



STRAIN LOCALIZATION PECULIARITIES AND DISTRIBUTION OF ACOUSTIC EMISSION SOURCES IN ROCK SAMPLES TESTED BY UNIAXIAL COMPRESSION AND EXPOSED TO ELECTRIC PULSES

V. A. Mubassarova¹, L. M. Bogomolov², A. S. Zakupin¹,
I. A. Pantelev³, O. B. Naimark³

¹Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyzstan

²Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

³Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of RAS, Perm, Russia

Abstract: Results of uniaxial compression tests of rock samples in electromagnetic fields are presented. The experiments were performed in the Laboratory of Basic Physics of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of RAS (ICMM). Deformation of samples was studied, and acoustic emission (AE) signals were recorded. During the tests, loads varied by stages. Specimens of granite from the Kainda deposit in Kyrgyzstan (similar to samples tested at the Research Station of RAS, hereafter RS RAS) were subject to electric pulses at specified levels of compression load. The electric pulses supply was galvanic; two graphite electrodes were fixed at opposite sides of each specimen. The multichannel Amsy-5 Val-len System was used to record AE signals in the six-channel mode, which provided for determination of spatial locations of AE sources. Strain of the specimens was studied with application of original methods of strain computation based on analyses of optical images of deformed specimen surfaces in LaVISION Strain Master System.

Acoustic emission experiment data were interpreted on the basis of analyses of the AE activity in time, i.e. the number of AE events per second, and analyses of signals' energy and AE sources' locations, i.e. defects.

The experiment was conducted at ICMM with the use of the set of equipment with advanced diagnostic capabilities (as compared to earlier experiments described in [Zakupin *et al.*, 2006a, 2006b; Bogomolov *et al.*, 2004]). It can provide new information on properties of acoustic emission and deformation responses of loaded rock specimens to external electric pulses.

The research task also included verification of reproducibility of the effect (AE activity) when fracturing rates responded to electrical pulses, which was revealed earlier in studies conducted at RS RAS. In terms of the principle of randomization, such verification is methodologically significant as new effects, i.e. physical laws, can be considered fully indubitable if they prove stable when some parameters of the experiment are changed. Parameters may be arbitrarily modified within a small range, and randomization is thus another common statistical significance criterion for sample sets obtained at the same conditions. At ICMM, the experiments were conducted in compliance with the principle of randomization [Bogomolov *et al.*, 2011]. In this respect, the material of specimens, loading conditions and characteristics of the electrical pulses source were similar to those in the experiments at RS RAS.

As evidenced by the experiments, during electromagnetic field stimulation, the AE activity is manifold higher than the background activity before the impact. This supports the research results reviewed in [Bogomolov *et al.*, 2011] concerning the AE activity increment of 20 % due to electric pulses in the field twice less strong than that in our experiments at ICMM.

The AE energy distribution analysis shows that cumulative distributions of the number of AE signals vs energy (i.e. the number of AE signals which energy exceeds a specified threshold value) are power-behaved. This is equivalent to the linear plot of distribution in log units of energy and relative events number, similarly to the case of Gutenberg–Richter law for earthquakes. It is noted that for the logarithmic graphs of distribution by energy, angular coefficients (b-factors) are somewhat different in the period of electric impact and in no-impact periods, which shows that the ratio of AE signals with higher energy indicators is increased in case of external impacts. Such a difference is most evident at the near-critical load when compression amounts to 0.94 fracturing stress value.

According to data from the AE source location system, it is revealed that impacts of the electric field are accompanied by redistribution of AE sources through the specimen volume when compression is below 0.9 maximum stress value, which corresponds to the stage of diffusive accumulation of defects. The location system can be effectively applied when events with high amplitudes are accumulated in sufficient number. In this regard, clustering of AE sources (defects) in the area of a future fault was recorded only during the measuring test when the AE activity was quite high at the constant load.

As shown by data from the optical diagnostics set of equipment, LaVision Strain Master System, deformation of a specimen takes place in a non-uniform pattern over its surface, which is manifested as consecutively propagating waves of localized strain. This conclusion contributes to the research results obtained earlier for rock samples under tension and compression [Pantelev *et al.*, 2013b, 2013c, 2013d]. Localized axial strain waves and localized radial strain waves (when material

particles move in the direction perpendicular to the compression direction) are concurrently observed. Such localized strain waves are 'slow' – they propagate at velocities that are by six or seven orders lower than the intrinsic velocity of sound propagation in the material. This observation correlates with the research results obtained earlier in studies of strain localization forms in the course of rock deformation [Zuev, 2011; Zuev et al., 2012].

When the loaded specimen is impacted by the electromagnetic field, maximum strain values are slightly decreased in comparison with those in the ordinary case (when only compressive load is applied). This trend seems to be a specific feature of changes in localization of deformation in the loaded rock samples impacted by electric pulses. Besides, the experiments demonstrate that a source of macro-destruction can be induced by the influence of an external electromagnetic field, and the growth of a nucleus of such source can be stabilized during the impact. The above conclusions correlate with the statistical model of a solid body with defects which is developed in ICM [Pantelev et al., 2011, 2012, 2013a].

Key words: physical modeling, acoustic emission, inelastic strain localization, autowaves, electric impact.

Recommended by G.G. Kocharyan

Citation: Mubassarova V.A., Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Pantelev I.A., Naimark O.B. 2014. Strain localization peculiarities and distribution of acoustic emission sources in rock samples tested by uniaxial compression and exposed to electric pulses. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (4), 919–938. doi:10.5800/GT-2014-5-4-0163.

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЧАГОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

В. А. Мубассарова¹, Л. М. Богомолов², А. С. Закупин¹,
И. А. Пантелеев³, О. Б. Наймарк³

¹ Научная станция РАН, Бишкек, Кыргызстан

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

³ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Аннотация: Представлены результаты испытаний образцов горных пород на одноосное сжатие в присутствии электромагнитного поля. Эксперименты проведены в лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН с исследованием деформации образца и регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ). В процессе испытаний нагрузка изменялась ступенчато. Образцы гранита Каиндинского месторождения, Кыргызстан (однотипные с испытанными на Научной станции РАН), подвергались воздействию электрических импульсов, подаваемых на графитовые электроды, которые закреплялись на противоположных гранях образцов, при фиксированном уровне сжимающего усилия. Запись сигналов акустической эмиссии выполнялась в шестиканальном режиме многоканальной системой Amsy-5 Vallen System, что позволило определить пространственное расположение источников АЭ. Исследование деформации образца производилось при помощи оригинальных методов расчета полей деформации, основанных на корреляционном анализе оптических изображений деформированной поверхности образца (на базе системы LaVision Strain Master).

Интерпретация экспериментальных данных акустической эмиссии осуществлялась на основе анализа временной зависимости акустоэмиссионной активности (количество актов АЭ в секунду), а также энергии сигналов и мест расположения их источников (дефектов).

Эксперимент в ИМСС УрО РАН на установке с расширенными диагностическими возможностями (по сравнению с ранее проведенными экспериментами, которые описаны в ряде работ [Zakupin et al., 2006a, 2006b; Bogomolov et al., 2004]) способен дать новую информацию о свойствах акустоэмиссионных и деформационных откликов нагруженных породных образцов на внешнее электроимпульсное воздействие.

Задача исследований также включала проверку воспроизводимости эффекта отклика скорости трещинообразования (активности АЭ) на воздействие электрических импульсов, который был ранее обнаружен авторами (НС РАН). Такая проверка имеет важное методологическое значение с точки зрения принципа рандомизации – новые эффекты (физические законы) могут считаться полностью достоверными, если они устойчивы к некоторым изменениям параметров постановки эксперимента. В небольших пределах модификация параметров может быть произвольной, отсюда – рандомизация, дополняющая распространенные критерии статистической достоверности для выборок, полученных при одних и тех же условиях. Принципу рандомизации вполне соответствует постановка экспериментов на образцах горных пород в ИМСС УрО РАН [Bogomolov et al., 2011]. В связи с этим, материал образцов, режим нагружения и характеристики источника электрических импульсов выбирались сходными с экспериментами на Научной станции РАН.

Эксперименты дали следующие основные результаты. Активность АЭ при стимулировании электромагнитным полем в десятки раз превышает ее фоновый уровень до воздействия. Это существенно дополняет ранее полученные результаты (обобщение в работе [Bogomolov et al., 2011]) прироста активности АЭ порядка 20 % под воздействием электромагнитного поля при вдвое меньшей напряженности электрического поля.

При анализе энергетических распределений сигналов АЭ показано, что кумулятивные распределения (т.е. количество сигналов АЭ с энергией, превышающей некоторое пороговое значение от величины этого порога) числа сигналов по энергии соответствуют степенной зависимости. Это эквивалентно линейному графику распределения в логарифмических единицах энергии и числа событий, по аналогии со случаем закона Гутенберга-Рихтера для землетрясений. Обращено внимание на то, что для логарифмических графиков распределений по энергии угловые коэффициенты (b-факторы) в период электровоздействия и во время его отсутствия несколько различаются. Это различие, свидетельствующее об увеличении доли сигналов АЭ с повышенными энергиями при внешнем воздействии, проявилось в наибольшей степени при околокритической нагрузке (напряжение сжатия 0.94 от разрушающего).

Применение системы локации источников сигналов АЭ позволило установить, что при сжатии, меньшем 0.90 от максимального (соответствующем стадии диффузного накопления дефектов), воздействие электромагнитного поля сопровождается перераспределением источников по объему образца. Для эффективного использования системы локации необходимо накопление достаточно большого числа событий с большими значениями амплитуд. С учетом этого, результат кластеризации очагов АЭ (дефектов) к области будущего макроразрыва был отмечен лишь в измержительной сессии с достаточно высокой активностью АЭ при постоянной нагрузке.

С помощью системы оптической диагностики LaVision Strain Master показано, что процесс деформирования образца происходит неоднородно по всей поверхности в виде последовательно распространяющихся волн локализованной деформации, что дополняет ранее полученные результаты при растяжении и сжатии ряда горных пород [Panteleev et al., 2013b, 2013c, 2013d]. При этом наблюдаются волны локализованной поперечной деформации (волны, в которых частицы материала перемещаются в направлении, перпендикулярном направлению сжатия), и волны локализованной продольной (осевой) деформации. Наблюдаемые волны локализованной деформации являются «медленными», скорость их распространения на шесть-семь порядков меньше характерной скорости звука в материале, что соответствует ранее полученным результатам исследования форм локализации деформации при нарушении горных пород [Zuev, 2011; Zuev et al., 2012].

В период дополнительного воздействия электромагнитных полей на нагруженные образцы значения максимумов деформации несколько уменьшаются по сравнению с обычным случаем (только сжимающая нагрузка). Вероятно, эта тенденция – характерная особенность в изменении локализации деформации нагруженных породных образцов под влиянием электрических импульсов. Также была продемонстрирована возможность инициирования очага макроразрушения воздействием внешнего электромагнитного поля и стабилизации роста зародыша такого очага в течение воздействия, что согласуется с ключевыми результатами разрабатываемой в ИМСС УрО РАН статистической модели твердого тела с дефектами [Panteleev et al., 2011, 2012, 2013a].

Ключевые слова: физическое моделирование, акустическая эмиссия, локализация неупругой деформации, автоволны, электровоздействие.

1. ВВЕДЕНИЕ

Геофизические натурные наблюдения и лабораторные эксперименты на образцах показали, что экзогенные воздействия (в том числе импульсные электромагнитные поля) оказывают влияние на неупругое деформирование нагруженных геоматериалов. В настоящее время известны проявления этого эффекта как изменения сейсмической, сейсмоакустической или акустоэмиссионной активности, в зависимости от характерных масштабов [Sobolev, Ponomarev, 2003; Kocharyan et al., 2006; Zakupin, 2010; Bogomolov et al., 2004]. Отмечена также его взаимосвязь с процессом разрушения геоматериалов [Urusovskaya et al., 2000; Shpeizman, Zhoga, 2005].

