

Влияние электрического тока на акустический отклик механически нагруженных образцов искусственного песчаника

В. А. Зейгарник, В. Н. Ключкин, В. И. Окунев

В статье представлены результаты исследования поведения образцов и динамики трещинообразования в образцах искусственного песчаника при воздействии на них импульсов электрического тока в условиях одноосного сжатия. Постановка таких экспериментов по-прежнему актуальна в плане решения вопроса о возможности активного воздействия на сейсмический режим или даже разрядки тектонических напряжений. Эксперименты проводились на рычажном прессе, позволяющем реализовать режим квазистатического состояния. В большинстве случаев было отмечено влияние электрического воздействия на поток и интенсивность акустической эмиссии как собственно на этапе электровоздействия, так и непосредственно за ним (эффект последействия). На этапе электровоздействия заметно меняется ход кривых таких измеряемых параметров, как усилие нагрузки, поперечный и продольный размеры, температура поверхности образца. Поскольку результаты получены при электровоздействии постоянным током, встает вопрос о правомочности ряда гипотез о механизме такого триггерного эффекта, акцентирующих внимание на важном значении повторяющейся последовательности электрических импульсов с крутыми фронтами.

Ключевые слова: триггерный эффект, электровоздействие, акустическая эмиссия, трещинообразование, одноосное сжатие.

Введение

К настоящему времени накоплен значительный объем данных, полученных в условиях натурального (полевого) эксперимента, свидетельствующих о влиянии мощных импульсов тока на сейсмический режим. Эти результаты получены на Гармском и Бишкекском полигонах, где проводились регулярные зондирования земной коры с использованием как МГД-генераторов, так и электроимпульсных систем, питающихся от линий электропередач [1–8]. Как небезосновательно утверждают авторы этих работ, наблюдаемый эффект увеличения числа относительно слабых землетрясений в результате электромагнитного воздействия является статистически значимым и может быть интерпретирован как инициированная дополнительная разрядка тектонических напряжений.

Обнаруженное явление с полным основанием следует отнести к наведенной сейсмичности, когда среда, находившаяся в неустойчивом состоянии, реагирует на слабые внешние возмущения, выполняющие роль триггера. Природа этого явления до сих пор не установлена, тем более что действующие в этих случаях электромагнитные поля являются весьма слабыми. В силу этой и ряда других причин проблема электромагнитных воздействий в большей степени исследуется в лабораторных условиях, хотя определенный вклад, по-видимому, может внести и численное моделирование (в этой связи в качестве примера можно упомянуть работы [9, 10]).

Значительное число исследователей, если не большинство, считают, что наиболее распространенным механизмом сильных землетрясений является смещение по уже существующему разлому, а вот режимы этого движения могут быть различными, и они зависят от множества факторов. Вместе с тем, существуют и иные сценарии накопления повреждений в объеме среды, которые описываются в терминах самоорганизованной критичности, фазовых переходов. Согласно этим представлениям, в среде происходит накопление повреждений, связывание их между собой с образованием трещин более высокого ранга, вплоть до магистральных разломов.

Зейгарник Владимир Альбертович, с.н.с., д.т.н.

Ключкин Вадим Николаевич, в.н.с., к.т.н.

Окунев Владимир Иванович, с.н.с.

Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, Ижорская, 13, стр. 2.

E-mail: zeigarnik@ihed.ras.ru, klvn38@mail.ru, viok56@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2018 г.

© Зейгарник В. А., Ключкин В. Н., Окунев В. И., 2018

Скорее всего, в природе могут реализовываться оба сценария, хотя один из них и может быть преобладающим. В работе [11] фактически не исключается возможность обоих сценариев, поскольку автор утверждает, что «само землетрясение состоит в разрушении одной плотной упаковки блоков и образовании новой плотной упаковки...». В этой же работе С. В. Гольдин прямо говорит о своих сомнениях в том, что все землетрясения развиваются по одному и тому же сценарию.

Само по себе физическое моделирование, скорее всего, никогда в полной мере не сможет воспроизводить механические, структурные и термодинамические условия, характерные для реальных очаговых зон и окружающего их пространства. Тем не менее, в соответствующей литературе преобладает точка зрения, что многие экспериментальные факты свидетельствуют о подобии картин разрушения на различных масштабных уровнях и в различных условиях испытания образцов. Это касается, прежде всего, вопросов кинетики развития разрушения, характеризующегося определенной стадийностью, группирования (кластеризации) разрывных нарушений на различных масштабных уровнях, реакции на изменения флюидосодержания и др. В работе [12] процесс подготовки землетрясений также рассматривается как процесс накопления трещин с переходом их на следующий иерархический уровень по размеру с постепенным приближением к критической их концентрации, т. е. формирование магистрального разрыва и очага землетрясений происходит в объеме геологической среды. Развитием такого подхода являются работы [13, 14].

Экспериментальные исследования, направленные на изучение реакции образцов горных пород (или их искусственных моделей) на различные виды нагружений с дополнительными внешними воздействиями или без оных, процессов релаксации, обусловленных этими воздействиями, пространственного распределения трещин различного масштаба внутри образца, выявили существенную общность проявлений сейсмичности в натуральных условиях и акустической эмиссии в лабораторных экспериментах. В качестве примера можно сослаться на ряд работ [15, 16]. В первой из них авторы постулируют, что «в условиях лаборатории мы гораздо больше знаем о свойствах среды и источнике возмущения, по сравнению с натурными условиями, а представления о самоподобии процесса разрушения геологической среды позволяют надеяться, что полученные в лаборатории результаты будут в некоторой степени сходны с натурными».

