

УДК: 550.34.01 + 550.348.433

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ: ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ОМОРИ И ГУТЕНБЕРГА–РИХТЕРА ОТ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2019 г. В. Б. Смирнов^{1,2,3*}, А. В. Пономарев¹, С. А. Станчиц⁴, М. Г. Потанина², А. В. Патонин⁵, G. Dresen⁶, C. Narreau³, P. Bernard³, С. М. Строганова¹

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

³Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France

⁴Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

⁵Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН, п. Борок, Россия

⁶GFZ German Research Centre for Geosciences, Section III.2: Geomechanics and Rheology, Potsdam, Germany

*E-mail: vs60@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Выполнены лабораторные эксперименты по исследованию афтершокового режима на образцах песчаника при различных уровнях осевых напряжений, всестороннего давления и при постоянном поровом давлении. Моделирование афтершоковых последовательностей выполнялось по сценарию ступенчатого увеличения осевой нагрузки на образец в режиме управления по деформации, который обеспечивает регулярную генерацию афтершоковых последовательностей. Эксперименты проведены на ненарушенных образцах, а также на образцах, в которых были предварительно сформированы сдвиговые макроразрывы, имитирующие природные разломы. В ходе экспериментов регистрировались сигналы акустической эмиссии (АЭ) с использованием многоканальной аппаратуры, что позволило провести локацию источников АЭ.

Выявлено несколько типов зависимости параметров релаксации акустической активности – параметров модифицированного закона Омори (p и c) и наклона графика повторяемости (b) – от уровня действующих напряжений.

Наклон графика повторяемости b уменьшается с ростом осевых напряжений на всех уровнях давления всестороннего сжатия. При разрушении по сформированному «разлому» параметр релаксации Омори p увеличивается с увеличением осевых напряжений; параметр задержки начала релаксации c уменьшается с увеличением осевых напряжений и увеличивается с увеличением давления всестороннего сжатия. При разрушении целого образца параметр p не меняется с ростом осевых напряжений, а параметр c незначительно увеличивается. Изменения параметров в случае сложного напряженного состояния, когда изменяются как девиаторная (дифференциальные напряжения), так и шаровая (эффективное давление) части тензора напряжений, приобретают унифицированный вид при переходе к кулоновским напряжениям.

Выдвинуто предположение, что задержка релаксации афтершоковой активности обусловлена кинетикой разрушения в соответствии с кинетической концепцией прочности твердых тел. Эта гипотеза подкрепляется выявленными в экспериментах экспоненциальными зависимостями параметра c от напряжений и эффективной прочности среды. В рамках этой гипотезы, на основе формулы Журкова для долговечности материала удается унифицировать зависимости параметра c от кулоновских напряжений при различных величинах эффективной прочности. Полученные оценки параметров зависимости c от прочности и напряжений позволяют предположить, что величина c определяется разностью прочности и действующих напряжений, показывая тем самым, сколь далеко напряженное состояние среды от критического, отвечающего пределу прочности.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, лабораторное моделирование сейсмичности, разрушение горных пород, афтершоковые последовательности, кулоновские напряжения

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191149-165>

ВВЕДЕНИЕ

Модифицированный закон Омори выражает одну из статистических закономерностей сейсмичности. Он описывает спад сейсмической активности (количества землетрясений в единицу времени) $\lambda(t)$ после сильных землетрясений как функцию времени t , прошедшего после главного события [Utsu et al., 1995]:

$$\lambda(t) = \frac{K}{(t+c)^p}. \quad (1)$$

Параметр K определяется общим количеством землетрясений в афтершоковой последовательности, его называют иногда продуктивностью афтершоков. Параметр p известен как параметр Омори. Параметр c определяется характерным временем после главного события, начиная с которого спад активности можно считать степенным.

Современная физическая интерпретация параметров, входящих в (1), и факторы, их контролирующие, определяются представлениями о природе и механизмах возбуждения и релаксации афтершоков. В настоящее время рассматриваются несколько таких механизмов, наиболее вероятными из которых считаются каскадные модели перераспределения напряжений от главного события к последующим афтершокам, нелинейное трение на разрывах, вязкоупругая релаксация напряжений, динамика флюида в порово-трещинном пространстве и постепенное развитие трещиноватости под действием напряжений (stress-corrosion). Вопрос о факторах, определяющих реализацию того или иного механизма или их комбинаций, остается открытым (см. подробный обзор проблемы в работе [Kanamori, 2015] и краткую характеристику ее современного состояния в работе [Davidsen et al., 2015]). Однако во всех современных теоретических моделях афтершоковых процессов принципиальными параметрами являются напряженно-деформированное состояние среды перед главным событием, величина и характер изменения этого состояния в результате главного события, а также параметры предполагаемых релаксаторов напряжений в очаговой области главного события. Соответственно, статистические параметры модифицированного закона Омори (1) связывают с этими физическими параметрами моделей афтершоковых процессов.

В ряде работ [Kisslinger, Jones, 1991; Creamer, Kisslinger, 1993; Rabinowitz, Steinberg, 1998; Wiemer, Katsumata, 1999; Bohnenstiehl et al., 2002] на основе анализа изменения параметра

Омори p в пространстве, проведенного в пределах отдельных регионов, делается предположение об увеличении p с увеличением температуры в области очага главного события, что интерпретируется как результат более сильной релаксации напряжений в упруго-вязкой среде при более высоких температурах. В работе [Wiemer, Katsumata, 1999] отмечается также различие значений параметра Омори в сдвиговых зонах с различными особенностями тектонических границ.

Теоретические расчеты на основе модели трения, зависящего от скорости (rate-and-state model), позволяют связать параметр Омори с характеристиками неоднородности распределения действующих напряжений [Helmstetter, Shaw, 2006]. Авторы этой модели отмечают, что параметры закона Омори определяются величиной разброса значений напряжений, но не зависят от уровня действующих напряжений. Эмпирических подтверждений зависимости параметра Омори от характера поля напряжений авторы [Helmstetter, Shaw, 2006] не приводят.

В работе [Ouillon, Sornette, 2005] на основе статистического анализа региональных данных (Южная Калифорния) выявлена зависимость величины параметра Омори p от магнитуды главного события. Авторы работы интерпретируют эту зависимость в рамках каскадной эпидемической модели афтершоковых последовательностей (ETAS), введя в нее положение об экспоненциальной зависимости процессов активации сейсмических разрывов от уровня локальных напряжений (соответствующее кинетической концепции разрушения Журкова). Эти авторы позиционируют введение механизма, зависящего от уровня действующих напряжений, как принципиальный шаг в развитии (ETAS). Заметим, однако, что подтверждение адекватности этого физически обоснованного шага зависимостью параметра p от магнитуды главного события представляется нам дискуссионным, поскольку связь магнитуды землетрясения с уровнем действующих напряжений и зависимость высвобождающихся при землетрясении напряжений от его магнитуды не являются бесспорными (см. обзор этого вопроса в работе [Earthquakes ..., 2002]).

Известны объяснения релаксации афтершоковой активности по закону Омори как следствие перераспределения порового давления после главного события и движения флюида в афтершоковой области [Nur, Booker, 1972]. Этот механизм дает нереалистично низкие значения

параметра p , но, возможно, он актуален для афтершоков в наведенной сейсмичности, связанной с водохранилищами, для которой характерны пониженные значения p [Gupta, 2002; Mekkawi et al., 2004; Smirnov et al., 2018].

Из модифицированного закона Омори (1) следует, что спад афтершоковой активности может быть аппроксимирован степенной функцией не сразу после главного события, а только спустя некоторое время. Второй параметр модифицированного закона Омори – параметр c – определяет величину задержки начала степенного спада активности. Мнения о природе задержки и, соответственно, параметра c в настоящее время разделяются.

Некоторые исследователи считают, что пониженный поток афтершоков, отражающийся в постоянстве активности (1) при $t \ll c$, обусловлен, в основном, потерей информации об относительно слабых событиях в результате перегрузки сейсмической сети аномально высоким потоком сейсмических сигналов в начальный интервал времени после сильного главного события [Shcherbakov et al., 2004; Kagan 2004; Lolli, Gasperini, 2003; Kagan, Houston, 2005; Davidsen et al., 2015].

Другие полагают, что отличия афтершокового режима на его ранней стадии (сразу после главного события) от более поздней стадии (отвечающей степенному спаду активности) наряду с возможной потерей информации о слабых событиях имеют и физическую составляющую [Narteau et al., 2002; Peng et al., 2006; 2007; Enescu et al., 2007; Nanjo et al., 2007; Narteau et al., 2008; 2009; Holschneider et al., 2012; Natano et al., 2015; Lippiello et al., 2015; Rodkin, Tikhonov, 2016]. На основе модельных представлений [Narteau et al., 2002] авторы [Narteau et al., 2008; 2009] связывают параметр c с особенностями напряжений в области очага главного события. В пользу этой гипотезы говорит обнаруженное в работе [Narteau et al., 2009; Lippiello et al., 2015; Natano et al., 2015] различие величины параметра c для главных событий различного типа – сбросов, надвигов и сдвигов – поскольку считается, что эти типы соответствуют различным напряженно-деформированным состояниям литосферы. Подтверждением геофизической информативности параметра c является также повышение эффективности прогнозных алгоритмов после введения в них оценок изменения параметров напряжений в очаговых зонах, проводимых на основе значений параметра c [Shebalin et al.,

2012], а также изменение параметра c с глубиной [Shebalin, Narteau, 2017].

