

DOI.org/10.5281/zenodo.1196713
УДК 539.42

Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов

ДАМАСКИНСКАЯ ЕКАТЕРИНА ЕВГЕНЬЕВНА – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики прочности, e-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

ФРОЛОВ ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики прочности, e-mail: dm.frolov@mail.ioffe.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Политехническая ул., 26. Санкт-Петербург, 194021

ПАНТЕЛЕЕВ ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, e-mail: pia@icmm.ru

Институт механики сплошных сред УрО РАН

Академика Королева ул., д. 1, Пермь, 614013

ГАФУРОВА ДИНА РИНАТОВНА – аспирантка, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых Геологического факультета, e-mail: gilyazetdinova_91@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Ул. Ленинские горы, д. 1, Москва, 119234

Идентификация критического состояния деформированных горных пород

Аннотация: Проведены прямые исследования накопления дефектов на разных этапах деформирования образцов гранита с помощью двух неразрушающих методов: акустической эмиссии (АЭ) и рентгеновской компьютерной микротомографии (КТ).

Квазистатические испытания цилиндрических ($d = 10$ мм, $h = 20$ мм) образцов гранита Westerly проводились в условиях одноосного сжатия. Контроль за дефектообразованием осуществлялся с помощью метода акустической эмиссии. Образец гранита деформировали поэтапно. На каждом этапе сила, приложенная к образцу, плавно возрастала до определенной величины, затем образец выдерживался при данном уровне нагрузки. После каждого этапа образец разгружался и выполнялась томографическая съемка. Для каждого из 11 исследованных образцов было проведено 10 этапов нагружения и томографической съемки.

Распределение числа сигналов АЭ по координате позволило выделить область образца с повышенной концентрацией сигналов АЭ. Распределение числа сигналов АЭ по энергии в этой области имеет степенной вид. Такой вид функции указывает на то, что в данной области образца система дефектов перешла в состояние самоорганизованной критичности. По данным компьютерной томографии установлено, что в этой же области образовались трещины. В других частях образца энергетическое распределение сигналов АЭ аппроксимируется экспоненциальной функцией. Таким образом, показано, что анализ функционального вида (степенной или экспоненциальной) энергетических распределений АЭ-сигналов позволяет выделить область образца, в которой образовались крупные трещины, что подтверждают данные рентгеновской томографии.

© Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р., Фролов Д.И., 2018

О статье: поступила: 18.01.2018; финансирование: бюджет Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, рентгеновская томография, энергетическое распределение, дефект, горные породы, прогнозирование.

Введение

Обширные исследования в области механики и физики прочности гетерогенных хрупких материалов, проведенные за последние 30–40 лет, привели к значительному прогрессу в понимании закономерностей накопления дефектов и образования очага разрушения. Было обнаружено, что накопление дефектов, возникающих в результате деформирования таких гетерогенных материалов, как горные породы, керамика и различные композиционные материалы, характеризуется наличием нескольких стадий [3, 7, 9, 12, 15]. В начале нагружения происходит образование дефектов, распределенных случайным образом по всему объему деформируемого материала. Затем наблюдается локализация дефектообразования в определенной пространственной области, то есть образуется очаг разрушения.

Для прогнозирования развития процесса разрушения и оценки степени критичности состояния деформированных материалов необходимо понять физические причины, вызывающие качественный переход со стадии стабильного накопления повреждений на критическую (или опасную) стадию, и найти критерий этого перехода.

Основной трудностью, возникающей при поиске такого критерия, является отсутствие явного перехода между этими стадиями.

В настоящее время обширные исследования процессов, сопровождающих накопление дефектов, осуществляются различными деструктивными и неразрушающими методами, такими как ультразвуковая техника, акустическая и электромагнитная эмиссия, фрактоллюминесценция, нейтронная эмиссия, оптическая и электронная микроскопия и т.д. Несмотря на прогресс в поиске критериев перехода от стадии накопления случайных дефектов к стадии формирования очага разрушения, физические механизмы этого перехода и факторы, влияющие на него, по-прежнему остаются неясными [1, 2, 9, 13, 17, 18].