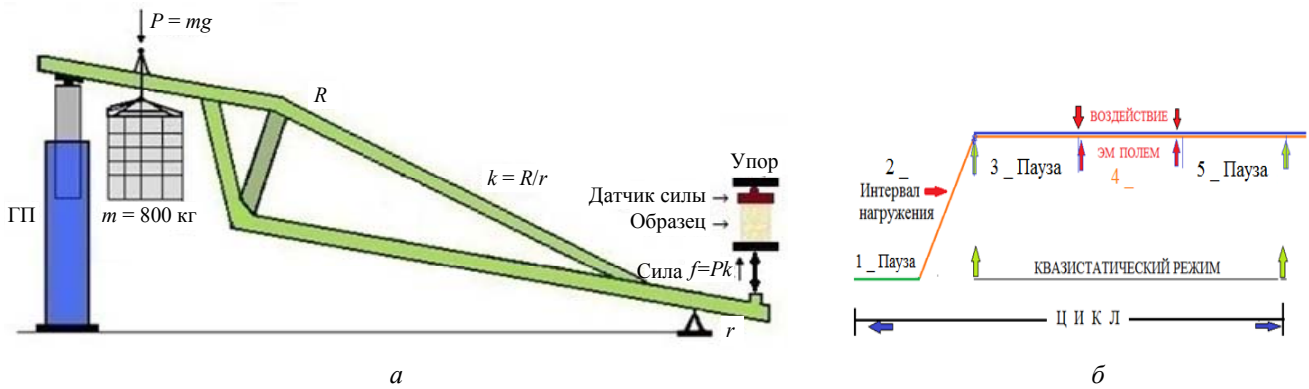
Исследования поведения образцов горных пород в условиях различного рода внешних воздей-

ствий проводились и проводятся до настоящего времени на прессовом оборудовании в Институте физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта, Физико-техническом институте РАН им. А. Ф. Иоффе, Объединенном институте высоких температур РАН, Научной станции РАН в г. Бишкеке, Институте механики сплошных сред УрО РАН. Однако только в части из них работы ведутся с использованием внешнего электрического воздействия [17–21]. Перечень публикаций такого рода далеко не исчерпывается указанными работами. И, тем не менее, следует признать, что на сегодняшний день даже в совокупности эти работы нельзя квалифицировать как системное исследование с однозначными выводами. Прежде всего, необходимо подчеркнуть не очень высокую воспроизводимость результатов, немонокотный во многих случаях характер поведения образцов, различные условия проведения экспериментов, что могло повлиять на формулируемые в результате выводы. Практически во всех работах не выдерживалось условие подобия по плотности тока, инициирующей акустическую эмиссию. Уместно также отметить, что по-прежнему не ясна физическая природа такого воздействия, несмотря на довольно большое число рассмотренных моделей [22–24 и другие работы]. Все это объясняет необходимость проведения дополнительных экспериментов на однотипных образцах при варьировании ряда параметров эксперимента: величины нагрузки, скорости нагружения, влагонасыщенности, характеристик тока и структуры энерговоздействия (наличие одной или двух мод, полярности импульсов, частоты и скважности импульсов). Именно в рамках такой постановки задачи следует рассматривать настоящую работу. В ней описаны результаты, полученные в результате двух сессий экспериментов с однотипными образцами при воздействии на образцы электрических импульсов простейшей формы.

Экспериментальная установка

В состав экспериментальной установки входят следующие блоки: рычажный пресс, генераторная аппаратура, измерительная аппаратура. Рычажный пресс предназначен для создания одноосной нагрузки на образец. Генераторная аппаратура предназначена для создания электрического тока в образце, а измерительная аппаратура предназначена для измерения нагрузки на образец, размеров образца, температуры образца, силы тока и акустической эмиссии.

На рис. 1 представлена кинематическая схема прессы, циклограмма эксперимента и общий вид прессы.



в

Рис. 1. Экспериментальная установка: а – кинематическая схема прессы, б – циклограмма эксперимента, в – общий вид прессы.

Рычаг прессы поворачивается относительно верхней точки опорной призмы. На длинном плече рычага R подвешен груз с массой 800 кг. Конеч плеча опирается на поршень гидроподъемника (ГП). Максимальный ход поршня – 600 мм. Перед установкой образца конец плеча R поднимается на полную высоту хода поршня. Образец устанавливается на конце короткого плеча r . На образец устанавливается датчик силы, верхняя поверхность которого фиксируется упором. Отношение $R/r = 49,4$, при этом максимальный ход конца плеча r равен 11 мм. При опускании поршня увеличивается сила сжатия (нагрузка) образца. Максимальная сила сжатия равна 300 кН. С учетом реальных размеров образцов это соответствует максимальному давлению на образец 40–60 МПа. Одновременно с увеличением силы сжатия образца увеличивается сила сжатия датчика силы, и вертикальный размер датчика уменьшается. При остановке поршня положение рычага фиксируется, и на образец действует сила сжатия датчика силы.

Эксперименты проводились как в режиме непрерывного нагружения (скорость нагружения ме-

нялась в интервале 0,25–2,5 кН/мин), так и в квазистатическом режиме при фиксированном положении поршня гидроподъемника. В последнем случае после очередного приращения нагрузки выдерживалась пауза, как правило, не меньше 30 мин., после чего проводилось электровоздействие длительностью также около 30 мин., затем снова выдерживалась пауза примерной той же длительности. Упомянутые паузы необходимы для завершения релаксационных процессов в образце и выхода последнего на так называемое фоновое состояние. Длительность пауз выбиралась на основании предварительных экспериментов с каждым новым типом образцов. Вся последовательность этапов от одного увеличения нагрузки до следующего увеличения нагрузки носит название цикла. Проведение эксперимента по такой схеме позволяет изучить в динамике поведение образца при фиксированном уровне нагрузки, а также минимизировать помехи, индуцируемые механическими компонентами прессы.

На рис. 2 приведена функциональная схема генераторной и измерительной аппаратуры установки.

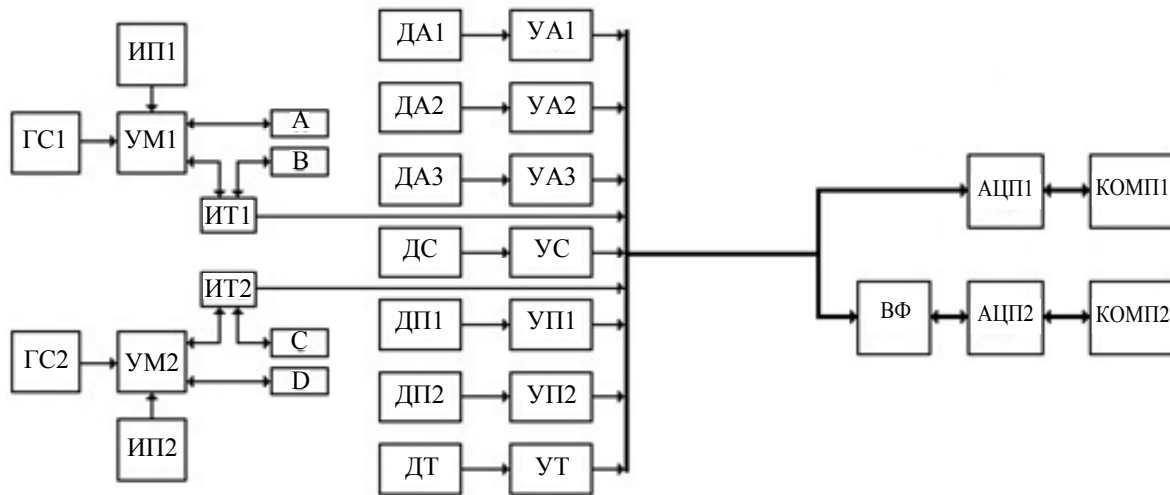


Рис. 2. Функциональная схема генераторной и измерительной аппаратуры.