Первые результаты натурных экспериментов с воздействиями на геосреду электроимпульсов, генерируемых при пусках геофизических магнетогидродинамических генераторов, были получены на Гармском (Таджикистан, Памир) и Бишкекском (Кыргызстан, Северный Тянь-Шань) полигонах в конце XX века. В работах Н.Т. Тарасова [Tarasov, 1997; Tarasov et al.,

1999] было установлено наличие триггерного влияния электромагнитных полей на локальную сейсмичность, которая проявилась в кратковременном приросте сейсмических событий низких классов после проведения зондирования. В более поздних работах [Bogomolov et al., 2005; Sychev et al., 2008, 2010; Smirnov, Zavyalov, 2012] обнаруженный ранее эффект был подтвержден – наблюдались вариации сейсмичности при глубинных зондированиях земной коры однополярными импульсами тока, производимыми электроразведочной генераторной установкой ЭРГУ-600-2. Несмотря на то, что наличие влияния электромагнитных полей на сейсмические процессы не подлежит сомнению, вопрос о физических механизмах, обуславливающих это влияние, до сих пор остается дискуссионным. С учетом данного обстоятельства и того факта, что проведение натурных испытаний сталкивается со значительными трудностями, как техническими, так и экономическими, существенный вклад в понимание механизма преобразования энергии электромагнитных полей в энергию упругих волн от возникающих разрывов сплошности может внести лабораторное моделирование на образ-

цах горных пород. Первые результаты моделирования электромагнитных эффектов в нагруженной среде были получены в экспериментах, проведенных в геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН на образцах бетона [Sobolev, Ponomarev, 2003]. Изменения активности акустической эмиссии (так называемые отклики АЭ) при воздействии источников электроимпульсов оказались довольно слабыми, хотя и статистически значимыми. Эти эксперименты выявили, что возможности применения стандартных прессов с серво-управляемым гидроприводом для анализа триггерных эффектов внешних полей ограничены. На них может быть достоверно зарегистрирована реакция среды в виде акустоэмиссионных откликов лишь на такие внешние электровоздействия, механический эквивалент которых заведомо превышает амплитуду шумов.

К дальнейшим исследованиям влияния электромагнитных полей на трещинообразование нагруженных образцов геоматериалов подключились сотрудники лаборатории моделирования энергонасыщенных сред Научной станции РАН. Мотивацией для нового цикла лабораторных экспериментов явилась необходимость исследования триггерных эффектов электрических импульсов в экспериментах на образцах тех горных пород, которые залегают в области проведения электромагнитных зондирований (традиционно называемой Бишкекским геодинамическим полигоном, БГП). Стоит отметить, что для серий образцов гранита, габбро, мрамора и т.п., изготовленных из пород одних и тех же месторождений, достигается лучшая воспроизводимость характеристики нагружения (σ - ϵ характеристики) при одноосном сжатии по сравнению с модельными материалами (цементно-песчаные смеси). Такая воспроизводимость при одинаковых режимах нагружения важна для выявления реакции среды на дополнительные воздействия (в том числе электроимпульсы) на фоне обычного поведения активности АЭ и деформационных параметров.

На Научной станции РАН на пружинном прессе УДИ [Stavrogina, Protosenya, 1979] в режиме одноосного квазистатического нагружения с 2001 по 2009 год был испытан широкий спектр материалов как искусственных (бетон, керамика), так и горных пород магматического (граниты, гранодиориты, габбро) и метаморфического происхождения (кварцит), а также осадочных пород (галит). Наибольшее внимание было уделено образцам магматических горных пород, для которых исследован эффект электрочувствительности материалов в зависимости от величины сжимающего напряжения и параметров источников электромагнитных полей. На образцах гранитов, гранодиоритов и габбро было продемонстрировано, что активность акустической эмиссии, обусловленная воздействием электромагнитного поля, проявляется при значениях осевого сжимающего напряжения выше 0.8 от разрушения [Bogomolov, Zakupin, 2008; Zakupin et al., 2006a, 2006b; Bogomolov et al., 2011]. Вариации усредненной

активности АЭ вследствие внешних воздействий отчетливо выделялись визуально на временных графиках, а с применением статистического анализа временных рядов стимулирующий эффект электроимпульсов стал бесспорным.

Испытания образцов искусственных геоматериалов в присутствии электромагнитного поля также были продолжены на установках НС РАН [Bogomolov et al., 2011] и ОИВТ РАН [Avagimov et al., 2006, Avagimov, Zeigarnik, 2008]. Эксперименты, проведенные на бетоне и водонасыщенной керамике, доказали влияние электрических импульсов с амплитудой напряженности поля 1–10 кВ/м на скорость дефектообразования и выявили сходство в реакции этих материалов и магматических горных пород на внешнее электромагнитное воздействие. Такое нетривиальное сходство, позволяющее говорить об электрочувствительности как об атрибуте нагруженных геоматериалов, осложняет поиск механизма отклика АЭ на воздействие электроимпульсов. Действительно, известны подходы к объяснению влияния электромагнитных полей на деформирование щелочно-галоидных кристаллов [Finkel, 1977; Zuev, 1990; Urusovskaya et al., 2000]. Также предложена модель механизма воздействия электроимпульсов с крутыми фронтами на образцы горных пород с высокой акустической добротностью (гранит, габбро) [Bogomolov et al., 2011]. Эта модель опирается на известное обстоятельство [Surkov, 2000]: возникновение аномальной поляризации материала образцов в некоторых их зонах под влиянием динамических факторов (в частности, «микроударах» при трещинообразовании, т.е. актах АЭ). Внешнее электрическое поле воздействует на такую среду, вследствие чего в ней возникают упругие волны, инициирующие новые очаги АЭ. Механизм аномальной (динамической) поляризации связан с сильным разделением зарядов у кончика растущей трещины в диэлектрическом материале с ионными или полярными межатомными связями [Freund, 2000; Frid et al., 2003]. Стоит отметить, что согласно [Frid et al., 2003] динамическая поляризация может считаться серьезным аргументом при объяснении механизма электромагнитного излучения (ЭМИ) при трещинообразовании в нагруженных породных образцах [Yakovitskaya, 2008]. Для образцов гранита Каинда, испытываемых на одноосное сжатие, сигналы ЭМИ были зарегистрированы в том же диапазоне нагрузок, что и акустическая эмиссия [Manzhikov et al., 2001]. Генерация сигналов ЭМИ может считаться обратным эффектом по отношению к реакции среды (прирост АЭ) на электромагнитное воздействие.

На натурном масштабе механизм воздействия электромагнитных полей (импульсов тока при пусках МГД-генераторов и устройства ЭРГУ-600-2) предположительно определяется следующей цепочкой эффектов: электрокинетические эффекты (изменения движения воды по коллекторам под влиянием электрического поля [Grigorov, 1973]), изменение сцепле-

ния при увлажнении поверхностей контактирующих блоков, а также эффект Ребиндера (переход к разрушению). По отдельности эти эффекты уже изучены, в частности продемонстрирован «триггер» даже небольшого количества воды [Sobolev et al., 2006].

Несмотря на высокую значимость полученных результатов предшествующих работ, используемые в них подходы не дают полного объяснения сходства откликов материалов с различными физико-химическими свойствами. В частности, для реализации электрокинетических эффектов требуется значительная влагонасыщенность породы и ее проницаемость, что, согласно ранее полученным экспериментальным результатам, не является необходимым условием для отклика материала на внешнее электромагнитное воздействие. Ранее собранных данных, по-видимому, недостаточно для выявления основного элемента электромеханической взаимосвязи, ответственного за такую общность.

В зарубежных работах по смежной тематике (деформационные эффекты электрических импульсов, не сводимые к пьезоэлектрическим и пьезомагнитным свойствам среды) в качестве объекта исследований рассматривались контактирующие поверхности образцов горных пород и гранулированные материалы. Воздействие электромагнитных полей на цельные нагруженные образцы горных пород не исследовалось. В связи с тем, что некоторые из зарубежных работ также были ориентированы на объяснение вариаций локальной сейсмичности после пусков МГД-генераторов [Tarasov, 1997; Tarasov et al., 1999], стоит упомянуть наиболее значимые результаты. В работах [Chelidze et al., 2002, 2004; Chelidze, Lursmanashvili, 2003] описаны эксперименты по воздействию электромагнитного поля на проскальзывание контактирующих блоков. Особенно нагляден эксперимент с простейшим слайдером – соскальзывание одного из блоков по наклонной плоскости, стимулированное электрическими импульсами. Результаты этих работ могли бы свидетельствовать об уменьшении коэффициента внутреннего трения и/или сцепления, так как наблюдаемые подвижки на контактах указывают на нарушение критерия Кулона-Мора при электровоздействии на контактирующие поверхности [Chelidze et al., 2004].

Использование установок – слайдеров – позволило практически устранить вклад в общий поток сигналов АЭ фонового процесса образования и роста микротрещин в объеме образцов, описываемого кинетическими моделями Журкова-Куксенко либо Наймарка-Плехова-Пантелеева [Zhurkov et al., 1977, 1980; Panteliev et al., 2011, 2012, 2013a]. Благодаря этому, даже при сравнительно небольшой статистике данных было выявлено влияние периодических электроимпульсов на неравномерность распределения событий АЭ во времени. Обнаруженную Т.Л. Челидзе с соавторами синхронизацию интервалов преимущественного возникновения АЭ с амплитудой напряженности электри-

ческого поля можно рассматривать как разновидность (одну из мод) эффекта электростимулирования деформации. Согласно [Chelidze et al., 2002; Chelidze, Lursmanashvili, 2003], для этой разновидности реакции среды (в данном случае системы контактирующих тел) на электровоздействие не отмечен прирост общего числа событий АЭ по сравнению со случаем отсутствия поля; происходит лишь перераспределение во времени, «модуляция» потока событий.

При другой постановке экспериментов в работах [Mugele et al., 2005; Arakawa et al., 2003; Petrenko, 1994] было выявлено значительное возрастание сцепления трущихся поверхностей с налипшим снегом (кристаллами воды) в присутствии электромагнитного поля. Измерения акустической эмиссии в этих работах не проводились. Различие результатов относительно знака изменения сцепления может быть обусловлено более сложным характером поверхностных явлений по сравнению с деформационными процессами в сплошной среде, а также зависимостью от таких параметров окружающей среды, как температура, влажность и др. Таким образом, исследования влияния электрических импульсов на трение (сцепление) контактирующих поверхностей имеет свои особенности. Их проведение может считаться самостоятельной задачей (как и дальнейшие эксперименты на цельных образцах, относящиеся к обсуждаемой теме).