В нашей работе для определения качественного перехода процесса накопления дефектов с первого на второй этап используется подход, который основан на рассмотрении системы дефектов в терминах «простая-сложная система» [11]. Известно, что «простые системы» [11] характеризуются экспоненциальным распределением параметров. В общем случае любая «простая система» в результате эволюции становится «сложной» [10, 11]. Это означает, что такая система не может быть описана как сумма невзаимодействующих «простых систем», а ее свойства отличаются от свойств «простых систем». Известно [11], что в процессе своей эволюции «сложная система» переходит в состояние самоорганизованной критичности, характеризующееся степенными распределениями параметров [4].

Проведенный нами анализ результатов лабораторных экспериментов по деформированию образцов гранита с использованием подхода «простая–сложная система» выявил стадии, на которых процесс накопления дефектов развивается принципиально разным образом и которые характеризуются различными типами функции распределения энергии сигналов АЭ [6]. Было установлено, что накоплению дефектов, распределенных случайно по объему, соответствует экспоненциальное распределение числа сигналов АЭ по энергии, а локализованному накоплению дефектов соответствует степенное распределение числа сигналов АЭ по энергии.

Мы предложили гипотезу, которая объясняет смену функционального вида энергетического распределения в рамках концепции самоорганизованной критичности [10, 4]. Согласно этому подходу, совокупность дефектов, которые появляются на ранних этапах деформирования, можно рассматривать как «простую систему». В такой системе практически отсутствует взаимодействие между дефектами. Для «простых систем» характерно экспоненциальное распределение их параметров [11]. По мере деформирования происходит локализация дефектообразования, которому соответствует степенное распределение числа сигналов АЭ по энергии. На этом этапе совокупность дефектов можно рассматривать как «сложную систему», в которой проявляется взаимодействие

между дефектами. Степенное распределение указывает на то, что «сложная система» перешла в состояние самоорганизованной критичности [4].

Целью данной работы является проверка предложенной гипотезы. В связи с этим необходимы эксперименты, которые позволят выявить закономерности эволюции дефектной структуры в объеме материала в процессе механического воздействия. В данной работе проведены прямые исследования накопления дефектов на разных этапах деформирования с помощью двух неразрушающих методов: акустической эмиссии (АЭ) и рентгеновской компьютерной микротомографии (КТ).

Материал и методика эксперимента

Для исследования внутренней дефектной структуры образцов горных пород до и после механических испытаний с помощью рентгеновской микротомографии был использован современный комплекс ScyScan 1172.

Особенностью метода рентгеновской компьютерной микротомографии является то, что пространственное разрешение коррелирует с размером образца: чем меньше размер, тем более мелкие элементы структуры могут быть идентифицированы.

С другой стороны, размеры образца должны быть достаточны для обеспечения возможности деформирования и получения достоверных результатов локализации сигналов АЭ. Таким образом, были определены форма и размеры образцов, которые оптимальны как для механических испытаний, так и для томографии, – цилиндры диаметром 10 мм и высотой 20 мм. Эксперименты проводились на образцах гранита Westerly, в котором средний размер зерна составляет 0.075 мм [14]. С учетом физических принципов томографии, конструктивных особенностей рентгеновской трубки и камеры томографа, удалось получить пространственное разрешение томографии ≈ 3 мкм, которое является максимально возможным для образцов данного размера [16].

Проведена серия испытаний (11 образцов). Томографическая съемка всех образцов с пространственным разрешением 3 мкм, проведенная до начала механических испытаний, показала, что в материале не обнаружено дефектов типа трещин и пор.

Квазистатические испытания образцов гранита Westerly проводились в условиях одноосного сжатия на электромеханической испытательной машине Shimadzu AGX-Plus (рис. 1) Для непрерывного мониторинга акустической эмиссии в процессе деформирования была использована система Amsy-5 Vallen. Широкополосные пьезопреобразователи акустической эмиссии AE105A с полосой 450–1150 кГц крепились к торцам образца. Каждый сигнал АЭ характеризовался временем излучения, координатой и энергией. Точность определения координат источников сигналов АЭ ≈ 2 мм.