Несмотря на существенные успехи, достигнутые в исследовании афтершоковых процессов, выводы о той или иной связи параметров модифицированного закона Омори с уровнем и особенностями напряжений в очаговой области главного события, и даже заключение о самом факте наличия такой связи, носят предположительный характер. Это является следствием того, что в натуральных условиях невозможно провести прямые измерения тензора напряжений, действующих в очаговой области, а косвенные сведения о величинах напряжений являются недостаточно надежными. В такой типичной для физики сейсмического режима ситуации эффективным средством для прояснения особенностей реализации возможных физических механизмов является лабораторное моделирование изучаемых процессов.

Лабораторное моделирование процессов разрушения применительно к проблемам сейсмического режима [Lei, Ma, 2014] и переходных режимов, в частности, [Smirnov, Pomarev 2004; Smirnov et al., 2010] имеет свои сильные и слабые стороны. Лабораторные условия и современная техника позволяют проводить опыты при известных и контролируемых параметрах, и, в частности, осуществлять исследования закономерностей процесса разрушения в горных породах при целенаправленных вариациях параметров напряженно-деформированного состояния среды и ее физических свойств. Тем самым, лабораторное моделирование позволяет проверять имеющиеся физические гипотезы и выявлять принципиальные закономерности исследуемых процессов. При этом, горные породы в лабораторном эксперименте не могут в строгом смысле моделировать самих себя в естественных условиях, поэтому лабораторный эксперимент не позволяет в полной мере воспроизвести натурные условия, оставаясь лишь качественной или полуквантитативной (подобной не по всем параметрам) моделью.

В течение последних десятилетий акустическая эмиссия в механически нагружаемых образцах горных пород рассматривалась как модель естественной сейсмичности. Многочисленные исследования для определения основных закономерностей акустической эмиссии и сравнения их с сейсмичностью были выполнены, начиная с пионерских работ Виноградова, Моги, Шольца в 60-х годах прошлого века [Виноградов, 1959; Mogi, 1962; Scholz, 1968 a; b].

Было показано, что во временных последовательностях импульсов акустической эмиссии наблюдаются закономерности, характерные для последовательностей землетрясений. Так, например, в лабораторных экспериментах были обнаружены серии импульсов, описываемые законом Омори, после высокоамплитудных акустических сигналов [Lockner, Byerlee, 1977; Hirata, 1987; Rudajev et al., 2000; Lockner, 1993; Stanchits et al., 2006; Smirnov, Ponomarev, 2004; Thompson et al., 2009; Schubnel et al., 2007; Vilhelm et al., 2017]. Таким образом, продемонстрировано, что «акустические» афтершоки подчиняются тем же статистическим закономерностям, что и реальные афтершоки. Эксперименты показали, что значения параметра Омори p находятся в диапазоне 1–2 [Hirata, 1987; Lockner, Byerlee, 1977; Lei et al., 2004].

Подробный обзор лабораторных исследований акустической эмиссии для понимания процесса генерации землетрясений представлен в работе [Lei, Ma, 2014]. Авторы делают вывод о том, что сходство между параметрами акустической эмиссии и сейсмичности позволяет прояснять вопросы, связанные с эволюцией дефектов и микротрещин до и после разрушения, зарождением разломов, выявлять факторы, которые определяют эти процессы.

Следует отметить, что специальных лабораторных экспериментов, в которых исследовалась изменчивость параметров закона Омори, было выполнено сравнительно немного по сравнению с лабораторными исследованиями наклона графика повторяемости или фрактальной размерности. В работе [Ojala et al., 2004] исследовалась зависимость параметра p от температуры нагружаемых образцов и было показано, что параметр p линейно растет с температурой в диапазоне 25–80 °C от 1.05 до 1.37 и от 0.79 до 1.23 для различных видов песчаника при постоянной скорости деформирования 10^{-7} 1/с и давлении всестороннего сжатия 13.5 МПа. Авторы предположили, что это согласуется с положительной корреляцией поверхностного теплового потока и показателем p из-за более быстрой скорости релаксации напряжений в областях с более высокой температурой, что отмечалось в полевых наблюдениях [Utsu et al., 1995].

Изменчивость параметров p , c и K из (1) была исследована в лабораторных экспериментах по формированию макроразрыва в образцах гранита Вестерли в условиях одноосного нагружения при давлении всестороннего сжатия 75 МПа. Образец с образовавшимся макроразрывом

нагружался осевым напряжением, что приводило к возникновению неустойчивых подвижек типа «стик-слип» с последовательностью акустических афтершоков после каждой подвижки [Goebel et al., 2012]. Авторы обнаружили, что параметры Омори p и c систематически снижаются для каждого последующего стик-слипа — от 1.53 до 1.10 для p и от 0.32 с до 0.15 с для c , хотя наблюдались и некоторые отклонения от этих закономерностей.

Авторы цитированной работы предполагают, что такая тенденция связана со сглаживанием поверхности разрыва после серии последовательных стик-слипов в результате разрушения неровностей и зацепов на поверхности разлома. В свою очередь, это ведет к перераспределению нагрузки по неровностям даже в одном эксперименте, что может привести к значительному уменьшению сбросов напряжения, а остаточные напряжения будут систематически снижаться после каждого последующего стик-слипа.

Другой подход к моделированию афтершоковых последовательностей основан на применении ступенчатого режима нагружения образцов горных пород с управлением по смещениям, который обеспечивает регулярную генерацию последовательностей акустических событий со свойствами, сходными с афтершоковыми последовательностями [Smirnov, Ponomarev, 2004; Smirnov et al., 2010; Vilhelm et al., 2017].

В работе [Smirnov, Ponomarev, 2004] показано, что активность АЭ после относительно резкой степени нагружения образцов может быть описана законом Омори. Заметим также, что возбуждение акустической эмиссии упругим импульсом и ее последующий спад во времени также описывается модифицированным законом Омори [Соболев, Пономарев, 2013].

В последующих исследованиях [Smirnov et al., 2010; Vilhelm et al., 2017] было продемонстрировано, что при относительно низких напряжениях и малой скорости ступенчатого деформирования (10^{-6} – 10^{-5} 1/с) интенсивность акустической эмиссии постепенно возрастает, причем время максимума акустической активности достигается до окончания стадии роста осевой нагрузки, а затем начинается уменьшение активности еще на стадии роста нагрузки («роеподобное» поведение). По мере увеличения осевого напряжения эти максимумы смещаются к концу соответствующих циклов нагрузки. Это указывает на то, что ступенчатая нагрузка по существу является инициацией разрушения, а возбуждение акустической эмиссии является саморазвивающимся

процессом, который контролируется в основном уровнем напряжения. При резком ступенчатом нагружении образца (скорость деформации около 10^{-3} 1/с) спад акустической активности может быть описан степенным законом Омори.

Причины различия между «роевой» акустической активностью при относительно медленном увеличении нагрузки и «афтершоковой» активностью при быстром росте нагрузки пока не выяснены полностью. В более общем плане можно говорить о возникновении индуцированной акустической эмиссии при ступенчатой нагрузке с различной скоростью деформации [Smirnov et al., 2010].

В настоящей работе представлены результаты исследования зависимости параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от уровня осевых напряжений и давления всестороннего сжатия в экспериментах с обводненными образцами песчаника, проведенными в Лаборатории геомеханики и реологии (GFZ, Potsdam). Эксперименты осуществлялись по сценарию ступенчатой инициации разрушения [Smirnov, Popomarev 2004; Smirnov et al., 2010] при варьировании осевых напряжений и различных величинах давления всестороннего сжатия в условиях насыщения образцов водой перед началом эксперимента и дальнейшего поддержания заданного порового давления. Рассматриваются результаты двух экспериментов (шифры – BS02 и BS03), проведенных на одинаковых образцах песчаника Бенхайм.

ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты выполнены на сервогидравлическом прессе MTS, который обеспечивает осевое усилие 4600 кН. Осевое напряжение измерялось двумя датчиками – внешним датчиком MTS, установленным вне камеры всестороннего сжатия, и внутренним датчиком GFZ, измеряющим напряжение внутри камеры. Учет трения на уплотнительных кольцах поршня пресса позволяет скорректировать измерения напряжения с точностью около ± 0.5 МПа. Внутренний датчик обеспечивал измерение осевого напряжения с точностью ± 0.05 МПа и был откалиброван по показаниям внешнего датчика при начальной нагрузке. Осевая деформация измерялась с использованием датчика линейных перемещений, связанного с поршнем пресса. Деформация образца рассчитывалась с учетом деформации нагрузочной системы пресса с эффективной жесткостью 793 кН/мм.