С учетом вышеизложенного, представляет интерес проведение новой серии экспериментов на образцах горных пород (предпочтительно гранит, именно им внесен наибольший вклад в результаты по Бишкекской выборке образцов). Постановка экспериментов должна быть приближена к описанной в работах [Zakupin et al., 2006a, 2006b; Bogomolov et al., 2004], что включает изготовление образцов соответствующих размеров, выбор режимов нагружения, параметров источника электроимпульсов и т.п. В лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН имеется подходящая для таких экспериментов испытательная установка, а возможности измерительной системы существенно больше, чем в предшествующих экспериментах ИС РАН. Применение усовершенствованных методов регистрации АЭ и компонент деформации должно обеспечить получение новой информации о свойствах акустоэмиссионных и деформационных откликов нагруженных породных образцов на внешнее электроимпульсное воздействие. В этом как раз и заключается цель данной работы.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Как было отмечено выше, материалом для испытаний был выбран гранит, для которого установлены поведение активности АЭ при разных значениях механической нагрузки (ступенчатое одноосное сжатие) и

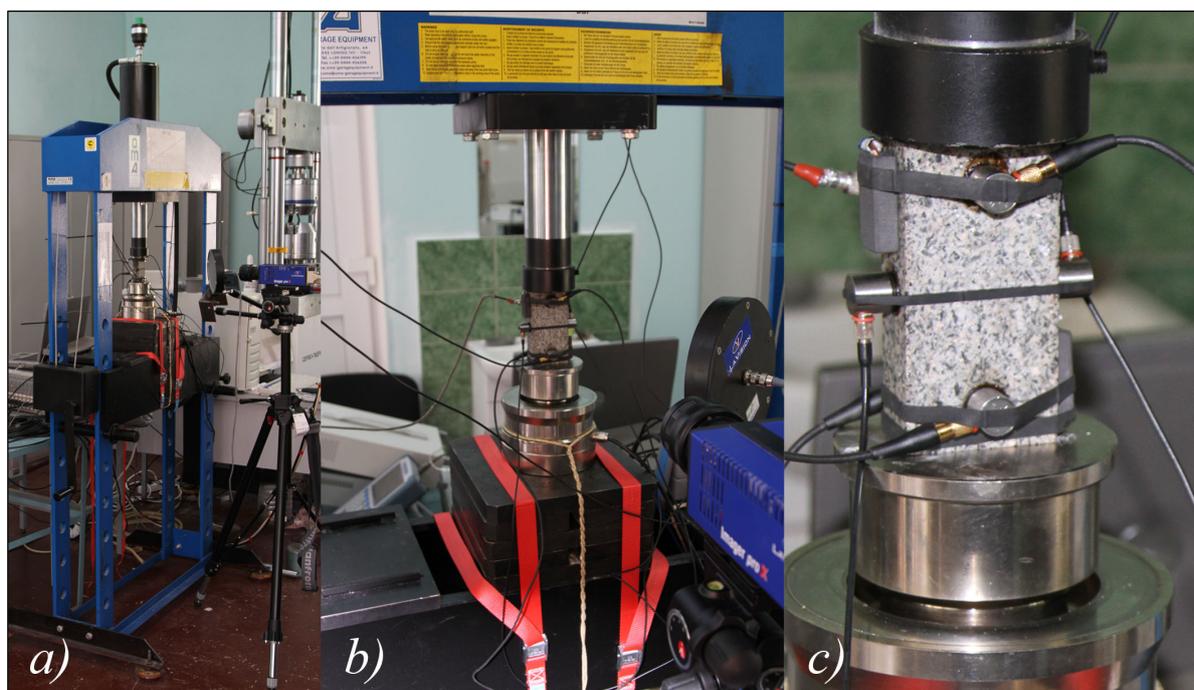


Рис. 1. Фотографии гидравлического пресса ОМА (а) и образца гранита Каиндинского месторождения, установленного для испытаний (b, c).

Fig. 1. Photos of OMA Hydraulic Press (a) and the granite specimen from the Kainda deposit before testing (b, c).

оптимальные параметры электромагнитного воздействия [Zakupin et al., 2006b]. Были изготовлены образцы правильной формы (прямоугольный параллелепипед) с размерами 25×50×100 мм.

Экспериментальные исследования образцов с регистрацией пространственно-временных распределений деформации и параметров сигналов акустической эмиссии проведены с использованием оборудования, имеющегося в лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН. Как и в экспериментах на пружинном прессе УДИ, образцы гранита испытывались в режиме квазистатического нагружения при ступенчато изменяемой нагрузке на гидравлическом прессе с ручным приводом ОМА, Италия (рис. 1, а), с максимальным усилием сжатия 500 кН. Экспериментальные сессии с воздействием электромагнитного поля проводились при фиксированном уровне нагрузки.

В процессе нагружения значения усилия с частотой 1 Гц регистрировались при помощи силоизмерительного комплекса, включающего сило- и весоизмерительный тензорезистивный датчик К-С-183-47-С3, весового электронного измерительного блока КСК52 и специального программного обеспечения.

Дополнительное (по отношению к механическому) воздействие реализовано при подаче на графитовые электроды, прижатые к боковым поверхностям образца, напряжения от генератора сигналов произвольной формы АКПП-3407/1А. Параметры электрических импульсов при этом составляли: напряжение 90 В, частота

2.5 кГц, длительность 100 мкс, скважность 75 %; форма – однополярные прямоугольные импульсы положительной полярности.

В течение экспериментов производилась непрерывная регистрация сигналов акустической эмиссии. Сигналы АЭ регистрировались двумя типами пьезоэлектрических датчиков: четырьмя широкополосными датчиками типа SE2MEG-P производства DECI, США, работающими в частотном диапазоне 200 кГц – 2 МГц, и двумя датчиками типа AE104A, Vallen System, Германия, с диапазоном частот 100–400 кГц. В качестве блока регистрации акустической эмиссии использовалась цифровая 8-канальная измерительная система Vallen System Amsy-5. Каждый измерительный канал включает в себя датчик, предварительный усилитель (типа АЕР4 с рабочим диапазоном частот 3–2000 кГц) и один канал ASIP-2 (двухканальный процессор сигналов акустической эмиссии). В состав системы Amsy-5 входит 8 каналов ASIP-2: 4 канала с диапазоном частот 95–400 кГц и 4 высокочастотных канала (400–1200 кГц). Каждый канал ASIP-2 сочетает в себе звено аналоговой регистрации и блока цифровой обработки сигналов. Измерительная система Vallen System Amsy-5 регистрирует сигналы акустической эмиссии при превышении некоторого порогового уровня (задаваемого исследователем) индивидуально каждым каналом и независимо от других каналов. Независимость измерений акустической эмиссии каждым каналом позволила осуществить настройку уровня порогового

значения регистрации сигналов АЭ: минимальный порог 6 мкВ был установлен на каналах с низкочастотными датчиками, максимальный порог зафиксирован на уровне 100 мкВ для высокочастотных каналов. Это обеспечило регистрацию максимально возможного количества сигналов АЭ (в том числе с низким значением амплитуды).

Обработка сигналов АЭ в Amsy-5 производится в режиме реального времени и содержит в себе такие функции, как определение времени первого пересечения порога (время прибытия сигнала), время нарастания сигнала, его длительность, амплитуда и энергия. Энергия сигналов АЭ рассчитывалась по огибающей модуля амплитуды электрического сигнала на выходе пьезопреобразователя (датчика АЭ) в нВс. Параллельно с определением параметров сигналов в течение экспериментов была реализована запись волновых форм АЭ при помощи дополнительного модуля регистрации, что позволило гарантировать отсутствие ложных сигналов (помех, наводок) от генератора электрических импульсов.

Использование системы регистрации в 6-канальном режиме позволило произвести локацию источников АЭ в объеме материала. При расчете местоположения источника акустической эмиссии используются импульсы, зарегистрированные по нескольким каналам в течение заданного интервала времени (не менее длительности сигнала). Импульсы идентифицируются и группируются в набор данных записи события, включающий информацию о первом и последующих превышениях порога, разнице времени регистрации и количестве превышений порога в интервале времени, соответствующем событию. К этому набору данных применяется алгоритм расчета месторасположения источника (локации), который выбирается в зависимости от геометрии конструкции/образца и принципа размещения на нем датчиков АЭ.

Для выполнения локационных расчетов задавались скорость звука в материале (граните), единицы измерения координат, позиции датчиков АЭ (координаты АЭ датчиков), максимальное расстояние между датчиками АЭ. Для расчета координат источника АЭ был применен пошаговый метод трехмерной локации, который базируется на численном пошаговом итерационном алгоритме, специально применяющемся для сплошных объектов (твердых или наполненных жидкостью) с распространением звука в трех измерениях. Суть алгоритма состоит в следующем: первоначально определяется предположительное местоположение источника АЭ, затем строится куб с определенной длиной стороны, центром которого является предположительное местоположение источника. В центре каждой грани куба задаются шесть новых виртуальных источников, для каждого из которых вычисляется значение показателя неопределенности локации (стандартное отклонение вычисленных расстояний от датчика АЭ до источника и этого расстояния в соответствии с за-

регистрированной разницей времени прихода сигнала). Решение с наименьшим значением показателя неопределенности становится новой позицией источника. Затем процедура повторяется, пока позиция источника в центре куба не будет иметь наименьшее значение показателя неопределенности. После этого длина стороны куба уменьшается и шаги повторяются, пока длина стороны куба не достигнет определенного минимального значения. Координаты центра куба являются результатом расчета источника акустоэмиссионного события.

Исследование эволюции пространственного распределения деформации на поверхности испытываемых образцов проводилось с помощью метода корреляции цифровых изображений [Sutton et al., 1983, 2009], основанного на анализе последовательности оптических изображений деформируемой поверхности образца (на базе системы LaVision Strain Master). Для этого в течение эксперимента одна из граней образца снималась при помощи CCD камеры (Charge Coupled Device), модель ImagerProX, обладающей высокой чувствительностью, разрешением и входящей в состав системы LaVision Strain Master. Данная модель камеры позволяет снимать до 30 кадров в секунду с разрешением 1600×1200 пикселей, размер одного пикселя при этом составляет 7.4×7.4 мкм, спектральный диапазон камеры – от 320 до 1000 нм.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

3.1. ОБРАБОТКА ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Интерпретация экспериментальных данных акустической эмиссии осуществлялась на основе анализа временной зависимости акустоэмиссионной активности (количество актов АЭ в секунду). Данная форма представления наиболее информативно отражает изменения режима деформирования образца. Анализ графиков активности АЭ подразумевает определение реакции (отклика среды в акустической эмиссии) нагруженного образца на внешнее воздействие. Эта реакция выражается в приросте усредненной активности АЭ после включения источника электромагнитного поля, превышающем по амплитуде среднеквадратичное отклонение временной зависимости активности АЭ, определяемое по некоторому фоновому уровню до включения источника воздействия. При этом под откликами среды в АЭ подразумеваются лишь вариации акустоэмиссионной активности, произошедшей с временными задержками, не превышающими длительности воздействия.

Дополнительным параметром, по которому возможно определить наличие влияния электромагнитного поля на акустическую эмиссию, является энергия сигналов. Для выявления особенностей распределения акустоэмиссионных сигналов по энергиям в течение

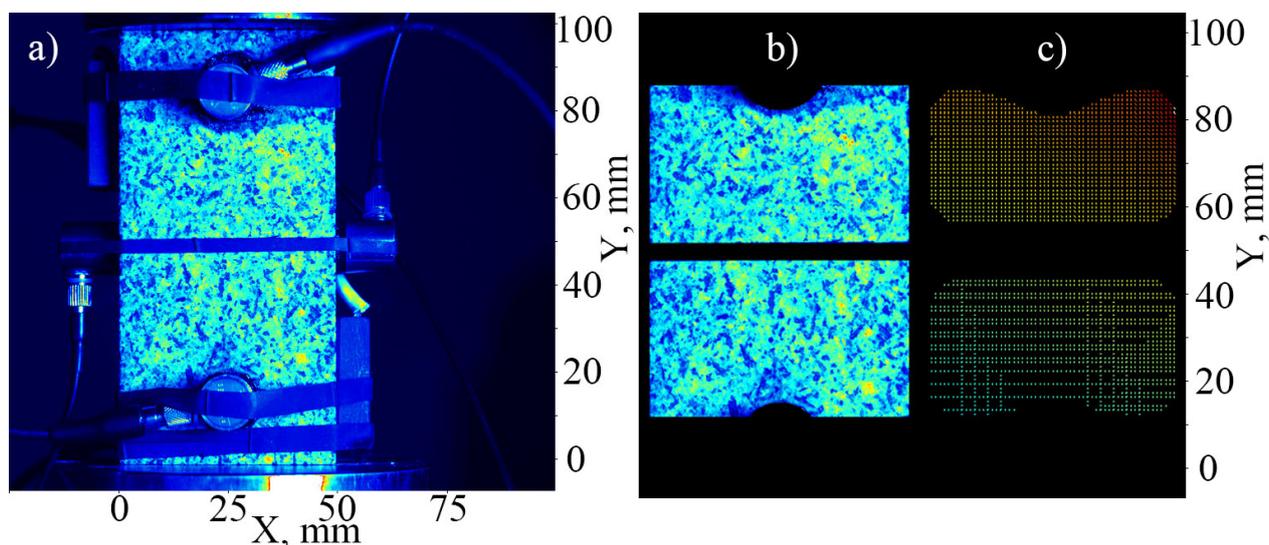


Рис. 2. *a* – оптическое изображение образца с камеры системы Strain Master; *b* – область обработки данных; *c* – пример поля векторов перемещений точек поверхности образца.