Рис. 1. Экспериментальная установка.

Образец гранита деформировался поэтапно. На каждом этапе образец плавно (со скоростью ≈ 5 Н/с) нагружался до определенной нагрузки F и затем выдерживался при данном уровне нагрузки F до тех пор, пока активность сигналов АЭ не спадала до нуля (рис. 2, а). На следующем этапе нагрузку F увеличивали на $0.08F_{max}$ (F_{max} – разрушающая сила). Эксперимент был остановлен, когда на очередном этапе нагружения началось лавинообразное увеличение активности акустической эмиссии, которое указывает на приближающееся разрушение образца (рис. 2, b). В результате образец не разделился на отдельные части, что позволило провести заключительную томографическую съемку.

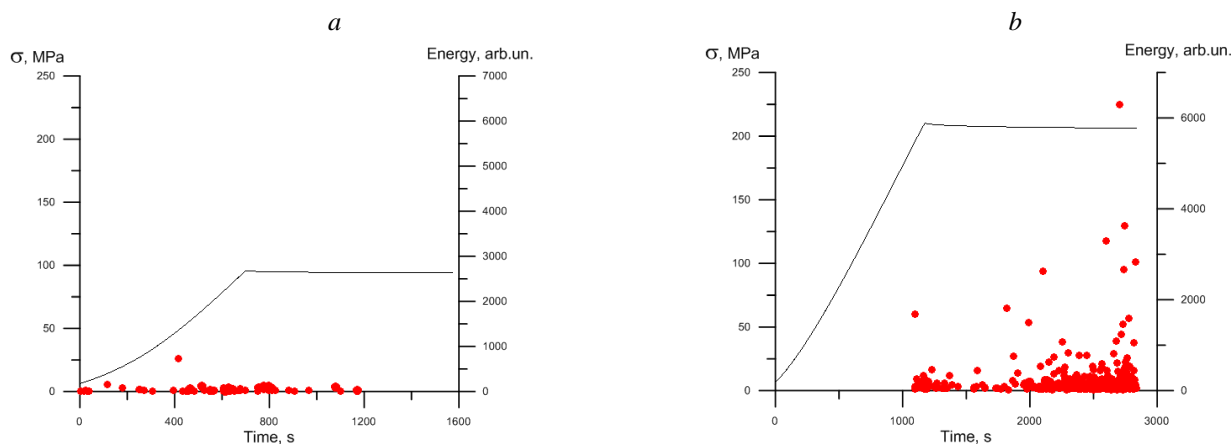


Рис. 2. Изменение приложенной силы на различных этапах деформирования образца: *a* – первый этап, *b* – заключительный этап.

После каждого этапа образец разгружали, помещали в камеру томографа и выполняли томографическую съемку. Всего проведено 11 этапов нагружения и томографической съемки.

Результаты экспериментов и обсуждение

На первых 9 этапах нагружения, т.е. при нагрузках меньших 0.9 от разрушающей, регистрировалось по несколько десятков сигналов АЭ при каждой нагрузке. На последних двух этапах число сигналов увеличилось на 2 порядка. Детально остановимся на анализе акустоэмиссионных данных, полученных на последнем этапе нагружения. На распределении числа сигналов АЭ по координате (рис. 3, синяя кривая) явно выделяется область, в которой генерируется большее, по сравнению со всем объемом образца, число сигналов АЭ. В этой же области генерируются сигналы с наиболее высокой энергией (рис. 3, красные точки).