Для контроля сигналов акустической эмиссии и измерения скорости упругих волн в образце использовались четырнадцать датчиков продольных колебаний. Образец герметизировался неопреновым жакетом. Датчики через отверстия в жакете были приклеены непосредственно к поверхности образца и загерметизированы эпоксидной смолой. Пьезоэлектрические датчики изготовлены из пьезокерамических дисков PZT диаметром 5 мм и толщиной 2 мм. Резонансные частоты, связанные с толщиной и диаметром датчиков, составляют около 1 МГц и 400 кГц соответственно. Сигналы преобразователя усиливались на 40 дБ с использованием предусилителей, оснащенных фильтрами верхних частот с частотой среза 100 кГц. Для измерения скоростей продольных волн в разных направлениях в объеме образца и контроля изменений скоростей во время эксперимента некоторые датчики периодически использовались в качестве излучателей для ультразвукового прозвучивания с подачей электрических импульсов в 100 В. Измерения скорости проводились каждые 20–30 с. Волновые формы акустических импульсов и ультразвуковых сигналов сохранялись в 16-канальной переходной системе записи (DAXBox PRÖKEL, Германия). Система имела разрешение 16 бит при частоте дискретизации 10 МГц на канал [Stanchits et al., 2006; 2009]. Ультразвуковые сигналы и сигналы акустической эмиссии распознавались автоматически после экспериментов [Zang et al., 1996].

Процедура локации источников акустической эмиссии включает в себя автоматическое определение времени вступления продольной волны на основе информационного критерия Akaike [Leonard, Kennett, 1999] и минимизации остатков времени пробега волны с использованием симплексного алгоритма [Nelder, Mead, 1965] с учетом зависящего от времени изменения скорости упругих волн [Stanchits et al., 2006]. Точность локации оценивается величиной не более 2 мм.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Цилиндрические образцы диаметром 50 мм и высотой 125 мм изготавливались из единого целика песчаника Бенхайм. Эти песчаники состоят, в основном, из кварца (около 90%) с незначительным количеством полевых шпатов, окислов железа и других аксессуарных примесей. Средний размер зерен кварца составляет 0.2–0.3 мм, исходная пористость – около 19% [Wim Dubelaar, Nijland, 2015].

До начала эксперимента образцы высушивались при температуре 50 °С в условиях вакуума ($\sim 10^{-2}$ бар) в течение по крайней мере 12-ти часов. Затем, после приклейки акустических датчиков на цилиндрическую поверхность образцы насыщались водой и снова выдерживались перед началом нагружения не менее 12-ти часов.

КАТАЛОГИ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Сформированные в экспериментах каталоги акустических событий содержат информацию о времени и координатах источника, а также об усредненной амплитуде поступающих с акустических датчиков электрических сигналов, приведенной к выбранной референц-сфере вокруг события (абсолютная калибровка механо-электрического преобразователя не проводилась). По аналогии с сейсмологией амплитуда A была пересчитана в условный энергетический класс по формуле $K = 2 \lg A$. В предположении малого различия спектров импульсов и неизменности контакта датчика с образцом величина A^2 пропорциональна сейсмической энергии, и в этом случае K сходен по смыслу с энергетическим классом, применяемым в сейсмологии.

Первичная обработка каталогов проводилась по методике, разработанной для оценки однородности данных сейсмических каталогов [Смирнов, 1997; 2009; Смирнов, Габсатарова, 2000] и применявшейся ранее к анализу данных лабораторных экспериментов [Smirnov, Popomarev, 2004; Smirnov et al., 2010].

Объемы каталогов акустических событий на рабочих стадиях экспериментов составили: для BS02 – 201332, из них представительных – 110925; для BS03 – 333715, из них представительных 160138.

ИСТОРИЯ НАГРУЖЕНИЯ

В природных условиях афтершоковые процессы, как правило, рассматриваются в зонах, приуроченных к крупным разломным структурам, таким, например, как сдвиговые Калифорнийская и Северо-Анатолийская зоны, зоны субдукции в западной части Тихоокеанского кольца и др. Землетрясения, возникающие вне разломных структур, достаточно редки, и особенности их афтершоковых последовательностей не систематизированы. В связи с этим в настоящей работе афтершоковые последовательности моделировались в образцах, в которых были сформированы макроразрывы, имитирующие природные мега-разломы.

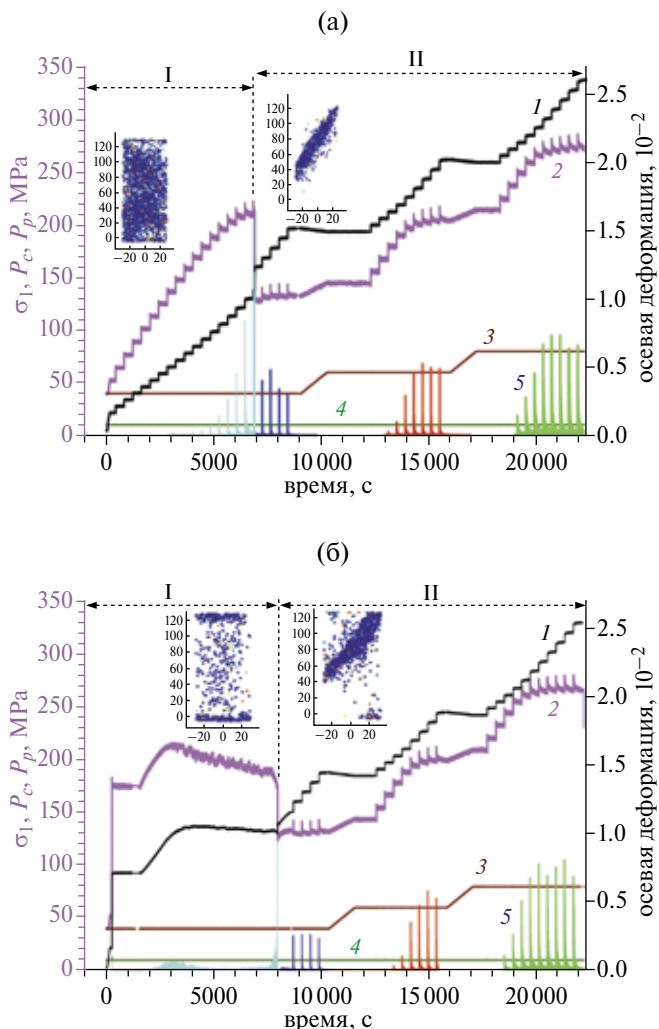


Рис. 1. История нагружения в экспериментах: BS02 (а) и BS03 (б): 1 – осевые деформации, 2 – осевые напряжения σ_1 , 3 – давление всестороннего сжатия P_c , 4 – поровое давление P_p , 5 – акустическая активность (разными цветами показана активность при разных значениях давления всестороннего сжатия). На врезках – примеры распределения источников акустической эмиссии внутри образцов на подготовительной (I) и рабочей (II) стадиях.

На рис. 1 представлена история нагружения в опытах BS02 и BS03. В обоих опытах на первой стадии формировался сдвиговый макроразрыв в результате естественного разрушения материала образцов вдоль наклонной плоскости, ориентация которой отвечает критерию Мора-Кулона для разрушения в ненарушенном образце.

В опыте BS02 формирование макроразрыва выполнялось в режиме ступенчатого увеличения осевой нагрузки с управлением по деформации. В опыте BS03 на стадии формирования макроразрыва использовался режим нагружения

с обратной связью по акустической эмиссии, при котором пресс уменьшает скорость деформирования при увеличении акустической активности [Lockner et al., 1991; 1992; Смирнов и др., 2001]. Давление всестороннего сжатия P_c и поровое давление P_p в обоих опытах на этой стадии не менялись и составляли: $P_c = 40$ МПа и $P_p = 10$ МПа.

В опыте BS02 образование макроразрыва сопровождалось проскальзыванием по разрыву со сбросом осевых напряжений. В опыте BS03 макроразрыв формировался постепенно, благодаря режиму нагружения с обратной связью по акустической эмиссии. В обоих опытах осевое напряжение в условиях контроля прес-сом неизменности деформации падает при образовании макроразрывов вследствие уменьшения эффективных упругих свойств образца с макроразрывом.

На второй стадии экспериментов, в образцах, со сформированными «разломными зонами», проводилось собственно моделирование афтершоковых последовательностей. Эффект увеличения напряжений на природных разломах, окружающих очаг главного события, моделировался в экспериментах ступенчатым увеличением прессом осевой нагрузки на образец и исследовалась релаксационная часть афтершокового процесса.

Ступеньки нагрузки формировались в режиме управления прессом по деформации – прес-совое оборудование обеспечивало заданную скорость нарастания деформации ступеньки и последующую неизменность величины деформации вплоть до момента начала следующей ступеньки. Скорость нарастания ступеньки инициирующей деформации всегда была одной и той же – равной 10^{-3} 1/с. Иницирующие ступеньки задавались при различных, увеличивающихся уровнях осевых напряжений.