На схеме приняты обозначения: ГС1 и ГС2 – генераторы сигналов, ИП1 и ИП2 – источники питания, УМ1 и УМ2 – усилители мощности, ИТ1 и ИТ2 – измерители тока, А-В – электроды, С-Д – электроды, ДА1-ДА3 – акустические датчики, ДС – датчик силы, ДП1 и ДП2 – датчики перемещения, ДТ – датчик температуры, УА1-УА3 – усилители в каналах измерения акустических сигналов, УС – усилитель в канале измерения силы, УП1 и УП2 – усилители в каналах измерения перемещения, УТ – усилитель в канале измерения температуры, ВФ – выпрямитель-фильтр, АЦП1 и АЦП2 аналого-цифровые преобразователи, КОМП1 и КОМП2 – компьютеры.

Электрический ток в образце создается электродами А-В и электродами С-Д. Электроды представляют собой медные пластины, которые могут устанавливаться на любых гранях образца. На электроды подается напряжение с усилителей мощности УМ1 и УМ2 в виде однополярных импульсов или в виде синусоидальных сигналов. Напряжение на пары электродов может подаваться одновременно или попеременно. Параметры импульсов на электродах А-В: амплитуда напряжения – до 200 В, амплитуда выходного тока – до 200 мА, частотный диапазон – 0–1 кГц, скважность – 0,1–10, длительность фронта и спада – не более 0,1 мс. Параметры синусоидальных сигналов на электродах А-В: амплитуда напряжения – до 40 В, амплитуда выходного тока – до 200 мА, частотный диапазон – 0–1 кГц. Параметры импульсов на электродах С-Д: амплитуда напряжения – до 80 В, амплитуда выходного тока – до 200 мА, частотный диапазон – 0–10 кГц, скважность – 0,1–10, длительность фронта и спада – не более 10 мкс. Параметры синусоидальных сигналов на электродах С-Д: амплитуда напряжения – до 40 В, амплитуда выходного тока – до 200 мА, частотный диапазон – 0–10 кГц.

Для измерения тока, протекающего через электроды, используются измерители тока ИТ1 и ИТ2. Измерители имеют гальванические развязки входа-выхода. Коэффициент передачи измерителя – 20, 200, 2000 В/А, частотный диапазон – 0–20 кГц.

Для измерения сигналов акустической эмиссии используются датчики ДА1-ДА3, устанавливаемые на разных боковых гранях образца, и усилители УА1-УА3. Датчиками служат преобразователи акустической эмиссии ПАЭ20-200. Частотный диапазон преобразования – 20–200 кГц, коэффициент преобразования на частоте 100 кГц – $7,5 \times 10^9$ В/м. Частотный диапазон усилителей – 10–400 кГц, коэффициент передачи 200 В/В.

Для измерения нагрузки на образец используется датчик силы ДС и усилитель УС. Диапазон измерений – 0–300 кН, частотный диапазон – 0–10 Гц, коэффициент передачи канала – 0,01 В/кН. В качестве датчика силы применяется тензометрический преобразователь 5001ДСТ-30т. Жесткость преобразователя 2040 Н/мкм.

Изменения вертикального (продольного) размера образца измеряются датчиком перемещения ДП1 с усилителем УП1. Датчиком служит индуктивный преобразователь М-023. Диапазон измерений – ± 5 мм, частотный диапазон 0–10 Гц, коэффициент передачи канала – 1 В/мм. Для измерения изменений горизонтального (поперечного) размера образца используется датчик перемещения ДП2 и усилитель УП2. Датчиком служит индуктивный преобразователь М-023. Диапазон измерений – ± 5 мм, частотный диапазон 0–10 Гц, коэффициент передачи канала – 1 В/мм.

Температуры образца измеряется датчиком ДТ с усилителем УТ. Датчик устанавливается на поверхности образца и изолируется от окружающей среды. Диапазон измерений – 0–50 °С, коэффициент передачи канала – 0,1 В/°С. Используется полупроводниковый датчик AD22100К.

Аналоговые сигналы, действующие на выходах усилителей и измерителей тока, подаются на высокоскоростной блок регистрации, состоящий из АЦП1 и КОМП1, и на низкоскоростной блок регистрации, состоящий из выпрямителя-фильтра ВФ, АЦП2 и КОМП2. Высокоскоростной блок используется в тех случаях, когда необходимо получить временные и спектральные характеристики сигналов акустической эмиссии. В качестве АЦП1 в этом блоке используется преобразователь USB3000. Характеристики преобразователя: количество каналов – $K=1-8$, максимальная частота преобразования в каждом канале – $3/K$ МГц, диапазон входных сигналов – ± 5 В, количество двоичных разрядов – 14.

Низкоскоростной блок используется в тех случаях, когда необходимо получить энергетические оценки сигналов акустической эмиссии и сопоставить их с изменениями физических характеристик образца. Для решения этой задачи ВФ содержит в каждом канале измерения акустической эмиссии выпрямители и фильтры нижних частот с полосой пропускания 0–50 Гц. Фильтры сглаживают выпрямленные сигналы и позволяют использовать невысокие скорости аналого-цифрового преобразования. В каналах измерения силы, перемещения, тока и температуры ВФ содержит также фильтры нижних частот с полосой

пропускания 0–50 Гц. Фильтры в этих каналах обеспечивают ослабление высокочастотных помех, которые создаются сторонними источниками и наводятся на соединительные кабели.

В низкоскоростном блоке в качестве АЦП2 используется преобразователь USB3000. Характеристики преобразователя: количество каналов – $K=8$, частота преобразования в каждом канале – 1 кГц, диапазон входных сигналов – ± 5 В, количество двоичных разрядов – 14.

Регистрация и первичная обработка результатов производилась с использованием программы PowerGraph.