Fig. 2. *a* – an image of the specimen (taken by the Strain Master camera); *b* – data processing area; *c* – field of displacement vectors of points on the specimen surface.

воздействия электроимпульсами были построены кумулятивные распределения сигналов АЭ по энергиям (в логарифмическом масштабе по обеим осям).

Для анализа влияния электромагнитного поля на пространственное расположение источников АЭ лоцированные сигналы были рассортированы по времени регистрации по трем выборкам: произошедшие до начала воздействия, в период воздействия и после его завершения. Для каждой выборки были построены трехмерные распределения источников АЭ в объеме образца и двумерные распределения (проекции источников сигналов АЭ на соответствующие координатные плоскости).

3.2. ПОСТРОЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ LAVISION STRAIN MASTER

В течение эксперимента одна из граней образца снималась камерой высокого разрешения с частотой 1 Гц (рис. 2, *a*). Данные каждого эксперимента сохранялись в информационный проект, представляющий собой совокупность из оптических изображений (кадров) деформируемой поверхности образца. Каждый пиксель изображения содержит в себе информацию о его координатах (x , y) и значении интенсивности I .

Начальный этап обработки оптических изображений состоит в выборе области данных (с помощью наложения маски), определяющей площадь в исходном изображении, которая принимается во внимание при расчете векторов перемещений. В зависимости от задач, диапазоном обработки может быть выбрана как вся область исходного изображения, так и некоторый

фрагмент. Для улучшения качества расчета полей перемещений и деформации при обработке данных применялась маска, исключая краевые области вблизи ребер образцов (рис. 2, *b*).

При работе с горными породами, когда в исходном изображении имеются зоны с высокой интенсивностью фона (засвеченные области зерен, включений), использовались такие функции предварительной обработки исходных изображений, как инверсия (включает четыре метода), вычитание скользящего фона, вычитание смещения и нормализация интенсивности. Это позволяло получить исходное изображение однородной интенсивности всей области обработки для минимизации погрешности при вычислении векторов перемещений.

Следующим и одним из базовых этапов обработки является построение поля векторов перемещений точек поверхности методом корреляции изображений. Для этого область обработки исходного изображения разбивается на ячейки (так называемые окна опроса). Размер и форма ячейки могут быть выбраны оператором в зависимости от поставленной задачи. Для прямоугольной формы ячейки размер варьируется от 8×8 до 128×128 пикселей. Доступны и другие формы ячейки – круг, эллипсы с соотношением диаметров 2:1 и 4:1 и поворотом на угол от 0° до 180° с шагом 45° . Корреляционная функция работает по параметру интенсивности внутри каждой ячейки и проходит через весь пакет изображений с заданным перекрытием ячеек. Перекрытие определяет площадь наложения соседних ячеек друг на друга. Для определенных задач чем больше значение перекрытия, тем выше точность вычисления векторов. В программе реализо-

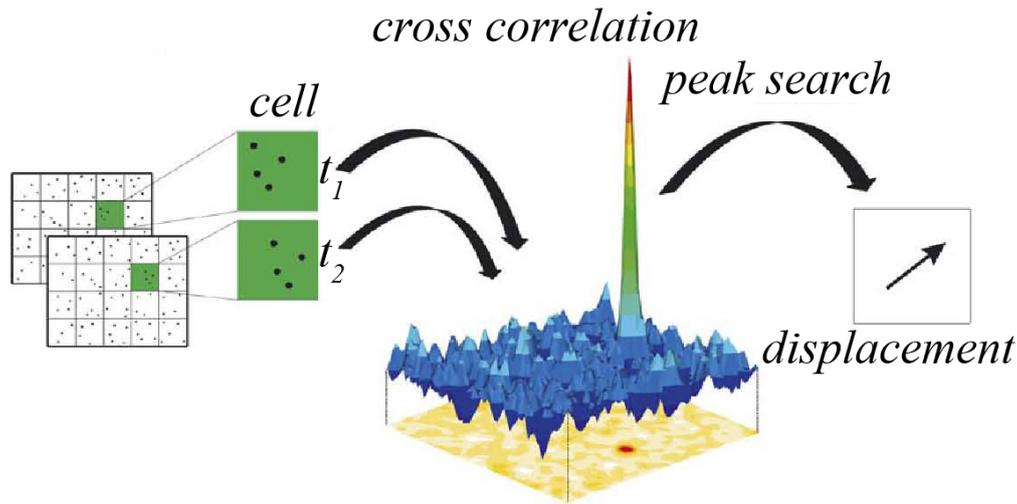


Рис. 3. Схема расчета векторов перемещений методом кросскорреляции.

Fig 3. Calculations of displacement vectors by the cross-correlation method.

ваны следующие методы корреляции – автокорреляция, кросскорреляция, последовательная автокорреляция, последовательная кросскорреляция, стереоавтокорреляция и стереокросскорреляция (виды стереокорреляции используются при съемке системой двух камер).

После сравнения возможностей данных методов был выбран метод кросскорреляции в режиме единичной итерации с размером ячейки 64×64 пикселя и формой круга. Суть метода кросскорреляции в том, что исходное изображение состоит из двух кадров. Первым кадром (кадр 1) является некоторое исходное изображение, а вторым кадром (кадр 2) – последующее. Алгоритм вычисляет взаимную корреляцию всех ячеек между кадрами 1 и 2. Максимумом в кросскорреляции является наиболее вероятный вектор смещения ячейки (рис. 3).

Данный корреляционный метод базируется на быстром преобразовании Фурье. Выражение используемой корреляционной функции представляется формулой:

$$C(dx, dy) = \sum_{x=0, y=0}^{x < n, y < n} I_1(x, y) I_2(x + dx, y + dy),$$

$$-\frac{n}{2} < dx, dy < \frac{n}{2}, \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – интенсивности 1 и 2-го кадра, n – размер ячейки. Максимальное значение C соответствует перемещению, которое определяет длину вектора и направление для каждой ячейки. Результатом расчета корреляционной функции для всей области обработки будет поле векторов перемещений (см. рис. 2, с).

Следующим этапом обработки является расчет полей деформации. Тензор деформации ε_{ij} определяется

как $\varepsilon_{ij} = \frac{du_i}{dr_j}$, $i, j = 1, 2, 3 = x, y, z$; u_i – компоненты

вектора перемещений, и r_1, r_2, r_3 – оси x, y, z соответственно. Исследование деформации проводилось на плоскости с расчетом продольной (по оси сжатия), поперечной (рис. 4), а также максимальной сдвиговой деформации.

Эволюция деформации в пространстве и во времени представлена в виде проектов – совокупности кадров, количество которых определяет частота съемки поверхности камерой (в данном случае 1 Гц), – полей деформации в каждый отдельный момент времени. Отдельно для максимальной сдвиговой, поперечной и продольной деформации рассчитывалась разность максимального и минимального значений деформации в каждый отдельный момент времени (в каждом кадре проекта), которая затем усреднялась по времени (количеству кадров). Это позволило проиллюстрировать в графическом виде пространственно-временную эволюцию деформации на поверхности образца для трех периодов времени – до, во время и после воздействия.

Для улучшения качества и наглядности представляемых результатов в графическом виде были применены различные способы постобработки полей деформации, включающие использование линейных и нелинейных фильтров.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим результаты эксперимента на образце гранита Каинда, диаграмма нагружения и периоды воздействия показаны на рис. 5. Напряжение разрушения (одноосное сжатие) составило 79 МПа. Результаты

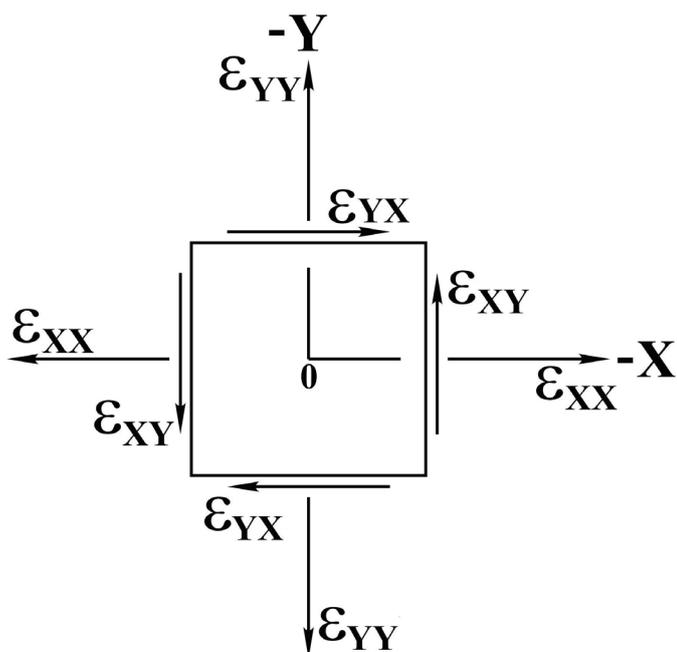


Рис. 4. Схема обозначений компонент тензора деформации, вычисляемых по данным системы LaVISION Strain Master.

Fig. 4. The legend of components of strain tensor calculated from data accumulated by LaVISION Strain Master System.

измерения акустоэмиссионной активности образца, полученной 6-канальной системой Amsy-5, показаны на рис. 6. Кратковременные приросты активности акустической эмиссии, инициируемые электрическими импульсами, были получены при нагрузках, равных 0.60, 0.84 и 0.94 от разрушающей.

Как видно из рис. 6, а, при уровне нагрузки 0.60 от разрушения фоновая активность до начала воздействия составляла 50 сигналов в секунду, кратковременный прирост АЭ, вызванный воздействием электроимпульсов, наступил с задержкой 480 с от начала подачи импульсов и в 39 раз превышает фоновый уровень. Аналогичная картина наблюдается при напряжении 0.84 от разрушения: естественный уровень акустической эмиссии при такой величине усилия выше – порядка 275 сигналов в секунду (рис. 6, б). С большей задержкой (28 мин) от начала воздействия наступает активизация дефектообразования, и активность АЭ достигает значения 6000 событий в секунду, после чего спадает до первоначального фонового уровня. Рис. 6, с демонстрирует пример, когда активность АЭ, инициированная воздействием электрическими импульсами, превышает активность при пригрузке в 18 раз, при этом задержка активизации АЭ составляет 55 мин от начала подачи на образец электроимпульсов. Следует отметить тот факт, что в течение этой сессии воздействия произошло формирование магистральной трещины. При пригрузке изменение напряжения на

образце составило 6 МПа (8.6 % от напряжения до пригрузки) и привело к увеличению активности от уровня 21 до 2750 с^{-1} . Отклик АЭ на воздействие при возникновении трещины оказался существенно большим – до $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

В дополнение к графикам активности, отражающим развитие во времени процесса дефектообразования (кратко, кинетику дефектов), были построены энергетические распределения количества сигналов АЭ. Результат показан на рис. 7. Распределение сигналов АЭ на рис. 7 для разных уровней напряжения может свидетельствовать о их соответствии линейному закону повторяемости (в логарифмических единицах), аналогичному закону Гутенберга-Рихтера в сейсмологии. Вместе с тем при меньших уровнях нагрузки (случаи а, б на рис. 7) можно отметить различия в угловых коэффициентах графиков распределений при электромагнитном воздействии и до него. При напряжениях 0.61 и 0.84 от разрушения различия в угловых коэффициентах (которые удобно называть b-фактором, по аналогии с законом Гутенберга-Рихтера) до, во время и после воздействия не более 25 %, при этом диапазон энергий сигналов АЭ не превышает 10^4 эВ. При увеличении напряжения до 0.94 от разрушения распределения сигналов по энергиям для событий АЭ, зарегистрированных до и после воздействия практически совпадают. Во время электромагнитного воздействия наблюдаются существенные отличия от предыстории как по b-фактору, так и по положению графика (т.е. диапазону энергий). Рис. 7, с, показывает, что в период воздействия регистрируются сигналы АЭ с энергиями, превосходящими 10^4 эВ, а угловой коэффициент графика энергетического распределения b меньше в два раза по сравнению с периодами без воздействий. Это свидетельствует, что на данной ступени нагрузки электромагнитное поле существенно изменило режим дефектообразования – в некоторой области образца локализация деформации привела к возникновению макротрещины.