При некотором уровне осевых напряжений увеличение деформаций, задаваемое прессом, переставало приводить к увеличению напряжений, что можно объяснить переходом контакта сформированного разлома в режим проскальзывания, когда имеющиеся на контакте зацепы (asperity) оказывались разрушенными. В этой ситуации ступенчатое нагружение приостанавливалось и производилось увеличение давления всестороннего сжатия, в результате чего на контакте формировались новые зацепы. После этого ступенчатое нагружение возобновлялось. В обоих экспериментах было реализовано по два

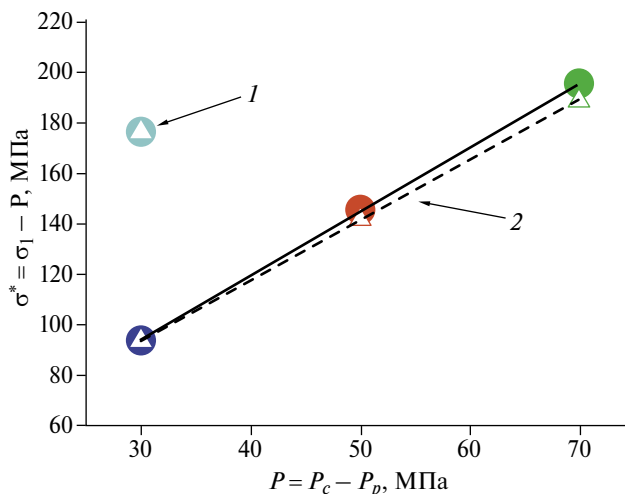


Рис. 2. Зависимость прочности образцов на одноосное сжатие σ^* от эффективного давления всестороннего сжатия P (разности давления всестороннего сжатия и порового давления) в экспериментах BS02 (кружки) и BS03 (треугольники). Цвета соответствуют цветам кривых 5 на рис. 1: 1 – ненарушенный образец на подготовительной стадии, 2 – образец со сформированным макроразрывом на рабочей стадии. Для стадии 2 показаны линии регрессий: сплошная – BS02, пунктирная – BS03.

таких акта увеличения давления всестороннего сжатия.

На рис. 2 представлена зависимость прочности образцов на одноосное сжатие со сформированными макроразрывами (номер 2 на рис. 2) от эффективного давления, равного разности давления всестороннего сжатия и порового давления. Прочность представлена значениями дифференциальных напряжений – разности осевых напряжений и компоненты напряжения всестороннего сжатия, действующего вдоль этой оси. Прочность оценивалась как среднее значение дифференциального напряжения на ступеньках деформации, приходящихся на стадии проскальзывания контакта макроразрыва. Проскальзывания контакта свидетельствует о достижении напряжениями на контакте предела прочности зацепов. На этом же рисунке показана прочность цельного образца, оцененная по максимальному значению дифференциального напряжения, достигнутого непосредственно перед образованием макроразрыва.

Линейная аппроксимация зависимости прочности от давления соответствует критерию разрушения Мора–Кулона по плоскости, ориентированной под углом θ к главной оси сжатия [King 2009; Jaeger et al., 2007]:

$$\tau_A(\theta) = \tau_0, \tag{2}$$

где: τ_0 – кулоновская прочность, $\tau_A(\theta)$ – кулоновские напряжения, зависящие от касательных $\tau(\theta)$ и нормальных $\sigma(\theta)$ напряжений:

$$\tau_A(\theta) = \tau(\theta) - k\sigma(\theta), \quad (3)$$

k – коэффициент внутреннего трения. Напряжения сжатия считаются положительными, как это принято в технике эксперимента (в отличие от теоретической механики сплошной среды, где сжимающие напряжения отрицательны).

В рамках критерия Мора–Кулона прочность на одноосное сжатие σ^* линейно зависит от эффективного давления всестороннего сжатия $P = P_c - P_p$:

$$\sigma^* = \sigma_0^* + \alpha P. \quad (4)$$

Оценки параметров σ_0^* и α , получаемые по экспериментальным данным, позволяют оценить параметры материала образцов k и τ_0 :

$$k = \frac{\alpha \sin 2\theta}{2 + \alpha(1 - \cos 2\theta)}, \quad (5)$$

$$\tau_0 = \frac{\sin 2\theta - k(1 - \cos 2\theta)}{2} \sigma_0^*. \quad (6)$$

Для отыскания угла θ использовались данные о локации акустических событий, позволяющие определить наклон плоскости сформированного макроразрыва к оси нагружения. В опыте BS02 $\theta = 33^\circ$, в опыте BS03 $\theta = 35^\circ$, погрешность оценок углов составляет 3° . Оценки k и τ_0 по формулам (5) и (6) на основании линейных аппроксимаций данных, представленных на рис. 2, дают $k = 0.66 \pm 0.02$, $\tau_0 = 4.6 \pm 0.5$ МПа для BS02 и $k = 0.63 \pm 0.02$, $\tau_0 = 5.2 \pm 0.6$ МПа для BS03. Приведенные погрешности определяются погрешностями показанных на рис. 2 линий регрессий. Сравнение этих оценок свидетельствует, что прочностные характеристики образцов BS02 и BS03 можно считать одинаковыми в пределах ошибок.

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНОВ ОМОРИ И ГУТЕНБЕРГА–РИХТЕРА ОТ НАПРЯЖЕНИЙ

Зависимости параметров модифицированного закона Омори (1) и наклона графика повторяемости (параметра Гутенберга–Рихтера) искались от уровня действующих напряжений при различных значениях давления всестороннего сжатия. Оценки параметров осуществлялись для

каждой серии акустических событий, инициированных ступенькой деформации.

Для оценки параметров p и c закона Омори (1) использовался Байесовский подход, разработанный в работе [Holschneider et al., 2012] (и снабженный открытым кодом¹), позволяющий получить как оценки параметров, так и их статистические погрешности. Применение этого подхода при исследовании природных афтершоков показало его эффективность в сравнении с другими известными статистическими методами оценки параметров закона Омори [Omni et al., 2016]. Для наклона графика повторяемости использовалась оценка максимального правдоподобия с учетом усечения распределения в области больших магнитуд [Page, 1968; Pickering et al., 1995; Смирнов, Завьялов, 2012]. Эта методика позволяет получить оценки сверху и снизу для истинного значения наклона графика повторяемости [Смирнов, Завьялов, 2012]. Она корректно работает даже в случае небольших динамических диапазонов энергий событий (что актуально для условий лабораторных экспериментов).

На рис. 3 для двух уровней напряжений показаны примеры спада акустической активности $\frac{\Delta n}{\Delta t}$ и ее аппроксимация согласно модифицированному закону Омори (1). Точками на рис. 3 представлены не агрегированные значения $\frac{\Delta n}{\Delta t}$ при $\Delta n = 1$, отвечающие интервалам между отдельными акустическими событиями. Также приведены агрегированные значения $\frac{\Delta n}{\Delta t}$ для $\Delta n = 100$, рассчитанные в скользящих окнах со сдвигом на 20 событий. Разрешение акустических событий по времени в процессе их регистрации составляло 0.1 мс, в результате чего максимальное значение активности ограничено величиной 10^4 1/с.

Оценки параметров производились в области, ограниченной плоскостями, параллельными сформированному макроразрыву и отстоящими от плоскости разрыва на расстояние 30 мм. Селекция исключала акустические события, расположенные вблизи оснований образца, соприкасающихся с пуансонами пресса (см. врезки на рис. 1 для опыта BS03). Генерация таких краевых событий не связана с процессом разрушения в области макроразрыва и объясняется условиями на контакте пуансонов с образцом [Paterson, Wong, 2005].

¹ <http://www.agnld.uni-potsdam.de/~hols/software/patate/>

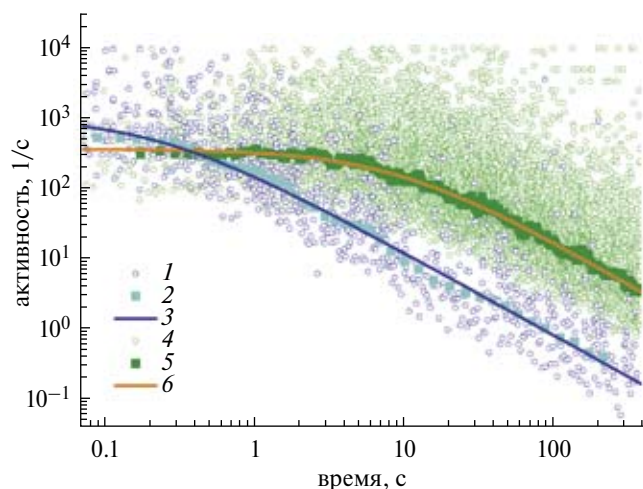


Рис. 3. Примеры спада акустической активности для различных уровней осевого напряжения σ_1 и давления всестороннего сжатия P (эксперимент BS02): 1–3 – $\sigma_1 = 134$ МПа, $P = 40$ МПа; 2–4 – $\sigma_1 = 275$ МПа, $P = 80$ МПа; 1, 4 – не агрегированные значения; 2, 5 – значения, агрегированные по 100 событий в скользящем окне со сдвигом на 20 событий; 3, 6 – аппроксимация согласно модифицированному закону Омори (1).

На рис. 4 сведены результаты оценок параметров, полученных в обоих экспериментах. Каждая точка – результат оценки параметров по серии акустических событий, возбужденных одной ступенькой осевой нагрузки. Напряжения, отложенные по оси абсцисс – уровни дифференциальных осевых напряжений, отвечающих приложенным к образцам инициирующим ступенькам деформации.

Первая группа данных (представлена на рис. 4а голубым цветом) получена на подготовительной стадии опыта BS02 и соответствует режиму разрушения в целом образце – до образования макроразрыва.

Вторая группа данных (представлена на рис. 4 синим цветом) соответствует режиму проскальзывания контакта по макроразрыву при том же значении эффективного давления всестороннего сжатия $P = P_c - P_p$, при котором макроразрыв был сформирован на подготовительном этапе каждого опыта, $P = 30$ МПа. В этом режиме ступеньки инициирующих деформаций не вызывают (из-за проскальзывания) увеличения действующих напряжений.