Результаты и их обсуждение

В настоящей статье представлены результаты, полученные на образцах искусственного песчаника.

Анализ микроструктуры и оценка элементного состава образцов проводились на растровом электронном микроскопе Nova NanoSem 650 с использованием системы энергодисперсионного анализа EDAX. Исследования показали, что образец состоит как из монолитных частиц неправильной формы, так и относительно плотных агрегатов с линейными размерами в основном $\sim 0,1-4,5$ мм (рис. 3), окружённых прослойками связующей их матрицы.

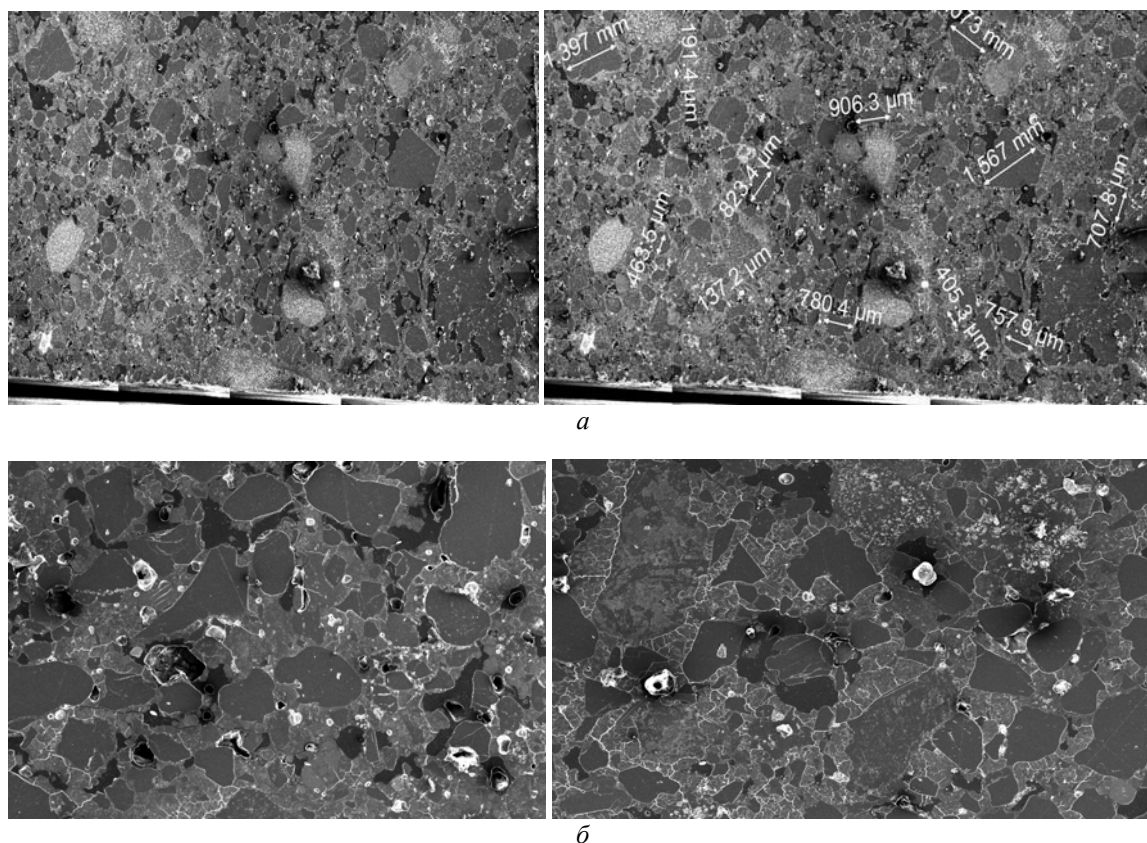


Рис. 3. Шлифы исследуемых образцов: а – общие виды; б – микроструктуры участков (выборочно).

Оценка химического состава на поверхности шлифов безэталоным методом показала, что в значительной части крупных зёрен соотношение элементов близко к таковому в SiO_2 . В прослойках и пористых агрегатах существенная доля принадлежит Са. Он может входить в состав как СаО, так и CaCO_3 . Содержание основных элементов в трёх зонах шлифов площадью $3,5 \times 2 \text{ мм}^2$ каждая лежит в указанных ниже пределах: углерод – 17,4–19,4 вес. %, 28,0–31,0 ат. %; кислород – 33,8–34,5 вес. %, 41,2–41,8 ат. %; кремний – 23,6–25,7 вес. %, 16,3–17,8 ат. %; кальций – 12,5–14,4 вес. %, 6,0–6,6 ат. %; остальные элементы – натрий, магний, алюминий, сера, калий, железо.

Размеры образцов составляли $240 \times 120 \times 60 \text{ мм}$. Перед экспериментом образец выдерживался в 1 % растворе поваренной соли, что обеспечивало необходимый и достаточный уровень его проводимости. При исходном весе около 3,32 кг, после пропитки вес образца составлял 3,55 кг. Отсюда следует, что открытая пористость образца составляет 17,7 %. Для того, чтобы минимизировать ис-

парение раствора образец обертывался пластиковой лентой, что в свою очередь, меняло режим теплообмена в образце, связанного с внутренним джоулевым энерговыделением.

Электровоздействие осуществлялось путем пропускания постоянного тока (к вопросу выбора формы тока мы вернемся несколько ниже) на уровне 140–70 мА. Ток имел продольное относительно длинной грани образца направление, так как электроды устанавливались на верхней и нижней гранях.

Предварительно на аналогичных образцах искусственного песчаника из той же партии были подобраны длительности пауз в пределах одного цикла, обеспечивающих необходимую глубину релаксации с тем, чтобы уровень акустической эмиссии либо вышел на уровень фона, либо приблизился к нему. Длительность каждой экспериментальной сессии составляла около 5 суток.

В качестве примера на рис. 4 и рис. 5 представлены результаты регистрации по одному из циклов для каждой сессии, соответствующих образцам № 6 и № 7.