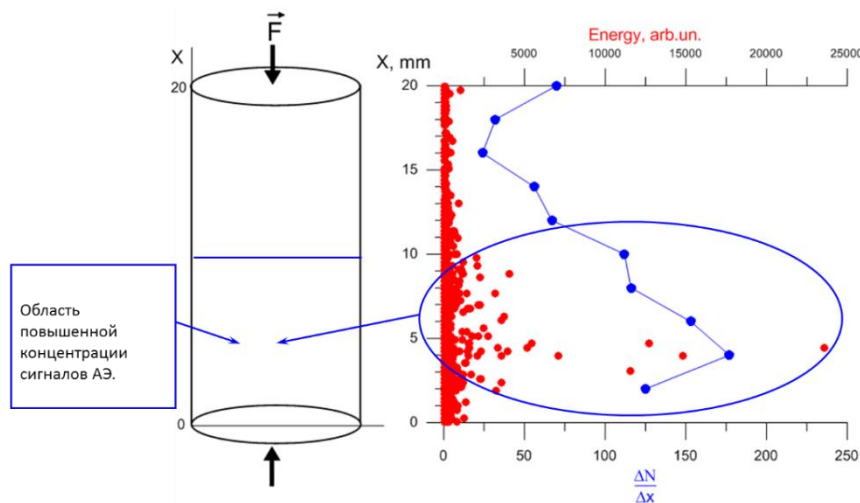


Рис. 3. Акустическая эмиссия (завершающий этап нагружения). Распределение числа сигналов АЭ по координате (синяя линия) и энергия отдельных сигналов АЭ (красные точки).

Был проведен анализ распределений числа сигналов АЭ по энергии. На рис. 4 показано энергетическое распределение сигналов, зарегистрированных в верхней половине образца (Region I). Это распределение аппроксимируется *экспоненциальной* функцией с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.90$ (рис. 4). Согласно нашей гипотезе, такая картина означает, что в данной области материал образца находится на неопасной стадии накопления дефектов.

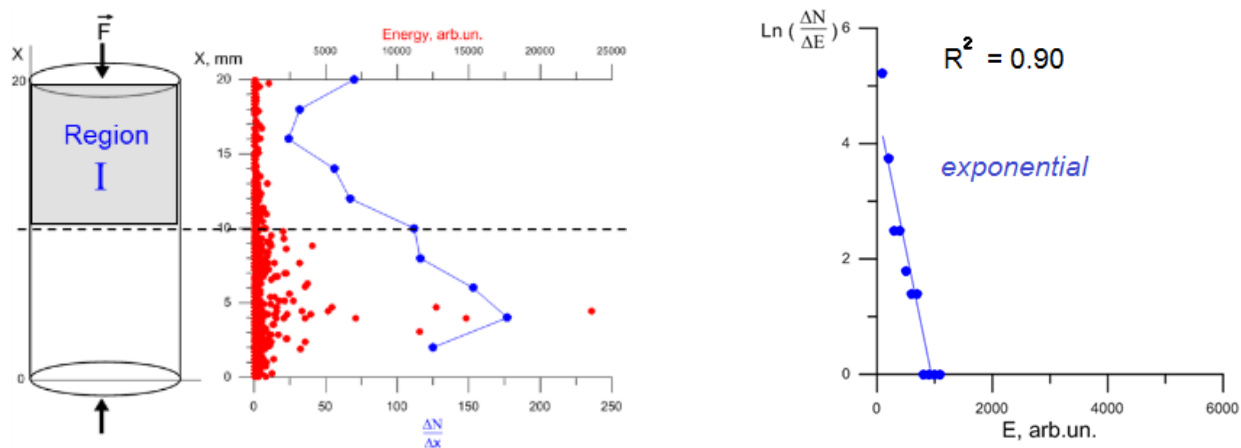


Рис. 4. Распределение сигналов АЭ по энергии в Region I (R^2 – коэффициент детерминации).

На рис. 5 показано энергетическое распределение сигналов, зарегистрированных в нижней половине образца (Region II). Явно видно, что данные аппроксимируются прямой в двойных логарифмических координатах. Следовательно, распределение *степенное*. Такой вид функции указывает на то, что в данной области образца система дефектов перешла в состояние самоорганизованной критичности. То есть в этой области материал образца находится на критической стадии разрушения, дальнейшее развитие процесса приведет к потере целостности образца (разделению на части). И в этой же области на томографических срезах видны крупные трещины (рис. 6). (Отметим, что на предыдущих этапах нагружения в этой области трещин не было обнаружено.)