Третья и четвертая группы данных соответствуют режимам увеличения действующих напряжений в результате ступенчатой деформаций на этапах с увеличенными значениями P , равными 50 МПа и 70 МПа (представлены красным и зеленым цветами, соответственно).

На начальных уровнях дифференциальных напряжений при каждом уровне эффективно-го давления всестороннего сжатия, количество акустических событий, инициируемых одинаковыми ступеньками деформаций, невелико и, соответственно, велики погрешности статистических оценок параметров. По мере увеличения действующих напряжений и приближения их к пределам прочности, акустическая активность увеличивается, и статистика становится достаточной для получения более надежных оценок параметров.

На рис. 4а видно, что параметры Омори и Гутенберга–Рихтера закономерно изменяются в зависимости от уровня осевых напряжений и давления всестороннего сжатия. При этом значения параметров Омори, полученные в различных экспериментах на рабочей стадии (при наличии макроразрыва) при примерно одинаковых уровнях напряжений, совпадают между собой в пределах их статистических погрешностей.

На подготовительной стадии, при целом образце, параметр Омори p существенно не меняется, а параметр c увеличивается с ростом действующих напряжений (голубые кривые на рис. 4а).

На рабочей стадии при наличии макроразрыва параметр p увеличивается с ростом действующих напряжений – в пределах каждого уровня давления всестороннего сжатия тенденция видна во всем диапазоне напряжений, а в области напряжений $\sigma > 0.9\sigma^*$ увеличение параметра p выходит из коридора погрешностей (статистически значимо). Зависимость от давления всестороннего сжатия проявляется в том, что с увеличением давления те же значения параметра p достигаются при более высоких уровнях осевых напряжений.

Второй параметр модифицированного закона Омори c на рабочей стадии уменьшается с ростом действующих напряжений. Тенденция заметна во всем диапазоне напряжений, величина уменьшения составляет примерно один порядок в пределах каждого уровня давления всестороннего сжатия. В области напряжений $\sigma > 0.9\sigma^*$ уменьшение статистически значимо. При переходе с меньшего уровня давления всестороннего сжатия на больший, уровень значений параметра c увеличивается примерно на порядок (на рис. 4 кривые вариаций параметра c , полученные при разных значениях давления всестороннего сжатия, сдвинуты друг относительно друга по оси ординат).

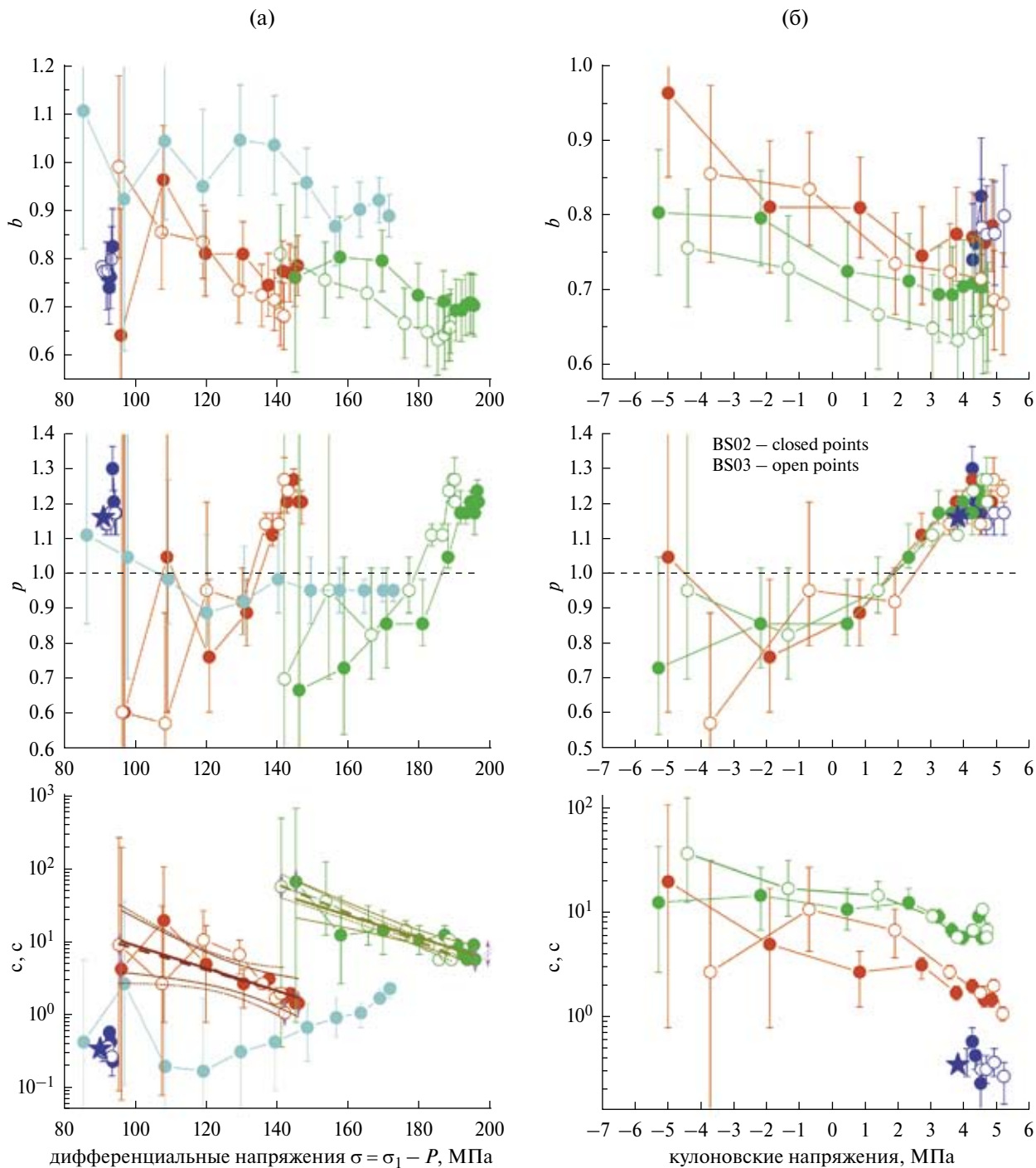


Рис. 4. Зависимости параметров законов Омори и Гутенберга–Рихтера от дифференциальных (а) и кулоновских (б) напряжений по данным экспериментов BS02 (залитые символы) и BS03 (открытые символы), у точек показаны 95-ти процентные доверительные интервалы. Цвета соответствуют цветам кривых 5 на рис. 1. Звездочкой показаны значения для последовательности акустических событий, возникших после естественного образования макроразрыва на подготовительной стадии эксперимента BS02. На рисунке (а) для параметра c показаны линии регрессий и их доверительные интервалы: сплошные – BS02, пунктирные – BS03.

Отметим, что в наших исследованиях мы не обнаружили эффекта перегрузки системы регистрации акустических сигналов даже при самых высоких уровнях потока акустических

событий. Но если все же допустить наличие такого эффекта, артефактная зависимость параметра c от напряжений была бы противоположной обнаруженной – c увеличивался бы

с ростом напряжений. Длительность интервала перегрузки системы регистрации будет тем больше, чем выше акустическая активность, а активность увеличивается с ростом напряжений. Соответственно, длительность интервала перегрузки системы будет возрастать с ростом напряжений. Мы же обнаружили уменьшение параметра c при увеличении напряжений.

На графики эмпирических зависимостей параметра c от осевых напряжений для двух уровней давлений всестороннего сжатия нанесены их экспоненциальные аппроксимации (прямые линии в полулогарифмическом масштабе на рис. 4а):

$$c(\sigma) = c_0 e^{-\beta\sigma}. \quad (7)$$

Соответствующие параметры регрессий сведены в таблицу.

Для эксперимента BS02 на рис. 4 звездочкой показаны значения оценок параметров Омори для последовательности акустических событий, возникших после естественного образования макроразрыва на подготовительной стадии эксперимента. Видно, что эти значения близки к значениям, оцененным по последовательностям, возбужденным скачками деформаций, задаваемыми прессом, при тех же уровнях осевых напряжений и давлении всестороннего сжатия.

Параметр b уменьшается с увеличением действующих напряжений. При этом разброс значений, полученных в двух экспериментах, больше, чем для параметров закона Омори.

Эксперименты были проведены в условиях сложного напряженного состояния образцов, когда изменялись как девиаторная (дифференциальные напряжения), так и шаровая (эффективное давление) части тензора напряжений. Зависимости параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от напряжений также оказались сложными и различающимися по характеру при увеличении осевых напряжений и при увеличении давления всестороннего сжатия. Ситуация, однако, проясняется при переходе к кулоновским напряжениям.

На рис. 4б полученные результаты оценок параметров представлены в зависимости от кулоновских напряжений, действующих на площадках макроразрывов. Кулоновские напряжения рассчитывались для рабочей стадии экспериментов по формуле (3) на основе результата анализа данных, представленных на рис. 2.

На рис. 4б видно, что в кулоновских напряжениях увеличение параметра p оказывается одинаковым при различных уровнях давления всестороннего сжатия. Разброс точек носит случайный характер и соизмерим со статистическими погрешностями оценок параметра p .