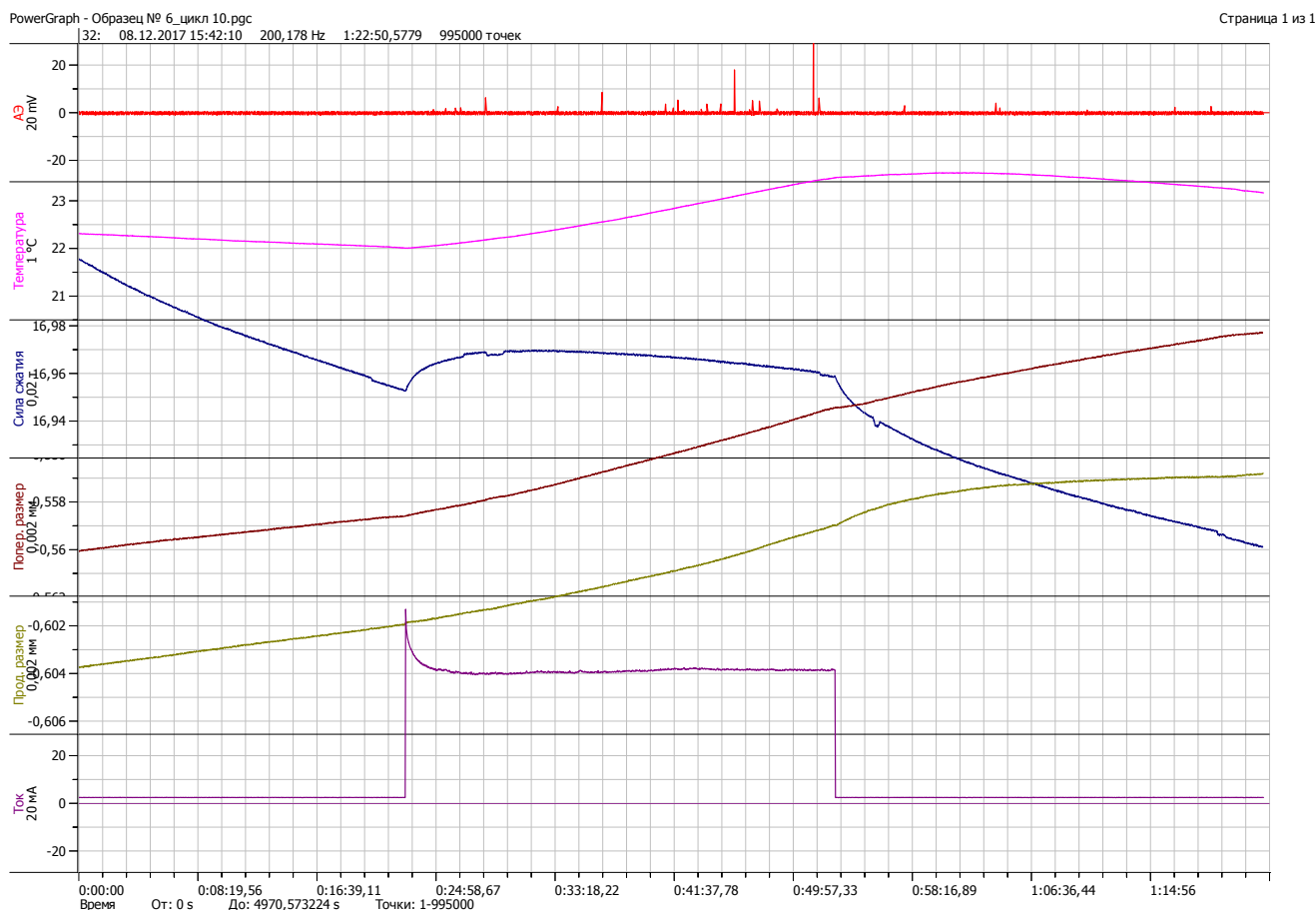


Рис. 4. Экспериментальные данные для образца № 6 (на примере цикла 10): нагрузка от 165 кН до 171 кН; время до электровоздействия (ЭВ) – 1932 с, длительность ЭВ – 1801 с, время после ЭВ – 1808 с.