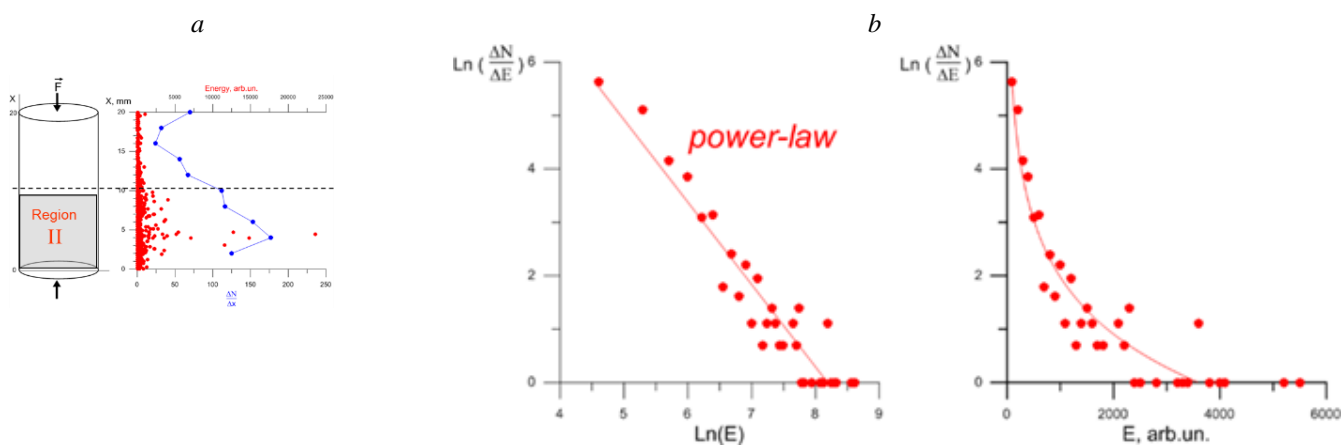


Рис. 5. Распределение сигналов АЭ по энергии в Region II.

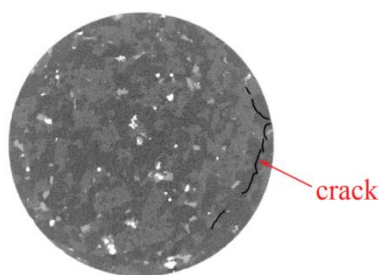


Рис. 6. Пример томографического среза в Region II.

Таким образом, по данным акустической эмиссии можно выделить область образца, в которой совокупность дефектов (согласно нашей гипотезе) перешла в состояние самоорганизованной критичности, т.е. материал находится в опасном состоянии.

Заключение

В работе проведено исследование стадийности накопления повреждений при ступенчатом одноосном сжатии образцов гранита Westerly с использованием двух методов неразрушающего контроля: акустической эмиссии и компьютерной микротомографии. Показано, что тип функции распределения энергии сигналов АЭ может использоваться как индикатор состояния деформированного материала и перехода к критическому этапу разрушения.

Экспоненциальная функция указывает на некритическое (стабильное) состояние деформированного материала.