Как было отмечено выше, для выявления различий в пространственном расположении источников сигналов при пригрузке и в течение воздействия была реализована локация источников сигналов АЭ (дефектов) в объеме образца. Расположение датчиков на образце в данном эксперименте показано на рис. 8, а. Наиболее информативным является распределение источников АЭ, полученное в измерительной сессии с электромагнитным воздействием при нагрузке 0.94 от максимальной. Рис. 8, б, демонстрирует выборку сигналов АЭ, для которых достоверно определены координаты его источника, т.е. надежно оценен показатель неопределенности локации (стандартное отклонение вычисленных расстояний от датчика АЭ до источника и этого расстояния в соответствии с зарегистрированной разницей времени прихода сигнала до разных датчиков в многоканальной системе регистрации), и которые не превышают 0.1 мм. В связи с тем, что уровень

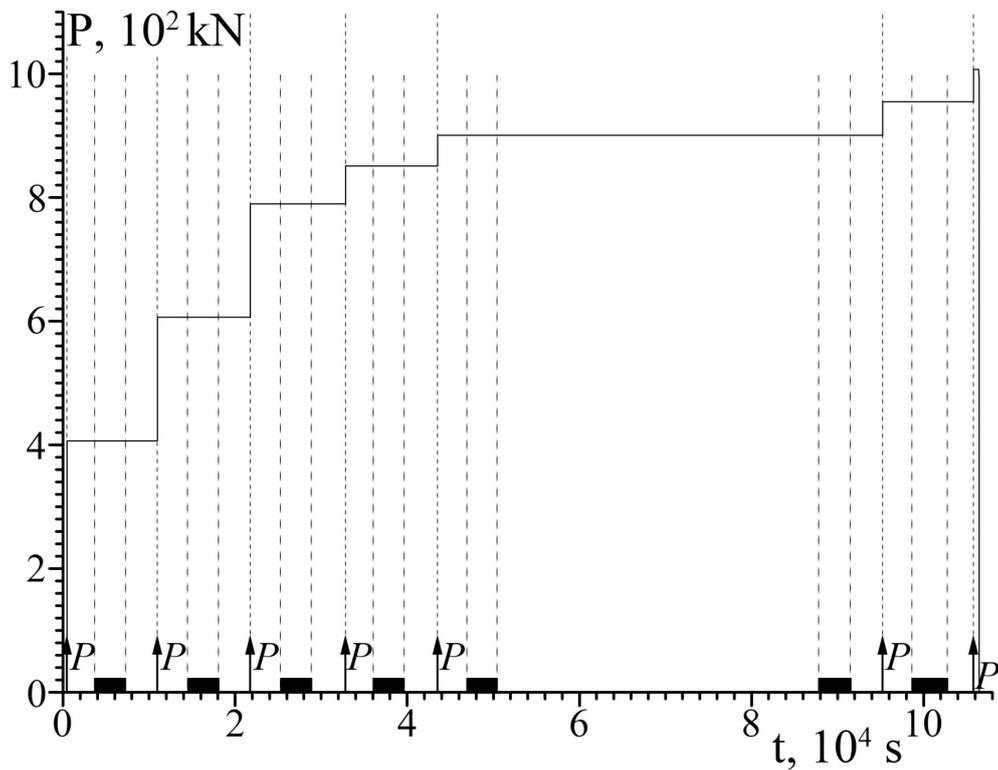


Рис. 5. Диаграмма нагружения образца гранита.

Черными барами показаны периоды воздействия электромагнитным полем. Стрелка с подписью P – момент пригрузки.

Fig. 5. Granite loading diagram.

Black bars show electromagnetic field impact periods. Arrows with P show load increase points.

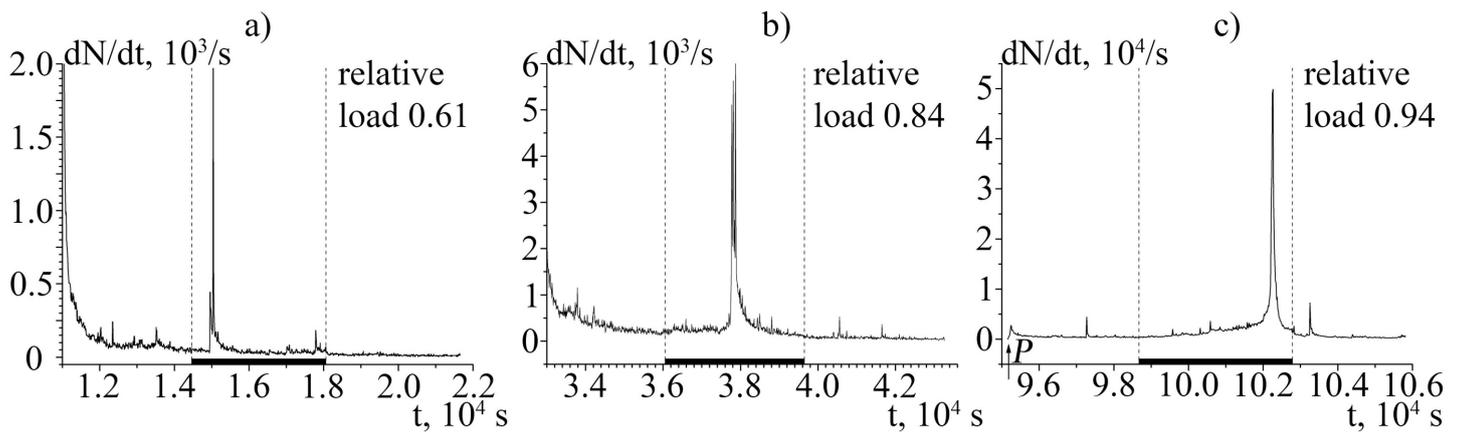


Рис. 6. Активность акустической эмиссии образца гранита Каинда, зарегистрированная 6-канальной системой Vallen Amsy-5, при различных значениях напряжения.

Черными линиями показаны интервалы воздействия электромагнитным полем. Стрелка с подписью P – момент пригрузки.

Fig. 6. Acoustic emission activity of the granite specimen from the Kainda deposit according to data recorded by Vallen Amsy-5 System (six channels) at various stress values.

Black bars show electromagnetic field impact periods. Arrows with P show load increase points.

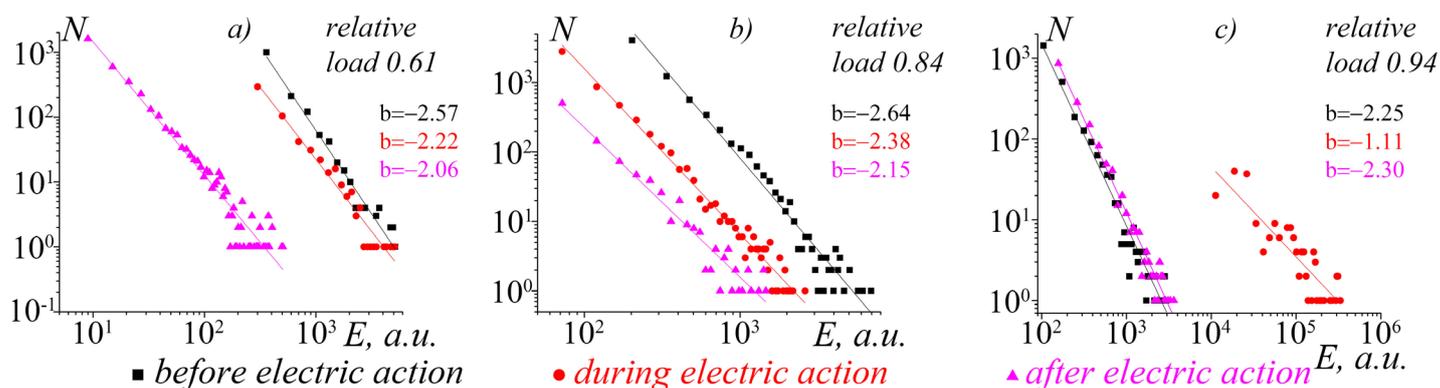


Рис. 7. Кумулятивные распределения сигналов акустической эмиссии гранита Каинда по энергиям при напряжениях: *a* – 0.61, *b* – 0.84 и *c* – 0.94 от разрушения; *b* – угол наклона графиков.

Fig. 7. Cumulative distribution of acoustic emission signals in the granite specimen from the Kainda deposit at stresses amounting to (a) 0.61, (b) 0.84, and (c) 0.94 fracturing stress value; *b* – slope angles of curves.

порогового значения, при превышении которого регистрировались акустоэмиссионные сигналы, был достаточно низок, определение координат сигналов, имеющих малое значение амплитуды, было затруднительно. Как видно из рис. 8, *b*, в период пригрузки и до воздействия источники сигналов АЭ (дефекты) диффузно рассеяны по всему объему образца. При подаче электрических импульсов число событий АЭ возрастает

и большая доля источников концентрируется в некоторой области, которая является зоной зарождения магистральной трещины (выделенная светлосерая область на рис. 8, *b*).

После того как воздействие было выключено, активность АЭ не превышала уровень 900 событий в секунду в течение часа, хотя трещина уже образовалась. При этом источники АЭ были сконцентрированы в

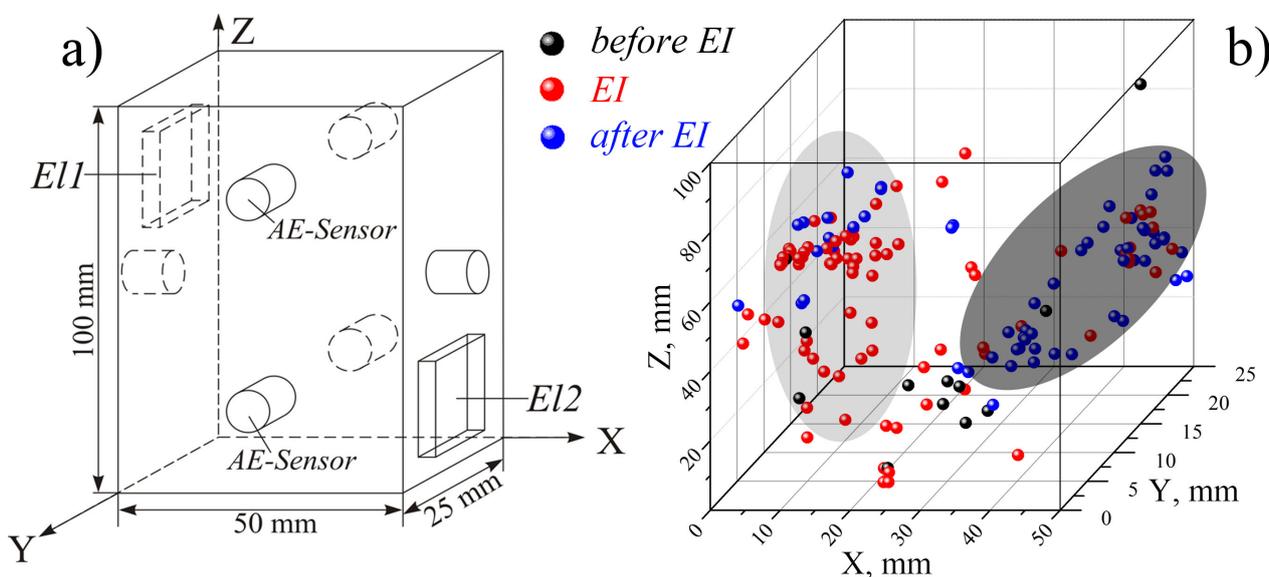


Рис. 8. Схема расположения датчиков АЭ и электродов воздействия (*a*) и пространственное распределение источников сигналов АЭ (*b*) при постоянном уровне сжимающего усилия 0.94 от разрушения.