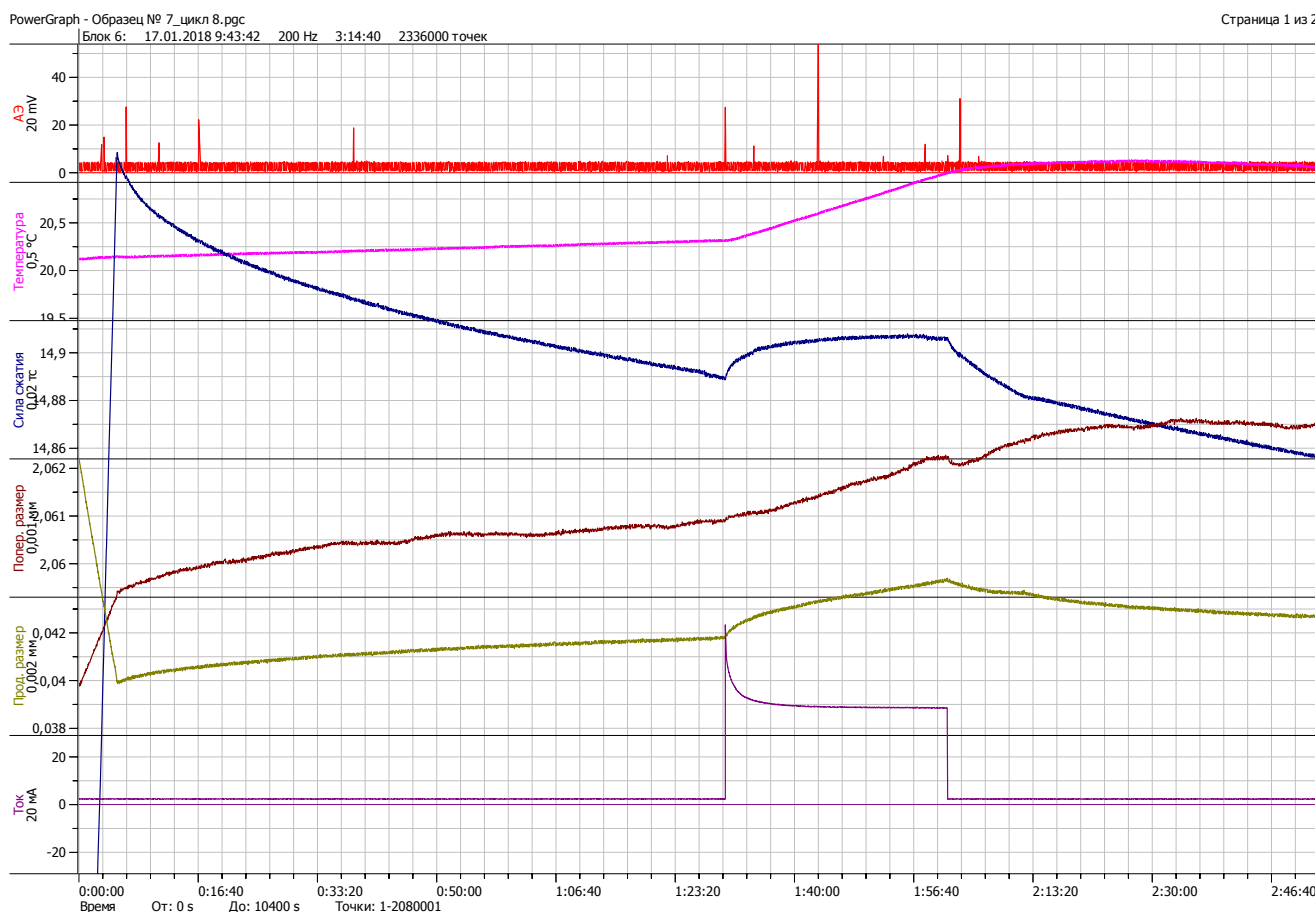


Рис. 5. Экспериментальные данные для образца № 7 (на примере цикла 8); нагрузка от 136 до 150 кН, время до ЭВ – 5100 с, длительность ЭВ – 1865 с, время после ЭВ – 8574 с.

На рисунках приняты сокращения: АЭ – сигналы акустической эмиссии на входе АЦП2, попер. размер – изменение поперечного размера образца, прод. размер – изменение продольного размера образца. На рис. 5 видно, что достаточно интенсивная акустическая эмиссия проявляется на этапе приращения нагрузки. После окончания увеличения нагрузки эмиссия постепенно затухает. Длительность интервала от окончания увеличения нагрузки до электровоздействия выбрана достаточной для того, чтобы акустическая эмиссия вышла на фоновое значение.

Основной результат экспериментов сводится к тому, что для большинства циклов (9 циклов из 10 для образца № 6 и 9 циклов из 12 для образца № 7) наблюдается выраженный эффект от электровоздействия, заключающийся в увеличении как числа акустических импульсов, так и их интенсивности в энергетическом выражении. Кроме того, установлено, что выраженным также является эффект последействия: повышенная акустическая эмиссия продолжается некоторое время и после выключения тока. Этот эффект проявился в 8 циклах из 10 для образца № 6 и в 9 циклах из 12 для образца № 7. Это достаточно представительный результат в пользу подтверждения влияния электровоздействия на акустическую эмиссию, а по существу на процесс трещинообразования.

Заметим, что при высоком разрешении изменений видно, что так называемый квазистатический режим, включающий интервалы до, во время и после электровоздействия, на самом деле является таковым только в некотором приближении. В действительности на этих интервалах меняются и геометрические размеры образца, и показания датчика силы. Эти изменения малы по сравнению с изменениями во время активного увеличения нагрузки, но они достаточно велики для их надежной регистрации. Преимущественно эти изменения являются монотонными внутри цикла. Однако при больших нагрузках (когда $k_p > 0,8$; здесь k_p есть отношение текущей нагрузки к разрушающей) поперечный размер иногда проявляет немонотонный ход. В целом, этот ход упомянутых параметров есть отражение релаксационных процессов, протекающих в образце и связанных преимущественно с образованием, ростом и взаимодействием соседних трещин и их ансамблей.

Как видно из представленных на рис. 4 и рис. 5 данных, температура на поверхности образца практически сразу реагирует на включение тока. Это вполне естественно, поскольку ток подводит-

ся ко всей торцевой поверхности и протекает по всему объему образца настолько равномерно, насколько сам образец однороден по своему объему. Благодаря этому поверхность образца к концу токового импульса достигает температуры, довольно близкой к максимальной. Дальнейший рост температуры после выключения тока, обусловленный выравниванием температуры в образце за счет теплопроводности, составляет порядка 10 % от роста температуры во время импульса тока, хотя эти 10 % делятся почти столько же, сколько и предшествующие 90 %. Сам по себе прирост температуры образца за время электровоздействия составил чуть больше 2 °С.

Такому изменению температуры соответствуют отклонения силы нагрузки и поперечного и продольного размеров образца, о которых шла речь выше, от монотонного дрейфа. И хотя масштаб этих отклонений составлял несколько сот ньютонов для силы нагрузки (при самой величине около 165 кН) и около первых микрон для размеров образцов, тем не менее, эти особенности на фоне общего дрейфа четко выражены. Такое поведение этих параметров проявляется на обоих образцах во всех циклах и отражает определенную закономерность. Оценки показывают, что нагрев образца на 2 °С способен привести к зафиксированному на этапах электровоздействия отклонениям от монотонного дрейфа. Здесь уместно заметить, что датчик силы по сути самого принципа его работы не является абсолютно жестким элементом кинематической схемы пресса, и потому показания датчика силы и продольного размера являются в известной мере взаимосвязанными. В тот момент, когда поршень гидроподъемника останавливается (см. рис. 1, а), и тем самым положение рычага пресса фиксируется, усилие на образец создается датчиком силы, и оно становится взаимосвязанным с размером самого датчика, а стало быть, и с размером образца. В этом проявляется своего рода обратная связь.

Кривая поперечного размера во всех циклах оставалась монотонно растущей. Можно предположить, что монотонный характер кривой поперечного размера является проявлением некоего дилатационного процесса, физическая природа которого, скорее всего, связана с процессом трещинообразования. Поскольку наклон этой кривой почти не меняется, то можно предположить, что интенсивность этого дилатационного процесса более или менее стабильна.

Таким образом, заметное джоулево тепловыделение наряду с обычным фактором теплового расширения может привести к упомянутой выше перестройке структуры и размеров трещин, что скажется на размерах образца, а это в свою оче-

редь приведет к изменению нагрузки, создаваемой датчиком силы. Такова качественная интерпретация наблюдаемого хода кривых.

В целом же еще раз подчеркнем высокий уровень воспроизводимости результатов, свидетельствующего о влиянии электрических импульсов на акустическую эмиссию, хотя в литературе приводятся примеры [25], когда отклик геоматериала на единичное импульсное воздействие проявляется только в результате применения специальных приемов накопления (метод «наложения эпох» или когерентного суммирования). Это связано с изменчивостью акустического режима, обусловленной достаточно сложными процессами, происходящими в неоднородных энергонасыщенных средах и приводящими к непрерывной перестройке структуры трещин.