Степенная функция указывает на то, что процесс накопления дефектов перешел на критическую («опасную») стадию. Этот результат подтверждается данными рентгеновской микротомографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Динамика фразктолюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности мрамора // Журнал технической физики. 2013. Вып. 1. С. 144–147.
2. Гиляров В.Л., Варкентин М.С., Корсуков В.Е., Корсукова М.М., Куксенко В.С. Формирование степенных распределений дефектов по размерам в процессе разрушения материалов // Физика твердого тела. 2010. Вып. 7. С. 1311–1315.
3. Макаров В.В., Куксенко В.С., Рассказов И.Ю., Дамаскинская Е.Е. Прогнозирование геодинамических явлений в сильно сжатых горных породах и массивах. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2013. 130 с.
4. Bak P. How Nature Works: the Science of Self-Organized Criticality. Springer-Verlag, 1996, 212 p.
5. Carpinteri A., Chiodoni A. Manuello A., Sandrone R. Compositional and microchemical evidence of piezonuclear fission reactions in rock specimens subjected to compression tests. Strain. 2011;47:282–292.
6. Damaskinskaya E., Hilarov V., Frolov D. Revealing the spatial region of a future fracture nucleation in heterogeneous materials at the initial deformation stage. AIP Conference Proceedings. 2016. 1783, 020033; doi: 10.1063/1.4966326.
7. Hamiel Y., Katz O., Lyakhovsky V., Reches Z., Fialko Yu. Stable and unstable damage evolution in rocks with implications to fracturing of granite. Geophys. J. Int. 2006;167:1005–1016.
8. Kranz R.L. Crack-crack and crack-pore interaction in stressed granite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 1979;16:37–47.
9. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions. B. Evans and T.-F. Wong, eds., Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks. Academic Press, 1992:3–31.
10. Malinetskii G.G., Potapov A.B. Sovremennye problemy nelineinoi dinamiki (Present Day Problems of Nonlinear Dynamics). Editorial URSS. 2002. 360 p.
11. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. Wiley, 1977, 512 p.
12. Petružálek M., Vilhelm J., Rudajev V., Lokajíček T., Svitek T. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013;60:208–216.
13. Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A. Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones. Tectonophysics. 1997;277:57–81.
14. Stesky R.M. Mechanisms of high temperature frictional sliding in Westerly granite. Can. J. Earth Sci. 1978;15:361–375.
15. Tamuzh V.P., Kuksenko V.S. Fracture Micromechanics of Polymer Materials. Martinus Nijhoff Pub. 1981. 294 p.
16. Tóth T., Hudák R. Computed Tomography – its Development, Principle and Image Artifacts. Acta Mechanica Slovaca. 2013;4(1–7):40–47.
17. Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Timonenkov Yu.A., Yakovitskaya G.E. Prediction of rock failure from spectral characteristics of signals from electromagnetic radiation. J. of Mining Science. 1998;34(4):296–299.
18. Yoshizo Kawaguchi. Charged Particle Emission and Luminescence upon Bending Fracture of Granite. Japanese J. of Applied Physics. 1998;37(6A):3495–3499.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

Geomechanics of Heavily Stressed Rocks

DOI.org/10.5281/zenodo.1196713

Damaskinskaya E., Panteleev I., Gafurova D., Frolov D.

EKATERINA DAMASKINSKAYA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Scientist, Laboratory of Strengths Physics, e-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

DMITRY FROLOV, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Scientist, Laboratory of Strengths Physics, e-mail: dm.frolov@mail.ioffe.ru

Ioffe Institute

26 Politekhnicheskaya, Saint-Petersburg, Russia, 194021

IVAN PANTELEEV, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Scientist, Physical Strength Laboratory, e-mail: pia@icmm.ru