Черными точками обозначены источники сигналов, возникших во время пригрузки и до начала воздействия, красными точками – произошедших во время воздействия, и синими – после воздействия.

Fig. 8. The scheme showing (a) locations of acoustic emission gauges and electrodes, and (b) spatial distribution of AE sources.

Compression is stable and amounts to 0.94 fracturing stress value. Points show sources of signals recorded in the following periods: black – load increase in the period before the impact; red – during the impact; blue – after the impact.

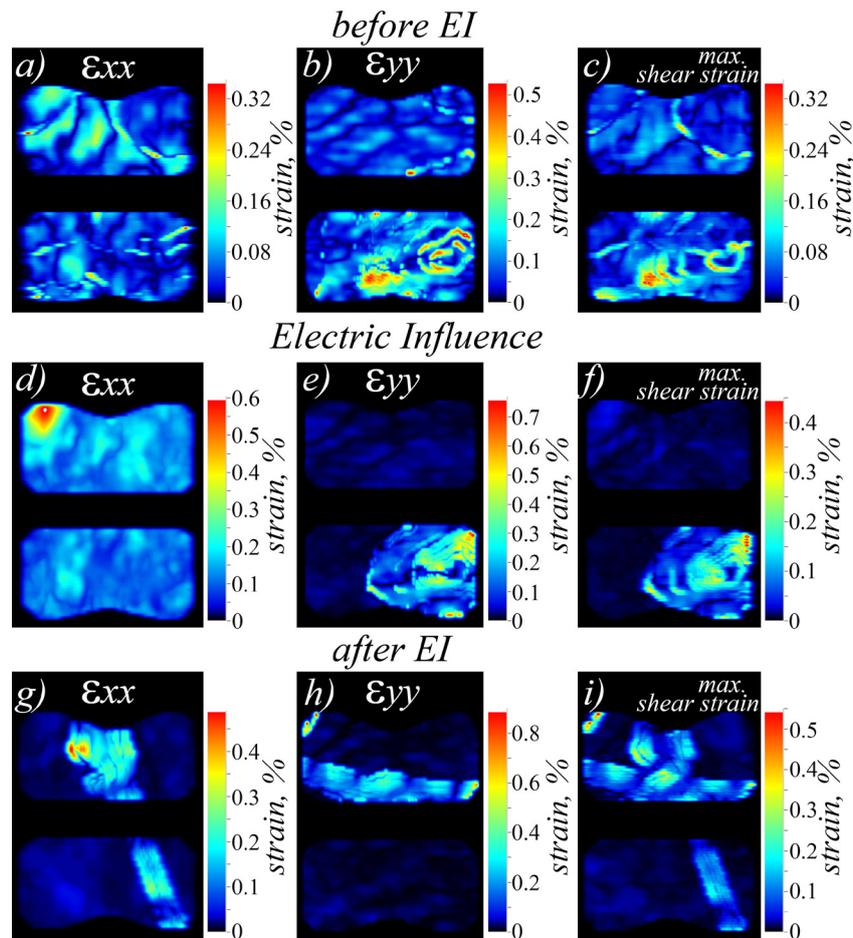


Рис. 9. Усредненное по времени поле разности между максимальным и минимальным значениями деформации на поверхности для поперечной (a, d, g), продольной (b, e, h) и максимальной сдвиговой (c, f, i) деформаций для трех периодов – a, b, c – периоды после пригрузки и до воздействия, d, e, f – для интервала воздействия и g, h, i – для периода времени после воздействия при напряжении 0.61 от разрушения.

Fig. 9. Time-averaged field of difference between maximum and minimum strain values on the specimen surface in case of (a, d, g) lateral, (b, e, h) axial and (c, f, i) maximum shear deformation in three time periods: a, b, c – after load increase and before impact; d, e, f – during impact; g, h, i – after impact when stress amounts to 0.61 faulting stress value.

другой области образца (рис. 8, b, темно-серая область). Этот рисунок демонстрирует, что при реакции среды на внешнее воздействие отмеченный выше прирост активности АЭ (см. рис. 6, c) произошел за счет событий, место расположения которых при образовании магистральной трещины сформировало зону («кластер»), в отличие от рассредоточенных источников АЭ, зарегистрированных до воздействия. Следующая за этим пригрузка оказалась последней – образец разрушился, причем одна из плоскостей разрыва располагалась в области сосредоточения дефектов после воздействия (синие треугольники).

В результате обработки оптических изображений грани образца были построены пространственно-временные распределения максимальной сдвиговой деформации, поперечной и продольной деформаций для трех интервалов времени – до воздействия, в период действия на образец электромагнитного поля и после

воздействия (рис. 9). В течение эксперимента процесс деформирования образца носит неоднородный характер и происходит в виде последовательно распространяющихся по поверхности образца медленных волн локализованной деформации [Zuev, 2011; Zuev et al., 2012]. При этом наблюдаются волны локализованной поперечной деформации (волны, в которых частицы материала перемещаются в направлении, перпендикулярном направлению сжатия) и волны локализованной продольной (осевой) деформации (рис. 9). Качественный анализ деформационных волн показал, что изменение уровней локализованной продольной и поперечной деформаций происходит независимо друг от друга. На качественном уровне можно отметить, что, возможно из-за наличия неоднородности поверхности (крупные зерна, прожилки), существует градиент перемещения частиц материала в зонах (волнах) локализованной деформации. Эволюция распространения

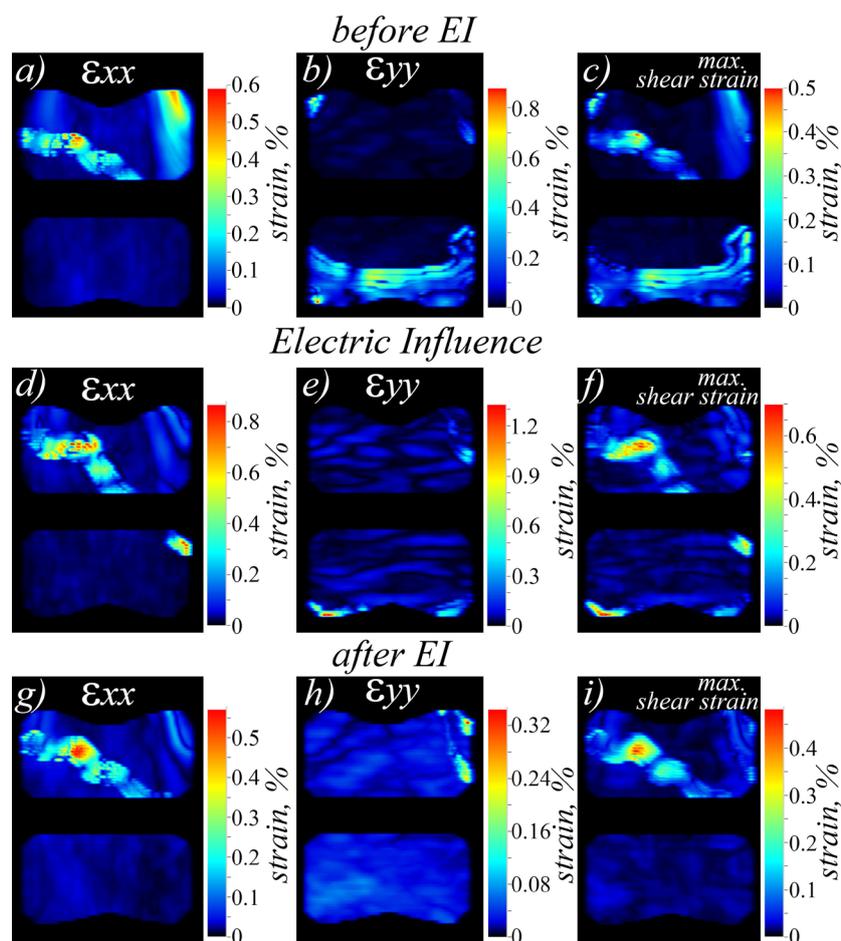


Рис. 10. Усредненное по времени поле разности между максимальным и минимальным значениями деформации на поверхности для поперечной (a, d, g), продольной (b, e, h) и максимальной сдвиговой (c, f, i) деформаций для трех периодов – a, b, c – периоды после пригрузки и до воздействия, d, e, f – для интервала воздействия и g, h, i – для периода времени поле воздействия при напряжении 0.84 от разрушения.

Fig. 10. Time-averaged field of difference between maximum and minimum strain values on the specimen surface in case of (a, d, g) lateral, (b, e, h) axial and (c, f, i) maximum shear deformation in three time periods: a, b, c – after load increase and before impact; d, e, f – during impact; g, h, i – after impact when stress amounts to 0.84 faulting stress value.

волн локализованной деформации по поверхности образца наглядно продемонстрирована на усредненных по времени полях разности максимального и минимального значений для продольной, поперечной и максимальной сдвиговой деформации.

До подачи электрических импульсов на образец на поверхности наблюдалось распространение деформационных волн: поперечной (из верхней области образца в нижнюю, рис. 9, a) и продольной, локализованной и перемещающейся в нижней части образца (фронт волны прерывистый, рис. 9, b). В период воздействия поле поперечной деформации демонстрирует по большей части однородную картину распределения с максимумом в верхней левой области (рис. 9, d) и наличие только волны локализованной продольной деформации, как и ранее перемещающейся в нижней части образца (рис. 9, e). После выключения источника воздействия наблюдается совершенно иная картина – локали-

зация деформационной волны ϵ_{yy} субгоризонтальна (рис. 9, g), а максимум деформации ϵ_{xx} сконцентрирован субвертикально (рис. 9, h).

Распределение деформации (продольной, поперечной и максимальной сдвиговой) при нагрузке 0.84 от разрушения представлено на рис. 10. В правой верхней области до воздействия наблюдается зона с максимумом деформации ϵ_{xx} (рис. 10, a), воздействие электрическими импульсами приводит к уменьшению деформации в этой области (рис. 10, d). Также электромагнитное воздействие вызвало изменение локализации деформационной волны ϵ_{yy} (рис. 10, e). Спустя некоторое время после выключения источника электроимпульсов в верхней правой области образца произошла локализация продольной деформации (рис. 10, h).

Для количественной оценки степени влияния электрических импульсов на процесс деформирования были проведены дополнительные расчеты значения

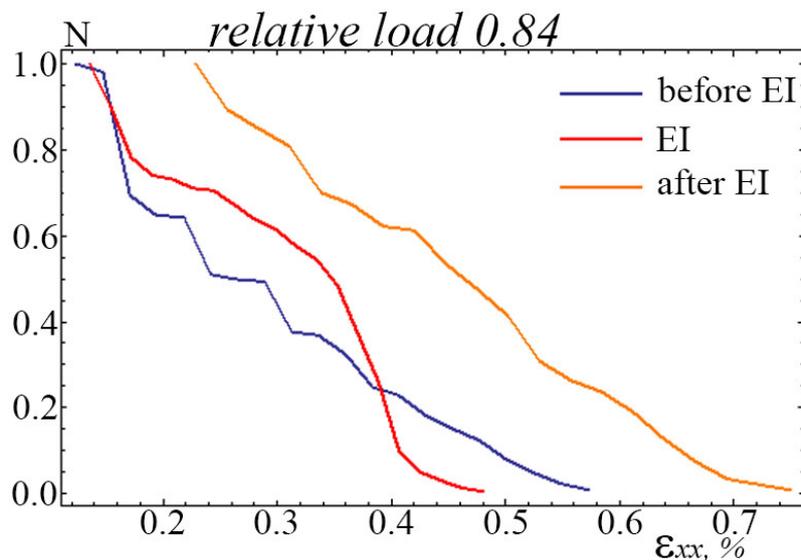


Рис. 11. Кумулятивные распределения деформации в волне локализации деформации при нагрузке 0.84 от максимальной.