В конце каждого цикла нагружения с заданным уровнем давления всестороннего сжатия, при переходе к режиму проскальзывания на контакте макроразрыва (при достижении кулоновскими напряжениями величины около 3.8 МПа), увеличение параметра p прекращается. Возможно, это нужно рассматривать как свидетельство изменения параметров или механизма релаксации при переходе разрушения к режиму проскальзывания на контакте макроразрыва. Не ясно, реализуется ли такое же отличие в природных условиях, однако его можно искать в сопоставлении параметров афтершоковых последовательностей в крупных, хорошо развитых разломных зонах, и в областях площадной континентальной сейсмичности.

Изменения параметра c в кулоновских напряжениях распадаются на три группы, отвечающие различным уровням давления всестороннего сжатия. Уменьшения c с ростом кулоновских напряжений при разных давлениях имеют сходный характер, но кривые смещены друг относительно друга по оси ординат.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во Введении отмечалось, что ряд моделей афтершоковых процессов предсказывают зависимость параметров Омори от действующих в среде напряжений. В частности, согласно модели [Narteau et al., 2009] ожидается уменьшение параметра c с ростом напряжений, и результаты

Таблица. Параметры экспоненциальной аппроксимации $c(\sigma) = c_0 e^{-\beta\sigma}$

Эксперимент	$P = P_c - P_p$, МПа	$\lg c_0 (A)$	β , 1/МПа
BS02	50	2.5 ± 0.6	0.037 ± 0.012
BS03	50	2.4 ± 0.8	0.035 ± 0.014
BS02	70	3.8 ± 0.5	0.035 ± 0.007
BS03	70	4.6 ± 0.3	0.046 ± 0.007

наших экспериментов подтверждают выводы этой модели. Более того, эксперименты позволили выявить для исследованных образцов экспоненциальный характер зависимости параметра c от напряжений – формула (7).

В работе [Ouillon, Sornette, 2005] для интерпретации параметров закона Омори в модель афтершокового процесса были добавлены представления кинетической концепции разрушения Журкова. В соответствии с формулой Журкова [Zhurkov, 1965; Журков, 1968] вероятность макроразрушения, определяемая термической активацией на микроуровне, экспоненциально зависит от уровня напряжений σ в среде:

$$F = F_0 e^{\frac{\gamma\sigma}{KT}}, \quad (8)$$

где: T – температура, K – постоянная Больцмана, γ – параметр Журкова, зависящий от структуры неоднородностей материала.

Параметр F_0 в формуле (8) обусловлен прочностными свойствами среды и определяется как константами материала (энергией диссоциации межионных связей), так и величиной давления [Регель и др., 1974]. В наших экспериментах эффективная прочность сформированной разломной зоны (макроразрыва) определяется прочностными свойствами зацепов и величиной давления всестороннего сжатия. Было обнаружено, что уровень значений параметра c увеличивается с увеличением эффективного давления P . В таблице были представлены параметры c_0 и β аппроксимации $c(\sigma, P) = c_0(P)e^{-\beta\sigma}$, что соответствует формуле (8) в части зависимости от напряжения σ . Из таблицы видно, что c_0 увеличивается с ростом давления, тогда как в пределах статистических погрешностей параметр β не зависит от давления. В рамках модели [Narteau et al., 2009] это можно интерпретировать как увеличение параметра c с увеличением прочности среды. Согласно этой модели, параметр c определяется величиной перенапряжений, уменьшаясь с увеличением напряжений и увеличиваясь с увеличением прочности. Экспериментальные данные позволяют конкретизировать вид зависимости параметра c от прочности для исследованных образцов.

На рис. 5 показана зависимость предельных значений c^* , соответствующих максимальным кулоновским напряжениям, когда осевые напряжения достигают величин эффективной прочности по макроразрыву, от величины этой эффективной прочности σ^* (взяты средние по обоим опытам значения c в диапазоне кулоновских напряжений от 3.8 МПа до 4.3 МПа при

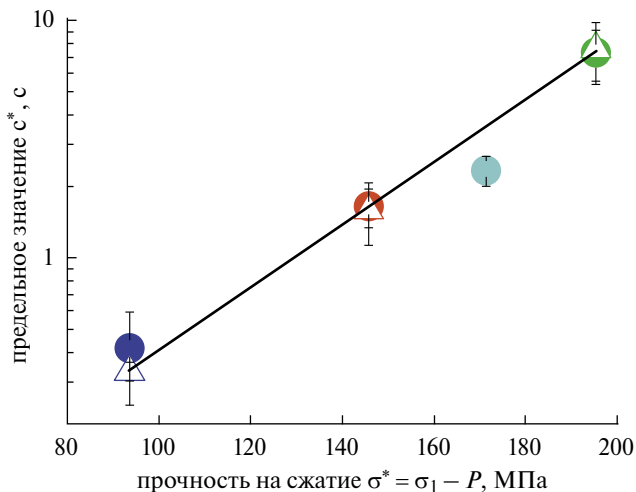


Рис. 5. Зависимость предельных значений параметра Омори c^* от прочности на сжатие. Цвета точек соответствуют цветам кривых 5 на рис. 1, эксперименты BS02 (кружки) и BS03 (треугольники). Прямая показана экспоненциальная аппроксимация (9).

трех уровнях давления всестороннего сжатия). Видно, что зависимость c^* от σ^* близка к экспоненциальной. Ее аппроксимация, осредненная по обоим опытам, имеет вид:

$$c^* = (0.03 \pm 0.02) e^{(0.03 \pm 0.001)\sigma^*}. \quad (9)$$

На этот же график нанесено предельное значение c^* , полученное на подготовительной стадии для целого образца при напряжениях, равных пределу прочности. Видно, что эта точка также близка к зависимости параметра c^* от прочности, полученной для разломной зоны.

Зависимости параметра Омори c от кулоновских напряжений и прочности, представленные на рис. 4 и рис. 5, можно объединить в единую зависимость:

$$\ln \frac{c}{c^*} = l_1 \tau_c + l_0, \quad (10)$$

$$\ln c^* = m_1 \sigma^* + m_0. \quad (11)$$

На рис. 6 представлены точки в осях, соответствующих формуле (10), построенные с учетом (11) при значениях $m_1 = 0.03 \text{ МПа}^{-1}$ и $m_0 = -3.93$ согласно (9). Видно, что точки, отвечающие разным величинам прочности для обоих экспериментов, в таких осях ложатся на единую зависимость. Регрессия дает для коэффициентов (10) оценки: $l_1 = -0.14 \pm 0.02 \text{ МПа}^{-1}$ и $l_0 = 0.83 \pm 0.07$.

Обращает на себя внимание близость показателей зависимостей параметра c и его предельного значения c^* от напряжения σ и прочности σ^*

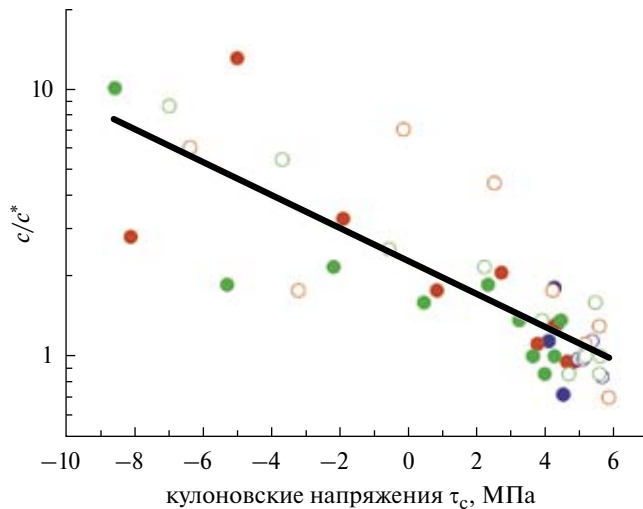


Рис. 6. Параметр Омори c , нормированный на величину c^* , отвечающую пределу прочности. Цвета точек соответствуют цветам кривых 5 на рис. 1, заливные точки – эксперимент BS02, открытые – BS03. Показана линия регрессии согласно (10).

соответственно – формулы (7) и (9). Коэффициент β в (7) имеет характерное значение около -0.037 1/МПа, соответствующий коэффициент в (9) равен 0.03 1/МПа. Если допустить, что абсолютные значения этих коэффициентов совпадают, то зависимость параметра Омори c от напряжений и прочности принимает вид $c \sim e^{\beta(\sigma^* - \sigma)}$ – величина параметра c определяется разностью прочности и действующих напряжений, т. е. тем, насколько далеки напряжения от предела прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На двух идентичных образцах песчаника проведены эксперименты по моделированию афтершоковых режимов при различных уровнях осевых напряжений, давления всестороннего сжатия и неизменном поровом давлении. Анализ результатов экспериментов позволил выявить ряд зависимостей параметров акустического режима от напряжений и характера разрушения и выдвинуть предположения об их природе.

