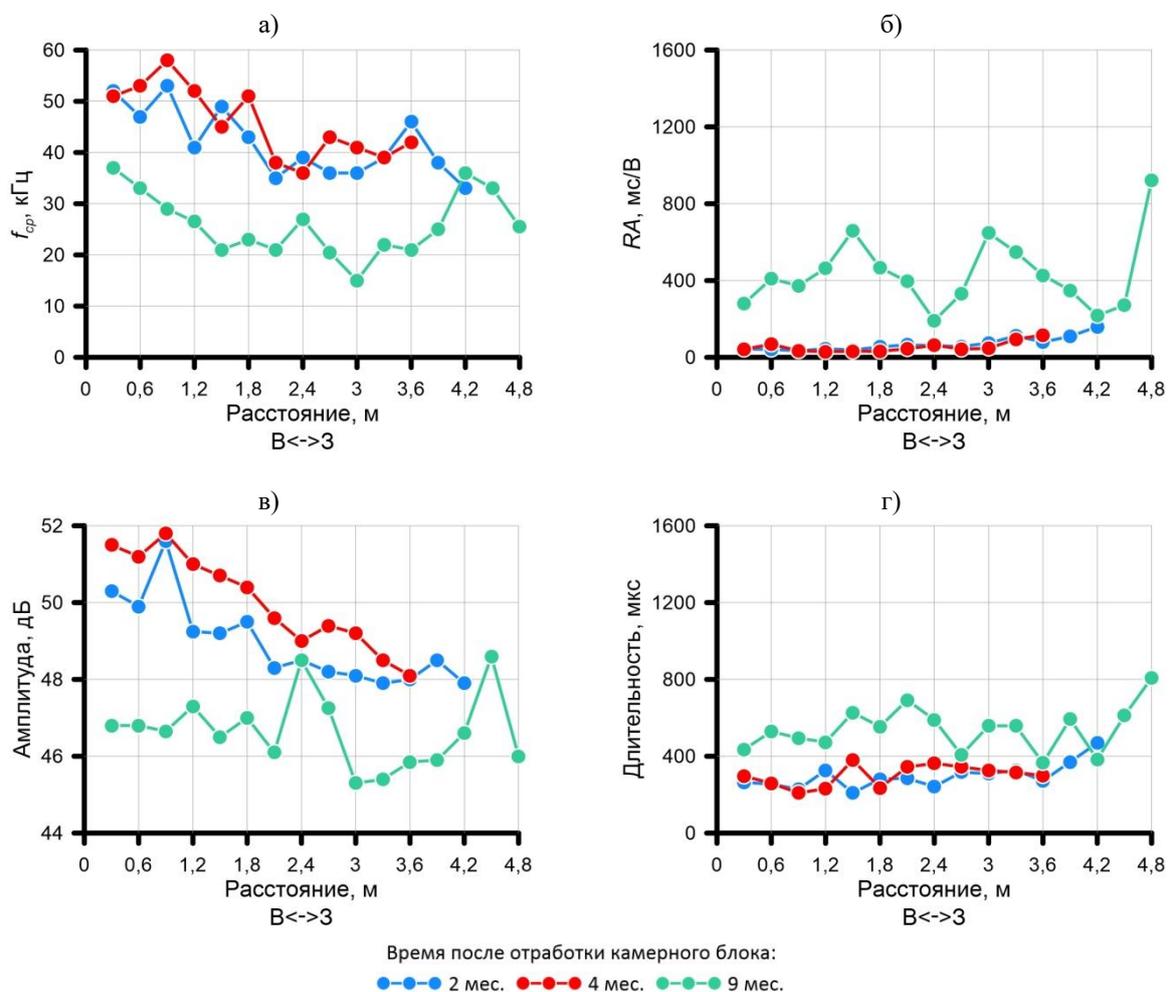


Рис. 5. Распределение параметров АЭ по сечению междукамерного целика № 2:
 а – средняя частота; б – RA-параметр; в – амплитуда; г – длительность

В результате выполненных исследований установлены особенности параметров акустической эмиссии в элементах камерной системы разработки калийного рудника.

Анализ полученных зависимостей показал, что на момент проведения наблюдений деформирование барьерного и междукамерного целиков носит затухающий характер, их состояние стабильное. Также было обнаружено, что установленные закономерности изменения параметров импульсов АЭ отличаются от результатов лабораторных исследований [3, 5, 6] в связи с различным масштабным уровнем объектов контроля. При выполнении натуральных наблюдений акустической эмиссии расстояния между источником и приемником гораздо больше. В таком случае параметры импульсов зависят не только от типа источника, на чем основана методика оценки состояния контролируемого объекта в [7], но и от преодолеваемого импульсом расстояния до приемника, характеристик среды и аппаратуры. Это осложняет интерпретацию результатов натурального АЭ-контроля и требует поиска дополнительных критериев потери устойчивости элементами системы разработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. – М.: ИД «Спектр», 2017. – 362 с.: ил.
2. Manthei G., Plenkers K. Review on In Situ Acoustic Emission Monitoring in the Context of Structural Health Monitoring in Mines // Applied Sciences. – 2018. – V. 8, № 9. – P. 1-35. – DOI: 10.3390/app8091595.
3. Бельтюков Н.Л. Исследование особенностей процесса разрушения соляных пород методом акустической эмиссии // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 33-38. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.6.
4. Бельтюков Н.Л. Оценка геомеханического состояния пород вокруг подготовительной выработки в соляном массиве // Горное эхо. – 2021. – № 3 (84). – С. 30-34. – DOI: 10.7242/echo.2021.3.6.
5. 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.
6. 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.
7. 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.