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science

1 Ak. Koroleva, Perm, Russia, 614013

DINA GAFUROVA, Postgraduate, e-mail: gilyazetdinova_91@mail.ru

Lomonosov Moscow State University

1 Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119234

Identification of the critical state of deformed rocks

Abstract: The article deals with the laboratory investigations of the deformation of heterogeneous brittle materials (rocks) at different stages of loading performed by acoustic emission (AE) and X-ray microtomography. Quasistatic tests of cylindrical ($d = 10$ mm, $h = 20$ mm) samples of Westerly granite were carried out under the conditions of uniaxial compression. To monitor continuously the acoustic emission during deformation, an Amsy-5 Vallen-Systeme was used. The granite sample underwent deformation in several stages. At each stage, the sample was pressed and the force of the pressure gradually increased to a certain level, after which it was kept under the given pressure. After each stage, they released the sample from pressure and conducted tomographic surveys. Each of the eleven samples underwent ten stages of pressing and tomographic surveys. The distribution of the AE signals by coordinates enabled one to identify the area of the sample with the increased concentration of the AE signals. The distribution of the AE signals by energy in the area had a power appearance. It testifies to the fact that, in this area of the sample, the system of defects emerged in the state of self-organised criticality. It was ascertained by the computer tomography that there appeared cracks in the same area. In other parts of the sample, the energy distribution of the AE signals was approximated by the exponential function. Thus, it has been demonstrated and confirmed by the data of tomography that the analysis of the functional appearance (power or exponential one) of the energy distribution of the AE signals enables one to determine the area of the sample, in which large cracks appeared.

Key words: acoustic emission, X-ray tomography, energy distribution, defect, rock, forecast.

REFERENCES

1. Vettegren' V.I., Kuksenko V.S., Shcherbakov I.P. Dynamics of fractoluminescence and electromagnetic and acoustic emission upon an impact against the marble surface. *Tech. Phys.* 2013;58(1):144–147.
2. Hilarov V.L., Varkentin M.S., Korsukov V.E., Korsukova M.M., Kuksenko V.S. Formation of power-law size distributions of defects during fracture of materials. *Phys. Solid State.* 2010;52(7):1311–1315.
3. Makarov V.V., Kuksenko V.S., Rasskazov I.Yu., Damaskinskaya E.E. Prediction of geodynamic phenomena in strongly compressed rocks and massifs. FEFU, Vladovostok. 2013. 130 pp.
4. Bak P. *How Nature Works: the Science of Self-Organized Criticality.* Springer-Verlag, 1996, 212 p.

5. Carpinteri A., Chiodoni A. Manuello A., Sandrone R. Compositional and microchemical evidence of piezonuclear fission reactions in rock specimens subjected to compression tests. *Strain*. 2011;47:282–292.
6. Damaskinskaya E., Hilarov V., Frolov D. Revealing the spatial region of a future fracture nucleation in heterogeneous materials at the initial deformation stage. *AIP Conference Proceedings*. 2016. 1783, 020033; doi: 10.1063/1.4966326.
7. Hamiel Y., Katz O., Lyakhovsky V., Reches Z., Fialko Yu. Stable and unstable damage evolution in rocks with implications to fracturing of granite. *Geophys. J. Int.* 2006;167:1005–1016.
8. Kranz R.L. Crack-crack and crack-pore interaction in stressed granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 1979;16:37–47.
9. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions. B. Evans and T.-F. Wong, eds., *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*. Academic Press, 1992:3–31.
10. Malinetskii G.G., Potapov A.B. *Sovremennye problemy nelineinoi dinamiki (Present Day Problems of Nonlinear Dynamics)*. Editorial URSS. 2002. 360 p.
11. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. Wiley, 1977, 512 p.
12. Petružálek M., Vilhelm J., Rudajev V., Lokajíček T., Svitek T. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network. *International J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013;60:208–216.
13. Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A. Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones. *Tectonophysics*. 1997;277:57–81.
14. Stesky R.M. Mechanisms of high temperature frictional sliding in Westerly granite. *Can. J. Earth Sci.* 1978;15:361–375.
15. Tamuzh V.P., Kuksenko V.S. *Fracture Micromechanics of Polymer Materials*. Martinus Nijhoff Pub. 1981. 294 p.
16. Tóth T., Hudák R. Computed Tomography – its Development, Principle and Image Artifacts. *Acta Mechanica Slovaca*. 2013;4(1–7):40–47.
17. Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Timonenkov Yu.A., Yakovitskaya G.E. Prediction of rock failure from spectral characteristics of signals from electromagnetic radiation. *J. of Mining Science*. 1998;34(4): 296–299.
18. Yoshizo Kawaguchi. Charged Particle Emission and Luminescence upon Bending Fracture of Granite. *Japanese J. of Applied Physics*. 1998;37(6A):3495–3499.