Параметры модельной афтершоковой релаксации – параметры Гутенберга–Рихтера b и Омори p и c – зависят от параметров напряженного состояния образцов – уровня осевого напряжения и эффективного давления всестороннего сжатия. Наклон графика повторяемости b уменьшается с ростом осевых напряжений при всех уровнях давления всестороннего сжатия. При разрушении по сформированному

«разлому» параметр релаксации p увеличивается с увеличением осевых напряжений; параметр задержки начала релаксации c экспоненциально уменьшается с увеличением осевых напряжений и экспоненциально увеличивается с увеличением давления всестороннего сжатия. При разрушении целого образца параметр p не меняется с ростом осевых напряжений, а параметр c незначительно увеличивается.

Изменения рассмотренных параметров акустического режима в случае сложного напряженного состояния, когда изменяются как девиаторная (дифференциальные напряжения), так и шаровая (эффективное давление) части тензора напряжений, приобретают унифицированный вид при переходе к кулоновским напряжениям. В кулоновских напряжениях увеличение параметра p оказывается одинаковым при различных уровнях давления всестороннего сжатия. Уменьшения параметра c с ростом кулоновских напряжений при разных давлениях имеют сходный экспоненциальный характер, но кривые зависимостей при различных уровнях давления всестороннего сжатия смещены друг относительно друга. Уровень значений параметра c и его предельное (минимальное) значение увеличивается с увеличением давления, что можно интерпретировать как зависимость параметра c от эффективной прочности «разломной» зоны (определяемой в проведенных экспериментах давлением всестороннего сжатия).

Зависимость значений параметра c от осевых напряжений и давления можно объяснить, если предположить, что задержка начала степенного спада афтершоковой активности, характеризуемая этим параметром, имеет кинетическую природу. В пользу такой гипотезы говорят выявленные в экспериментах экспоненциальные зависимости параметра c от напряжений и эффективной прочности. В рамках этой гипотезы, на основе формулы Журкова для долговечности материала удастся унифицировать зависимость параметра c от кулоновских напряжений при различных величинах эффективной прочности. Полученные оценки зависимости параметра c от прочности и напряжений позволяют предположить, что величина c определяется разностью прочности и действующих напряжений, показывая тем самым, сколь далеко напряженное состояние среды от критического, отвечающего пределу прочности.

Дальнейшее подтверждение или опровержение рассмотренного предположения о кинетической природе задержки спада афтершоковой активности может быть получено на основе лабораторных и натурных исследований зависимости параметра c от температуры и давления, а также от прочности среды.

В натуральных условиях температура и давление (и обусловленная им эффективная прочность) меняются с глубиной, что определяет перспективность исследования закономерностей изменения параметров Омори в зависимости от глубины афтершоковых последовательностей. Поскольку прочность, согласно критерию Мора–Кулона, увеличивается с увеличением давления, то, согласно нашим лабораторным результатам следует ожидать увеличения значений параметра c с глубиной. Однако согласно кинетической концепции прочности, с увеличением температуры долговечность материала уменьшается, что в рамках механики разрушения следует трактовать как уменьшение прочности с температурой. Поскольку и давление, и температура в целом растут с глубиной, изменения прочности, а вместе с ней и параметра c , могут иметь немонотонный характер – в зависимости от того, какая тенденция – увеличения прочности от давления или ее уменьшения от температуры – преобладает в том или ином диапазоне глубин. Недавно опубликованные результаты исследования изменения параметра c по глубине в Калифорнии подтверждают эти предположения [Shebalin, Narteau, 2017].

Если задержка начала степенного афтершокового спада обусловлена кинетикой разрушения, и обнаруженная в наших экспериментах экспоненциальная зависимость параметра c связана с формулой (8), то следует ожидать зависимости c и от температуры, которая входит в (8) симметрично с напряжениями σ . В частности, следует ожидать аномальных значений параметра c в областях с повышенными значениями температуры.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке совместным российско-индийским проектом РФФИ-DST India: грант Российского научного фонда № 16-47-02003, грант INT/RUS/RSF/P-13 Департамента науки и технологии Правительства Индии – в части анализа экспериментальных данных и интерпретации полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов С.Д.* О распределении числа импульсов по энергии при разрушении горных пород // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 12. С. 1850–1852.
- Журков С.Н.* Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. 1968. № 3. С. 46–52.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. 1974. 560 с.
- Смирнов В.Б.* Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 93–105.
- Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных. // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.
- Смирнов В.Б., Габсатарова И.П.* Представительность каталога землетрясений северного Кавказа: расчетные данные и статистические оценки // Вестник ОГГГН РАН. 2000. Т. 14. № 4. С. 35–41.
- Смирнов В.Б., Завьялов А.Д.* К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 63–88.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Сергеева С.М.* О подобии и обратной связи в экспериментах по разрушению горных пород // Физика Земли. 2001. № 1. С. 89–96.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Bohnenstiehl D.R., Tolstoy M., Dziak R.P., Fox C.G., Smith D.K.* Aftershock sequences in the mid-ocean ridge environment: an analysis using hydroacoustic data // Tectonophysics. 2002. V. 354. P. 49–70.
- Creamer F.H., Kisslinger C.* The relationship between temperature and the decay parameter for aftershock sequences near Japan. EOS. Trans. Am. Geophys. Union. 1993. V. 74. F417.
- Davidson J., Gu C., Baiesi M.* Generalized Omori–Utsu law for aftershock sequences in southern California // Geophys J Int. 2015. V. 201 (2). P. 965–978.
- Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting/R. Abercrombie et al. AGU Geophysical monograph 170. 2000. 327 p.
- Enescu B., Mori J., Miyazawa M.* Quantifying early aftershock activity of the 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake (Mw6.6) // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. B04310. doi:10.1029/2006 JB004629
- Goebel T.H.W., Becker T.W., Schorlemmer D., Stanchits S., Sammis C., Rybacki E., Dresen G.* Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics // JGR. 2012. V. 117. B03310. doi:10.1029/2011 JB008763
- Gupta H.* A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India // Earth Science Reviews. 2002. V. 58. P. 279–310.

- Hatano T., Narteau C., Shebalin P.* Common dependence on stress for the statistics of granular avalanches and earthquakes // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. P. 12280.
- Helmstetter A., Shaw B.E.* Relation between stress heterogeneity and aftershock rate in the rate-and-state model // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2006. V. 111 (B7).
- Hirata T.* Omori's power law aftershock sequences of microfracturing in rock fracture experiment // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 6215–6221.
- Holschneider M., Narteau C., Shebalin P., Peng Z., Schorlemmer D.* Bayesian analysis of the modified Omori law // *Journal of Geophys. Res.* 2012. V. 117. B06317. doi: 10.1029/2011JB009054
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.* *Fundamentals of Rock Mechanics*. Wiley-Blackwell. 2007. 488 p.
- Kagan Y.Y.* Short-term properties of earthquake catalogs and models of earthquake source // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2004. V. 94. № 4. P. 1207–1228.
- Kagan Y.Y., Houston H.* Relation between mainshock rupture process and Omori's law for aftershock moment release rate // *Geophys J Int.* 2005. V. 163 (3). P. 1039–1048
- Kanamori H.* *Earthquake Seismology // Treatise on geophysics*. Elsevier B.V. 2015. V.4. 653 p.
- King G.C.P.* Fault Interaction, Earthquake Stress Changes, and the Evolution of Seismicity // *Earthquake Seismology in Treatise on geophysics / Ed. Kanamori H.* Elsevier B.V. 2009. V. 4. P. 225–257.
- Kisslinger C., Jones L.M.* Properties of aftershock sequences in southern California // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № 11. P. 947–11958.
- Lei X., Ma Sh.* Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process // *Earthq Sci.* 2014. V. 27 (6). P. 627–646. doi: 10.1007/s11589–014–0103-y
- Lei X., Masuda K., Nishizawa O., Jouniaux L., Liu L., Ma W., Satoh T.* Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rock // *J Struct Geol.* 2004. V. 26. P. 247–258.
- Leonard M., Kennett B.L.N.* Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. V. 113 (1–4) P. 247–263.
- Lippiello E., Giacco F., Marzocchi W., Godano C., de Arcangelis L.* Mechanical origin of aftershocks. *Sci Rep* 5. 2015. 15560. doi:10.1038/srep15560
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A.* Quasi-static fault growth and shear fracture // *Nature*. 1991. V. 350. № 6313 P.39–42.
- Lockner D.A. et al.* Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*. Ed. Evans B., Wong T.-F. London: Academic Press. 1992. P. 3–31.
- Lockner D.A.* The role of acoustic emission in the study of rock fracture // *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* 1993. V. 30 P. 883–899.
- Lockner D.A., Byerlee J.D.* Acoustic emission and fault formation in rocks. In *Proc. 1 st Conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geol. Structures and Materials*. Trans-Tech. Publications. Clausthal-Zellerfeld / Ed. Hardy H.R. and Leighton F.W. 1977. P. 99–107.
- Lolli B., Gasperini P.* Aftershocks hazard in Italy part I: estimation of time-magnitude distribution model parameters and computation of probabilities of occurrence // *J Seismol.* 2003. V. 7 (2). P. 235–257.
- Mekkawi M., Grasso J.-R., Schnegg P.A.* A Long-Lasting Relaxation of Seismicity at Aswan Reservoir, Egypt, 1982–2001 // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2004. V. 94. P. 479–492.
- Mogi K.* Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena // *Bull Earthq Res Inst.* 1962. V. 40. P. 125–173.
- Nanjo K., Enescu B., Shcherbakov R., Turcotte D., Iwata T., Ogata Y.* Decay of aftershock activity for Japanese earthquakes // *J Geophys Res Solid Earth.* 2007. V. 112 (B8).
- Narteau C., Byrdina S., Shebalin P., Schorlemmer D.* Common dependence on stress for the two fundamental laws of statistical seismology // *Nature*. 2009. V. 462. № 3. P. 642–646. doi: 10.1038/nature08553
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.* Loading rates in California inferred from aftershocks // *Nonlin. Process. Geophys.* 2008. V. 15. P. 245–263.
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.* Temporal limits of the power law aftershock decay rate // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. B2359. doi: 10.1029/2002JB001868
- Nelder J., Mead R.* A simplex method for function minimization // *Comput.J.* 1965. V. 7. P. 308–312.
- Nur A., Booker J.R.* Aftershocks caused by pore fluid flow? // *Science*. 1972. V. 175. P. 885–888.
- Ojala I.O., Main I.G., Ngwenya B.T.* Strain rate and temperature dependence of Omori law scaling constants of AE data: implications for earthquake foreshock-aftershock sequences // *Geophys Res Lett.* 2004. V. 31: L24617. doi:10.1029/2004GL020781
- Ommi S., Zafarani H., Smirnov V.B.* Bayesian estimation of the Modified Omori Law parameters for the Iranian Plateau // *J. Seismology.* 2016. V. 20. P. 953–970. doi: 10.1007/s10950–016–9574–8
- Ouillon G., Sornette D.* Magnitude-dependent Omori law: theory and empirical study // *J Geophys Res. Solid Earth.* 2005. V. 110 (B4).
- Page R.* Aftershocks and microaftershocks of the Great Alaska Earthquake of 1964 // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1968. V. 58. № 3. P. 1131–1168.
- Paterson M.S., Wong T.F.* *Experimental Rock Deformation – The Brittle Field*. Berlin, Heidelberg. New York: Springer-Verlag. 2005. 348 p.
- Peng Z., Vidale J.E., Houston H.* Anomalous early aftershock decay rate of the 2004 Mw6.0 Parkfield, California, earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L17307. doi:10.1029/2006GL026744
- Peng Z., Vidale J.E., Ishii M., Helmstetter A.* Seismicity rate immediately before and after mainshock rupture from