N – относительное количество точек, приведенное к общему числу рассматриваемых точек.

Fig. 11. Cumulative distribution of deformation in the strain localization wave when load amounts to 0.84 maximum stress value.

N – fraction of points, which is reduce to the total number of points under study.

деформации ϵ_{xx} для трех периодов – до воздействия, в течение воздействия и после него (рис. 10, a, d, g) при уровне нагрузки 0.84 от разрушения. Методика вычислений состояла в следующем: для некоторого фиксированного одномерного профиля, расположенного вертикально в случае исследования поля поперечных деформации и горизонтально – в случае поля продольных деформаций, строилось изменение величины деформации по его длине. Максимум этой зависимости принадлежал волне локализованной деформации. Для каждого из трех временных периодов определялся набор значений максимумов деформации вдоль профиля, каждое из которых соответствовало своему моменту времени. Далее на основе каждого из наборов значений для каждого из трех периодов – до воздействия, в течение воздействия и после него – строилось кумулятивное распределение деформации внутри волны больше некоторой величины. Форма кумулятивного распределения позволяет оценить характер изменения деформации в конкретной точке волны локализации с течением времени.

На рис. 11 представлены кумулятивные распределения максимума поперечной деформации для трех временных периодов при нагрузке 0.84 от максимальной. Из рисунка видно, что характер распределения деформации до воздействия и после него сходен, а в период подачи электрических импульсов наблюдается убывание максимальной наблюдаемой деформации от 0.58 % до воздействия до уровня 0.48 %. После воздействия уровень деформации выше, что свидетельствует о том, что электромагнитное поле вызывает из-

менения напряженно-деформированного состояния среды.

На стадии предразрушения при напряжении 0.94 от разрушения, как было отмечено ранее, электромагнитное поле спровоцировало образование магистральной трещины на снимаемой поверхности (рис. 12). Как видно, максимум деформации при формировании макроразрыва наблюдается в поперечном направлении. На данном уровне нагрузки также было зафиксировано наличие волн локализованной деформации, в которых были построены кумулятивные графики распределения деформации для волны ϵ_{xx} в периоды до и во время воздействия (для выявления реакции среды на внешнее воздействие). Была применена аналогичная методика, использованная для построения кумулятивных распределений максимума деформации в различные моменты времени при напряжении 0.84 от разрушения. Результаты оценок представлены на рис. 13.

Как показано на рис. 13, изменение максимума деформации происходит так же, как и на предыдущей ступени нагрузки, нелинейно для всех периодов – как во время воздействия, так и в его отсутствие. Однако характеры распределения до воздействия и во время воздействия различаются. Значения максимума деформации до воздействия выше, в то время как при подаче электрических импульсов наблюдается резкое убывание уровня деформации. Таким образом, влияние электроимпульсов на процесс деформирования образца проявляется в распределениях поверхностной макродеформации, так же как и объемной, которая рассматривалась выше с помощью косвенного метода – по

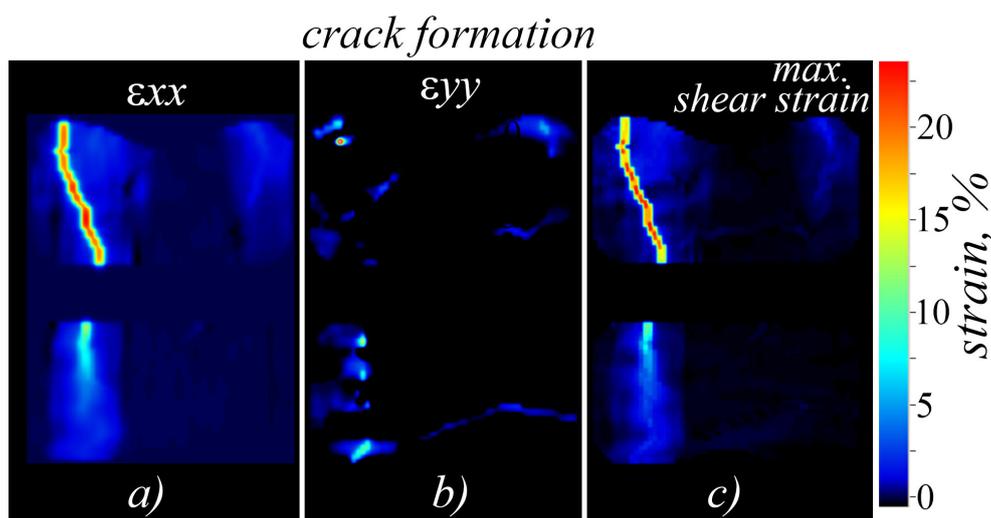


Рис. 12. Характер локализации деформации на поверхности для поперечной (а), продольной (б) и максимальной сдвиговой (с) деформаций в момент формирования макроразрыва при напряжении сжатия 0.94 от разрушения.

Fig. 12. Strain localization on the surface in case of (a) lateral, (b) axial and (c) maximum shear deformation at the moment of macrofault occurrence when compression amounts to 0.94 fracturing stress value.

данным АЭ. Напомним, что по результатам расчета месторасположения источников акустической эмиссии (дефектов) была выявлена область локализации дефектов в зоне зарождающейся магистральной трещины (см. рис. 8, б).

Обычно, при отсутствии электромагнитного поля вскоре после возникновения трещины с сантиметровыми размерами происходит разрушение образца. В данном эксперименте этого не произошло (образец разрушился только на следующей ступени сжатия), по всей видимости, из-за воздействия электроимпульсов. Стоит подчеркнуть, что наблюдение в данном эксперименте стабилизации длины трещины в присутствии электромагнитного поля – не единственный прецедент. В монографии [Finkel, 1977] описаны наблюдения торможения роста трещины в кристаллах LiF электромагнитным полем. Стабилизация макротрещины в образце габбро при воздействии электроимпульсов конденсаторного разрядника (напряженность поля до $4 \cdot 10^4$ В/м, напряжение одноосного сжатия 0.98 от уровня разрушения) наблюдалась и в эксперименте, проведенном на Научной станции РАН [Bogomolov et al., 2011, с. 180–182].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты испытаний образцов горных пород на одноосное сжатие в присутствии электромагнитного поля, которые проведены в лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН. В экспериментах использовалась многоканальная регистрация акустической эмиссии, позволяющая определять координаты источников АЭ. Впервые при исследовании

дополнительных электромагнитных воздействий применена система оптической регистрации деформации образца с высоким разрешением во времени и пространстве.

Получены результаты, раскрывающие новые аспекты влияния электромагнитного поля на кинетику микротрещин (по данным АЭ). Показано, что в некоторых случаях стимулированная электромагнитным полем активность АЭ в десятки раз превышает ее фоновый уровень до воздействия. Это существенно дополняет результаты предыдущих экспериментов (обобщение в [Bogomolov et al., 2011]), в которых под воздействием электрических импульсов примерно вдвое меньшей напряженности поля наблюдались акустоэмиссионные отклики среды с приростом активности АЭ порядка 20 %.

Результаты локализации источников АЭ (дефектов) продемонстрировали, что на стадии диффузного (рассредоточенного) накопления дефектов воздействие электромагнитного поля приводит к перераспределению и кластеризации дефектов к области будущего макроразрыва.

Анализ энергий акустоэмиссионных сигналов показал, что кумулятивные распределения сигналов АЭ по энергиям соответствуют закону повторяемости, по аналогии с законом Гутенберга-Рихтера для землетрясений. При нагрузках, близких к разрушению, электромагнитное воздействие инициирует сигналы АЭ с энергиями, в два раза большими, нежели энергии сигналов, регистрируемых в отсутствие поля. Это, а также различие угловых коэффициентов графических энергетического распределения в периоды во время воздействия и в его отсутствие позволяет говорить о значи-

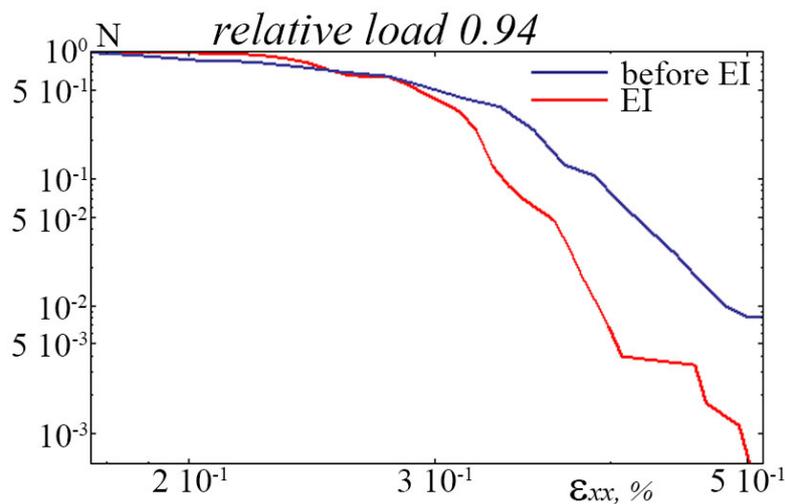


Рис. 13. Кумулятивные распределения деформации в волне локализации деформации при величине нагрузки 0.94 от максимальной.

Fig. 13. Cumulative distribution of deformation in the strain localization wave when load amounts to 0.94 maximum stress value.

мости вклада электромагнитного поля в режим деформации.

С помощью системы оптической диагностики LaVision Strain Master установлено, что процесс деформирования образца носит неоднородный характер и происходит в виде последовательно распространяющихся по поверхности образца медленных волн локализованной деформации, что дополняет ранее полученные результаты при растяжении и сжатии ряда горных пород [Pantelev et al., 2013b, 2013c, 2013d]. Максимумы поперечной и продольной деформации имеют различную пространственную локализацию.

Анализ оптических изображений поверхности нагруженного образца подтвердил гипотезу, выдвинутую авторами в предыдущих работах, о том, что внешнее электромагнитное воздействие вносит существенные

изменения в напряженно-деформированное состояние образца вследствие влияния на его дефектную подсистему. Дополнительным доказательством этого является экспериментально обнаруженная возможность как инициирования очага макроразрушения внешним импульсным электровоздействием, так и стабилизации роста зародыша такого очага в течение воздействия, что согласуется с ключевыми результатами разрабатываемой в ИМСС УрО РАН статистической модели твердого тела с дефектами [Pantelev et al., 2011, 2012, 2013a].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-90702_мол_рф_нр) и гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-6741.2013.1).

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Arakawa M., Petrenko V.F., Chen C., 2003. Effect of direct-and alternating-current electric fields on friction between ice and metals. *Canadian Journal of Physics* 81 (1–2), 209–216. <http://dx.doi.org/10.1139/p03-020>.
- Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., 2008. Estimation of the triggering effect energy in relation to model sample failure. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 44 (1), 69–72. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351308010096>.
- Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Klyuchkin V.N., 2006. On the structure of acoustic emission of model samples in response to an external energy action. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42 (10), 824–829. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306100065>.
- Bogomolov L.M., Avagimov A.A., Sychev V.N., Sycheva N.A., Zeigarnik V.A., Bragin V.D., 2005. On manifestation of electrically triggered seismicity at the Bishkek test site (on the way toward active seismo-electrical monitoring). In: S.V. Goldin (Ed.), *Active geophysical monitoring of the Earth's lithosphere*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 112–116 (in Russian) [Богомолов Л.М., Авагимов А.А., Сычев В.Н., Сычева Н.А., Зейгарник В.А., Брагин В.Д. О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмоэлектрическому мониторингу) // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли / Ред. С.В. Гольдин. Новосибирск: СО РАН, 2005. С. 112–116].
- Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Zakupin A.S., Novikov V.A., Okunev V.I., 2004. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics* 47 (1), 65–72. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-3259>.