Отдельно целесообразно остановиться на обосновании выбора формы электрического тока. В предшествующих экспериментах на искусственных образцах на основе смеси двуокиси циркония, двуокиси алюминия и цемента [17] были применены различные типы электрических воздействий: 1) прямоугольные импульсы с напряжением 200 В, с частотой 2 Гц и скважностью 2; 2) прямоугольные импульсы с напряжением 80 В, с частотой 1 кГц и скважностью 2. При таких воздействиях энергия, вложенная в образец, составляла соответственно 300 и 50 Дж. При этом в пределах одного квазистатического этапа проводились разнесенные во времени либо два электровоздействия, либо одно. В случае двух воздействий на втором из них воздействия первого и второго типа совмещались (бинарное воздействие), а одиночное воздействие в разных циклах было либо первого, либо второго типа.

Эти эксперименты показали, что после начала электровоздействия, даже при высоком уровне нагрузки ($k_p > 0,8$), реакция образца в виде акустической эмиссии носит противоречивый характер. Число импульсов в единицу времени может как увеличиваться, так и уменьшаться или оставаться без существенных изменений. Эти данные скорее свидетельствовали о необходимости более детального анализа влияния формы электрических импульсов на поток и интенсивность акустической эмиссии. Это относится и к вопросу критичности крутизны фронтов электрических импульсов, которой в некоторых работах придается особое значение [22]. Дело в том, что согласно гипотезе, выдвинутой в этой работе, периодическая последовательность электрических импульсов с крутыми фронтами индуцирует слабые вибрации в образце (в известном смысле электросейсмический эффект), которые, в свою очередь, оказывают триггерное воздействие на рост отдельных микротрещин и их группирование и слияние.

Выбранная нами простейшая форма постоянного тока должна была ответить на вопрос, насколько эти представления получают подтверждение в эксперименте. Тот факт, что в настоящей работе получено явное проявление электровоздействия постоянным током, дает дополнительный импульс к поиску механизма этого воздействия. Среди них, как нам представляется, наиболее обоснованным является эффект теплового воздействия, сформулированный в работе [21].

Заключение

Выполненные на рычажном прессе эксперименты на образцах искусственного песчаника убедительно показали, что электрическое воздействие в виде пропускаемого через образец постоянного тока вызывает реакцию исследуемой среды как в виде увеличения числа и интенсивности акустических сигналов, так и в виде появления особенностей в поведении кривых нагрузки, продольного и поперечного размеров. Скорее всего, наблюдаемый за счет джоулева тепловыделения нагрев образцов в существенной мере ответственен за указанные проявления. Вместе с тем нельзя исключать и роль других механизмов преобразования электрической энергии в механическую. Более того, нельзя исключать и совместное действие нескольких механизмов. На эту ситуацию указывается также и в работе [24]. Во всяком случае, если тепловой механизм в условиях лабораторного эксперимента может рассматриваться как объяснение наблюдаемых проявлений, то для натуральных (полевых) экспериментов с мощными источниками тока он вряд ли сможет выполнить эту роль (в силу низкой плотности тока на характерных для гипоцентров землетрясений глубинах), если только не привлекать весьма специфические геоэлектрические модели, обеспечивающие значительную контракцию тока в узких проводящих зонах – перемычках типа тех, что рассмотрены в работе [26].

Авторы выражают свою благодарность Вальяно Г. Е. за выполненный структурно-элементный анализ образцов, Дихтер И. Я. за обработку экспериментов и помощь в оформлении электронной версии статьи, а также Лазареву Е. Д. за помощь в подготовке установки к экспериментам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Н. Т. // ДАН. 1997. Т. 353. № 4. С. 543.
2. Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А. А., Зейгарник В. А. // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152.
3. Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В., Авагимов А. А., Зейгарник В. А. // Геология и геофизика. 2001. № 10. С. 1641.
4. Tarasov N. T., Tarasova N. V. // Ann. Geophys. 2004. Vol. 47. No. 1. P. 199.
5. Богомолов Л. М., Сычев В. Н., Аладьев А. В., Авагимов А. А., Брагин В. Д., Зейгарник В. А., Закупин А. С., Сычева Н. А. / Труды II Международного симпозиума «Активный электромагнитный мониторинг литосферы Земли» (Новосибирск. 2005). – Новосибирск: Изд-во СО РАН. С. 112–116.
6. Chelidze T., De Rubeis V., Matcharshvili T., Tosi P. // Ann. Geoph. 2006. Vol. 49. No. 4/5. P. 961.
7. Сычев В. Н., Авагимов А. А., Богомолов Л. М., Зейгарник В. А. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. С. 134.
8. Тарасов Н. Т. // ДАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 689.
9. Макаров П. В., Еремин М. О. // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 1. С. 5.
10. Стефанов Ю. П. // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 6. С. 54.
11. Гольдин С. В. // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37.
12. Соболев Г. А., Тюпкин Ю. С. // Физика Земли. 2000. № 2. С. 44.
13. Ботвина Л. Р. // Физика Земли. 2011. № 10. С. 5.
14. Смолин И. Ю., Макаров П. В., Кульков А. С., Еремин М. О., Бакеев Р. А. // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 6. С. 77.
15. Смирнов В. Б., Пономарев А. В. // Физика Земли. 2004. № 10. С. 26.
16. Дамаскинская Е. Е., Пантелеев И. А., Кадомцев А. Г., Наймарк О. Б. // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. Вып. 5. С. 920.
17. Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Ключкин В. Н. // Физика Земли. 2006. № 10. С. 36.
18. Закупин А. С., Авагимов А. А., Богомолов Л. М. // Физика Земли. 2006. № 10. С. 10.
19. Боровский Б. В., Богомолов Л. М., Закупин А. С., Мубасарова В. А. // Физика Земли. 2011. № 10. С. 71.
20. Пантелеев И. А., Мубасарова В. А., Дамаскинская Е. Е., Богомолов Л. М., Наймарк О. Б. Триггерные эффекты в геосистемах / Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания (Москва, 2015 г.). – М.: ГЕОС, 2015. С. 244.
21. Лапшин В. Б., Патонин А. В., Пономарев А. В., Потанина М. Г., Смирнов В. Б., Строганова С. М. // ДАН. 2016. Т. 469. № 1. С. 97.
22. Богомолов Л. М. // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 3. С. 39.
23. Богомолов Л. М. Триггерные эффекты в геосистемах / Материалы Всероссийского семинара-совещания (Москва, 2010). – М.: ГЕОС, 2010. С. 42.
24. Богомолов Л. М., Мубасарова В. А., Закупин А. С., Пантелеев И. А., Сычев В. Н. / Тезисы докладов Седьмого международного симпозиума «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Бишкек, 2017). С. 220.
25. Sobolev G. A., Ponomarev A. V., Avagimov A. A., Zeygarnik V. A. / Book of abstracts and papers. XXVII Gen.Ass of ESC. Lisbon Univ., Lisbon, Portugal. 2000. P. 277.
26. Шимелевич М. И., Оборнев Е. А., Фельдман И. С., Новиков В. А. // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 6. С. 42.