- highfrequency waveforms in Japan // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. B03306. doi:10.1029/2006 JB004386
- Pickering G., Bull J.M., Sanderson D.J. Sampling power-low distribution // *Tectonophysics*. 1995. V. 248. P. 1–20.
- Rabinowitz N., Steinberg D.M. Aftershock decay of three recent strong earthquakes in the Levant // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1998. V. 88. P. 1580–1587.
- Rodkin M.V., Tikhonov I.N. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2016. doi: 10.1016/j.pce.2016.04.001
- Rudajev V. Vilhelm J., Lokajicek T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure // *Int. Journ. Rock Mech. and Mining Sci.* 2000. V. 37. P. 699–704.
- Scholz C. Experimental study of the fracturing process in brittle rock // *J Geophys Res.* 1968 a.V. 73. P. 1447–1454.
- Scholz C. Microfractures, aftershocks, and seismicity // *Bull Seismol Soc Am.* 1968 b. V. 58:3. P. 1117–1130.
- Schubnel A., Thompson B.D., Fortin J., Gueguen Y., Young R.P. Fluid-induced rupture experiment on Fontainebleau sandstone: premonitory activity, rupture propagation, and aftershocks // *Geophys Res Lett.* 2007. V. 34. L19307. doi:10.1029/2007 GL031076
- Shcherbakov R., Turcotte D.L., Rundle J.E. A generalized Omori's law for earthquake aftershock decay // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L11613. doi: 10.1029/2004 GL019808
- Shebalin P., Narteau C. Depth dependent stress revealed by aftershocks // *Nature communications*. 2017. V. 8. 1317. doi:10.1038/s41467-017-01446-y
- Shebalin P., Narteau C., Holschneider M. From alarm-based to rate-based earthquake forecast models // *Bull. Seimol. Soc. of Am.* 2012. V. 102 (1). P. 64–72.
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Kartseva T.I., Mikhailov V.O., Chadha R.K., Aidarov F. Dynamics of Induced Seismicity during the Filling of the Nurek Reservoir // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2018. V. 54. № 4. doi: 10.1134/S1069351318040110
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V. Seismic regime relaxation properties from in situ and laboratory data // *Izvestiya Russian Academy of Sciences // Phys. Solid Earth*. 2004. V. 40 (10). P. 807–816.
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Benard P., Patonin A.V. Regularities in transient modes in the seismic process according to the laboratory and natural modeling // *Izvestiya Phys. Solid Earth*. 2010. V. 46 (2). P. 104–135.
- Stanchits S., Fortin J., Gueguen Y., Dresen G. Initiation and propagation of compaction bands in dry and wet Bentheim sandstone // *Pure and Applied Geophysics*. 2009. V. 166. P. 843–868. doi:10.1007/s00024-009-0478-1
- Stanchits S., Vinciguerra S., Dresen G. Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite // *Pure and Applied Geophysics* 2006. V. 163. (5–6) P. 975–994. doi:10.1007/s00024-006-0059-5
- Thompson B.D., Young R.P., Lockner D.A. Premonitory acoustic emissions and stick-slip in natural and smooth-faulted Westerly granite // *J Geophys Res.* 2009. V. 114: B02205. doi:10.1029/2008 JB005753
- Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R.S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // *J. Phys. Earth*. 1995. V. 43. P. 1–33.
- Vilhelm J., Rudajev V., Ponomarev A.V., Smirnov V.B., Lokajicek T. Statistical study of acoustic emissions generated during the controlled deformation of migmatite specimens // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. V. 100. P. 83–89. doi: 10.1016/j.ijrmm.2017.10.011
- Wiemer S., Katsumata K. Spatial variability of seismicity parameters in aftershock zones // *J Geophys Res., Solid Earth*. 1999. V. 104 (B6). P. 13135–13151.
- Wim Dubelaar C., Nijland T.G. The Bentheim sandstone: geology, petrophysics, varieties and its use as dimension stone. *Engineering geology for society and territory*. Springer / Eds. Lollino G. et al. 2015. V.8. P. 557–563. doi: 10.1007/978-3-319-09408-3_100
- Zang A., Wagner F.C., Dresen G. Acoustic emission, microstructure, and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101 (8) P. 17507–17521.
- Zhurkov S.N. Kinetic concept of the strength of solids // *Int. J. Fract. Mech.* 1965. V. 1. P. 311–323.

Laboratory Modeling of Aftershock Sequences: Stress Dependences of the Omori and Gutenberg–Richter Parameters

V. B. Smirnov^{a,b,c,*}, A. V. Ponomarev^a, S. A. Stanchits^d, M. G. Potanina^b, A. V. Patonin^e, G. Dresen^f, C. Narteau^c, P. Bernard^c, and S. M. Stroganova^a

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242

^bFaculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^cInstitut de Physique du Globe de Paris, Paris, France

^dSkolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, 121205 Russia

^eBorok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, 152742 Russia

^fGFZ German Research Centre for Geosciences, Section III.2: Geomechanics and Rheology, Potsdam, 14473 Germany

*E-mail: vs60@mail.ru

Received May 22, 2018

Laboratory experiments on studying the aftershock regime are carried out with sandstone specimens under different axial loading and uniform compression and constant pore pressure. The aftershock sequences are modeled by the scenario of stepwise increasing axial loading of a specimen with strain control ensuring regular generation of aftershock sequences. The experiments are conducted on intact specimens and on the specimens with preliminarily formed shear macrofractures simulating natural faults. The experiments were conducted with multichannel recording of the acoustic emission (AE) signals which made it possible to locate the AE sources. Several types of the dependence of the acoustic activity relaxation parameters (parameters p and c of the modified Omori law and the Gutenberg–Richter b -value) on the level of acting stresses are revealed. The b -value decreases with the growth of axial stresses at all levels of uniform compression. In the case of fracture on the preexisting fault, the Omori relaxation parameter p increases with the growth of axial stresses whereas parameter c (the time delay before the onset of relaxation) decreases with the growth of axial stresses and increases with the rise of the level of uniform compression. In the case of a fracture of an undamaged specimen, parameter p remains unchanged as the axial stresses grow, whereas parameter c increases slightly. Parameter variations in the case of a complex stress state with both varying deviatoric (differential stresses) and spherical parts (effective pressure) of the stress tensor take on a unified form when expressed in terms of Coulomb stresses. It is hypothesized that the time delay of the aftershock activity relaxation is determined by the kinetics of fracture in accordance with the kinetic concept of strength in solids. This hypothesis is supported by exponential dependence of parameter c on stresses and on the effective strength of the medium revealed in the experiments. Under this hypothesis, the dependences of parameter c on the Coulomb stresses can be unified for different effective strength values with the use of Zhurkov's formula for durability of materials. The obtained parameter estimates for the dependence of c on strength and stresses suggest that the c value is determined by the difference of the strength and the acting stresses, indicating how far the stress state of the medium is from the critical state corresponding to the ultimate strength.

Keywords: acoustic emission, laboratory modeling of seismicity, rock fracture, aftershock sequences, Coulomb stresses