- Bogomolov L., Zakupin A., 2008. Do electromagnetic pulses induce the relaxation or activation of microcracking rate in loaded rocks? *Solid State Phenomena* 137, 199–208.
- Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Sychev V.N., 2011. Electric Impacts on the Earth Crust and Variations of Weak Seismicity. LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 408 p. (in Russian) [Богомолов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н. Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности. Саарбрюкен: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 408 с.].
- Chelidze T., Gvelesiani A., Varamashvili N., Devidze M., Chikhladze V., Chelidze Z., Elashvili M., 2004. Electromagnetic initiation of slip: laboratory model. *Acta Geophysica Polonica* 52 (1), 49–62.
- Chelidze T., Lursmanashvili O., 2003. Electromagnetic and mechanical control of slip: laboratory experiments with slider system. *Nonlinear Processes in Geophysics* 10 (6), 557–564. <http://dx.doi.org/doi:10.5194/npg-10-557-2003>.
- Chelidze T., Varamashvili N., Devidze M., Tchelidze Z., Chikhladze V., Matcharashvili T. 2002. Laboratory study of electromagnetic initiation of slip. *Annals of Geophysics* 45 (5), 587–598. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-3532>.
- Finkel V.M., 1977. Physical Basis of Fracture Deceleration. Metallurgia, Moscow, 359 p. (in Russian) [Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия, 1977. 359 с.].
- Freund F., 2000. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks. *Journal of Geophysical Research* 105 (B5), 11001–11020. <http://dx.doi.org/10.1029/1999JB900423>.
- Frid V., Rabinovitch A., Bahat D., 2003. Fracture induced electromagnetic radiation. *Journal of Physics D: Applied Physics* 36 (13), 1620–1628. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/36/13/330>.
- Grigorov O.N., 1973. Electrokinetic Phenomena. LGU, Leningrad, 196 p. (in Russian) [Григоров О.Н. Электрокинетические явления. Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. 196 с.].
- Kocharyan G.G., Kulyukin A.A., Pavlov D.V., 2006. Specific dynamics of interblock deformation in the Earth's crust. *Russian Geology and Geophysics* 47 (5), 667–681.
- Manzhikov B.Ts., Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Sychev V.N., 2001. Structure of acoustic and electromagnetic emission signals on axial compression of rock specimens. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 42 (10), 1690–1696 (in Russian)
- Mugele F., Klingner A., Buchrle J., 2005. Electrowetting: a convenient way to switchable wettability patterns. *Journal of Physics Condensed Matter* 17 (9), S559. <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/17/9/016>.
- Pantelev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B., 2011. Self-similarity mechanisms of damage growth in solids experiencing quasi-brittle fracture // *Computational Continuum Mechanics* 4 (1), 90–100. <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2011.4.1.8>.
- Pantelev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B., 2012. Nonlinear dynamics of the blow-up structures in the ensembles of defects as a mechanism of formation of earthquake sources. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (6), 504–515. <http://dx.doi.org/10.1134/s1069351312060055>.
- Pantelev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B., 2013a. Model of geomedia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (1), 37–51 (in Russian) [Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Модель геосреды с дефектами: коллективные эффекты развития несплошностей при формировании потенциальных очагов землетрясений // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 1. С. 37–51]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0090>.
- Pantelev I.A., Uvarov S.V., Naimark O.B., 2013b. Spatio-temporal forms of strain localization in tension of sylvinit. In: Proceedings of the 5th International conference of young scientists and students “Modern equipment and technologies in research”. Bishkek, p. 208–211 (in Russian) [Пантелеев И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Пространственно-временные формы локализации деформации при растяжении сильвинита // *Материалы докладов 5-й международной конференции молодых ученых и студентов «Современная техника и технологии в научных исследованиях»*. Бишкек, 2013. С. 208–211].
- Pantelev I.A., Uvarov S.V., Naimark O.B., Evseev A.V., Pan'kov I.L., 2013c. Peculiarities of spatio-temporal strain localization and tensile fracture of sylvinit. In: Proceedings of the Russian National scientific conference of graduate students and young scientists with scientific school elements “Miners’ Shift 2013”. Novosibirsk, p. 145–148 (in Russian) [Пантелеев И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б., Евсеев А.В., Паньков И.Л. Особенности пространственно-временной локализации деформации и разрушения при растяжении сильвинита // *Сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена-2013»*. Новосибирск, 2013. С. 145–148].
- Pantelev I.A., Uvarov S.V., Naimark O.B., Evseev A.V., Pan'kov I.L., Asanov V.A., 2013d. Experimental investigation of strain localization and rock fracture under direct uniaxial tension. In: Proceedings of the International Conference “Hierarchical systems of organic and inorganic nature”. ISPMS SB RAS. Tomsk, p. 386–389 (in Russian) [Пантелеев И.А., Плехов О.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б., Евсеев А.В., Паньков И.Л., Асанов В.А. Экспериментальное исследование локализации деформации и разрушения горных пород в условиях прямого одноосного растяжения // *Иерархически организованные системы живой и неживой природы: Материалы международной конференции, Томск, 9–13 сентября 2013 г.* Томск: ИФПМ СО РАН, 2013. С. 386–389].
- Petrenko V.F., 1994. The effect of static electric fields on ice friction. *Journal of Applied Physics* 76 (2), 1216–1219. <http://dx.doi.org/10.1063/1.357850>.
- Shpeizman V.V., Zhoga L.V., 2005. Kinetics of failure of polycrystalline ferroelectric ceramics in mechanical and electric fields. *Physics of the Solid State* 47 (5), 869–875. <http://dx.doi.org/10.1134/1.1924847>.

- Smirnov V.B., Zavyalov A.D., 2012. Seismic response to electromagnetic sounding of the Earth's lithosphere. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (7–8), 615–639. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351312070075>.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., 2003. Physics of Earthquakes and Precursors. Nauka, Moscow, 270 p. (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.].
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Koltsov A.V., Kruglov A.A. et al., 2006. The effect of water injection on acoustic emission in a long-term experiment. *Russian Geology and Geophysics* 47 (5), 608–621.
- Stavrogin A.N., Protosenya A.G., 1979. Plasticity of Rocks. Nedra, Moscow, 301 p. (in Russian) [Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979. 301 с.].
- Surkov V.V., 2000. Electromagnetic Effects during Earthquakes and Explosions. MIFI, Moscow, 237 p. (in Russian) [Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах М.: МИФИ, 2000. 237 с.].
- Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W., 2009. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer, 316 p.
- Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson W.F., McNeil S.R., 1983. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing* 1 (3), 133–139. [http://dx.doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](http://dx.doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1).
- Sychev V.N., Avagimov A.A., Bogomolov L.M., Zeigarnik V.A., Sycheva N.A. et al., 2008. On trigger effects of electromagnetic pulses on minor seismicity. In: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior. Publishing House of Mining Institute of SB RAS, Novosibirsk, p. 179–188 (in Russian) [Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М., Зейгарник В.А., Сычева Н.А. и др. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: Изд-во Института горного дела СО РАН, 2008. С. 179–188].
- Sychev V.N., Bogomolov L.M., Rybin A.K., Sycheva N.A., 2010. Influence of Earth's crust electromagnetic soundings on seismicity at the Bishkek geodynamic test site. In: V.V. Adushkin, G.G. Kocharyan (Ed.), Trigger effects in geosystems. GEOS, Moscow, p. 316–326 (in Russian) [Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона // Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2010. С. 316–326].
- Tarasov N.T., 1997. Variations of the Earth's crust seismicity under electrical action. *Doklady AN* 353 (4), 542–545 (in Russian) [Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Доклады АН. 1997. Т. 353. № 4. С. 542–545].
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., 1999. Influence of strong hydrodynamic pulses on seismicity of Central Asia and Kazakhstan. *Vulkanologiya i Seismologiya* (4–5), 152–160 (in Russian) [Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160].
- Urusovskaya A.A., Alshitz V.I., Bekkauer N.N., Smirnov A.E., 2000. Deformation of NaCl crystals under combined action of magnetic and electric fields. *Physics of the Solid State* 42 (2), 274–276. <http://dx.doi.org/10.1134/1.1131196>.
- Yakovitskaya G.E., 2008. Methods and Technological Means for Diagnostics of Rocks Critical State on the Basis of Electromagnetic Emission. Parallel, Novosibirsk, 315 p. (in Russian) [Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. Новосибирск: Параллель, 2008. 315 с.].
- Zakupin A.S., 2010. Geoacoustic observations in boreholes in the territory of the Bishkek geodynamic test site. In: V.V. Adushkin, G.G. Kocharyan (Eds.), Trigger Effects in Geosystems. GEOS, Moscow, p. 277–285 (in Russian) [Закупин А.С. Геоакустические наблюдения в скважинах на территории Бишкекского геодинамического полигона // Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2010. С. 277–285].
- Zakupin A.S., Alad'ev A.V., Bogomolov L.M., Borovsky B.V., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Sycheva N.A., 2006b. Relationship between electric polarization and acoustic emission of geomaterials specimens under uniaxial compression. *Vulkanologiya i Seismologiya* (6), 22–33 (in Russian) [Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Ильичев П.В., Сычев В.Н., Сычева Н.А. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 22–33.]
- Zakupin A.S., Avagimov A.A., Bogomolov L.M., 2006a. Responses of acoustic emission in geomaterials to the action of electric pulses under various values of the compressive load. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42 (10), 830–837. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351306100077>.
- Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. et al., 1977. On prediction of rock fracturing. *Izvestiya AN SSSR, seriya Fizika Zemli* (6), 11–18 (in Russian) [Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. О прогнозировании разрушения горных пород // Известия АН СССР, серия Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18].
- Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. et al., 1980. Concentration criterion of volumetric fracturing of solids. In: Physical processes in Earthquake Sources. Nauka, Moscow, p. 78–86 (in Russian) [Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 78–86].
- Zuev L.B., 1990. Physics of Electroplasticity of Alkali Halide Crystals. Novosibirsk, Nauka, 120 p. (in Russian) [Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галогидных кристаллов. Новосибирск: Наука, 1990. 120 с.].
- Zuev L.B., 2011. Autowave model of plastic flow. *Physical Mesomechanics* 14 (5–6), 275–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physme.2011.12.006>.

Zuev L.B., Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Zhigalkin V.M., 2012. Laboratory observation of slow movements in rocks. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* 53 (3), 467–470. <http://dx.doi.org/10.1134/S0021894412030200>.



Мубассарова Виргиния Анатольевна, м.н.с.
Научная станция РАН
720049, Бишкек-49, Научная станция РАН, Кыргызстан
✉ e-mail: helmik69@rambler.ru

Mubassarova, Virginia A., Junior Researcher
Research Station of the Russian Academy of Sciences
Bishkek 720049, Research Station of the RAS, Kyrgyzstan
✉ e-mail: helmik69@rambler.ru



Богомолов Леонид Михайлович, докт. физ.-мат. наук, в.н.с., заместитель директора по научной работе
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, Россия
e-mail: bogomolov@imgg.ru

Bogomolov, Leonid M., Doctor of Physics and Mathematics, Lead Researcher, Deputy Director
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS
1b Nauka street, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia
e-mail: bogomolov@imgg.ru



Закупин Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией
Научная станция РАН
720049, Бишкек-49, Научная станция РАН, Кыргызстан
e-mail: dikii79@mail.ru

Zakupin, Aleksandr S., Candidate of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
Research Station of the Russian Academy of Sciences
Bishkek 720049, Research Station of the RAS, Kyrgyzstan
e-mail: dikii79@mail.ru



Пантелеев Иван Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, м.н.с.
Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. ак. Королева, 1, Россия
Тел.: (342) 2378312; e-mail: pia@icmm.ru

Panteleev, Ivan A., Candidate of Physics and Mathematics, Junior Researcher
Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of RAS, Perm, Russia
1 Academician Korolev street, Perm 614013, Russia
Tel.: (342) 2378312; e-mail: pia@icmm.ru



Наймарк Олег Борисович, докт. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией
Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. ак. Королева, 1, Россия
Тел.: (342) 2378312; e-mail: naimark@icmm.ru

Naimark, Oleg B., Doctor of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of RAS, Perm, Russia
1 Academician Korolev street, Perm 614013, Russia
Tel.: (342) 2378312; e-mail: naimark@icmm.ru