Influence of an electrical current on the acoustic response of stressed artificial sandstone samples

V. A. Zeigarnik, V. N. Kliuchkin, and V. I. Okunev

Joint Institute for High Temperatures, RAS
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: zeigarnik@ihed.ras.ru; klvn38@mail.ru; viok56@mail.ru

Received April 8, 2018

Results of study of sample behavior and cracking process dynamics in artificial sandstone sample under exposure of an electrical current at uniaxial compression are presented. Such experiments are still actual to solve the problem of active control of seismic regime or even discharge of tectonic stresses. Experiments were carried out on the lever press facility providing quasistatic loading stage. The influence of electrical impact on number and intensity of acoustic signals during the impact stages as well as immediately after it (impact aftereffect) was observed in most cases. During the impact stage, graphs of loading strain, longitudinal and transversal dimensions, temperature at sample surface visibly deviates from smooth curves. Due to the fact that results above mentioned have been obtained under impact with direct current, it is reasonable to put a question on validity of some hypothesis on trigger effect mechanism based on the dominant role of a sequence of electrical pulse with steep slope of pulse fronts.

Keywords: trigger effect, electrical impact, acoustic emission, cracking, uniaxial compression.

REFERENCES

1. N. T. Tarasov, Dokl. Earth Sci. **353** (4), 3 (1997).
2. N. T. Tarasov, N. V. Tarasova, A. A. Avagimov, and V. A. Zeigarnik, Vulkanologiya i Seismologiya No. 4–5, 152 (1999).
3. N. T. Tarasov, N. V. Tarasova, A. A. Avagimov, and V. A. Zeigarnik, Russian Geol. Geoph. **42** (10), 1558 (2001).
4. N. T. Tarasov and N. V. Tarasova, Ann. Geophys. **47** (1), 199 (2004).
5. L. M. Bogomolov, V. N. Sychev, A. V. Alad'ev, A. A. Avagimov, V. D. Bragin, V. A. Zeigarnik, A. S. Zakupin, and N. A. Sycheva, in *Proc. II Int. Symp. "Active EM Monitoring of the Earth Lithosphere"*, Novosibirsk. 2005. (Novosibirsk, Sib. Branch RAS Publisher, 2005). P. 112.
6. T. Chelidze, V. De Rubeis, T. Matcharshvili, and P. Tosi, Ann. Geoph. **49** (4/5), 961 (2006).
7. V. N. Sychev, A. A. Avagimov, L. M. Bogomolov, and V. A. Zeigarnik, *Geodynamics and Stressed State of the Earth Interior*. (Novosibirsk, Sib. Branch RAS Publisher, 2008). P. 134.
8. N. T. Tarasov, Doklady Phys. Earth **433** (5), 1088 (2010).
9. P. V. Makarov and M. O. Eremin, Fizicheskaya Mezomekhanika **16** (1), 207 (2013).
10. Yu. P. Stefanov, Fizicheskaya Mezomekhanika **19** (6), 54 (2016).
11. S. V. Goldin, Izv. Phys. Earth. **40** (10), 817 (2004).
12. G. A. Sobolev and Yu. S. Tyupkin, Izv. Phys. Earth. **36** (2), P. 138 (2000).
13. L. R. Botvina, Izv. Phys. Earth. **47** (10), 859 (2011).
14. I. Yu. Smolin, P. V. Makarov, A. S. Kul'kov, M. O. Eremin, and R. A. Bakeev, Fizicheskaya Mezomekhanika **19** (6), 77 (2016).
15. V. B. Smirnov and A. V. Ponomarev, Izv. Phys. Earth. **40** (10), 807 (2004).
16. E. E. Damaskinskaya, I. A. Panteleev, A. G. Kadomtsev, and O. B. Naimark, Phys. Solid State **59** (5), 944 (2017).
17. A. A. Avagimov, V. A. Zeigarnik, and V. N. Klyuchkin, Izv. Phys. Earth. **42** (10), 824 (2006).
18. A. S. Zakupin, A. A. Avagimov, and L. M. Bogomolov, Izv. Phys. Earth. **42** (10), 830 (2006).
19. B. V. Borovskii, L. M. Bogomolov, A. S. Zakupin, and V. A. Mubassarova, Izv. Phys. Earth. **47** (10), 926 (2011).
20. I. A. Panteleev, V. A. Mubassarova, E. E. Damaskinskaya, L. M. Bogomolov, and O. B. Naimark, in *Proc. III All-Russian Seminar*, Moscow. (Moscow. GEOS Publ., 2015). P. 77.
21. V. B. Lapshin, A. V. Patonin, A. V. Ponomarev, M. G. Potanina, V. B. Smirnov, and S. M. Stroganova, Doklady Phys. Earth. **469** (1), 705 (2016).
22. L. M. Bogomolov, Fizicheskaya Mezomekhanika **13** (1-2), 38 (2010).
23. L. M. Bogomolov, in *Proc. All-Russian Seminar, Moscow* (Moscow. GEOS Publ. 2010). P. 42.
24. L. M. Bogomolov, V. A. Mubassarova, A. S. Zakupin, I. A. Panteleev, and V. N. Sychev, in *Proc. VII Int. Symp. "Problems of Geodynamics and Geoecology of Inter-Continental Orogens"*. (Bishkek, 2017). P. 220.
25. G. A. Sobolev, A. V. Ponomarev, A. A. Avagimov, and V. A. Zeigarnik, in *Book of Abstracts and Papers. XXVII Gen. Ass. of ESC*. (Lisbon Univ., Lisbon, Portugal. 2000). P. 277.
26. M. I. Shimelevich, E. A. Osborne, I. S. Feldman, and V. A. Novikov, Izvestiya vuzov. Geologiya i Razvedka. No. 6, 42 (2017).