

УДК 550.34.01

РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ИФЗ РАН С ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ 1970-Х ГОДОВ

© 2024 г. А. В. Пономарев, П. А. Казначеев*

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия***E-mail: p_a_k@mail.ru*

В статье представлен краткий исторический обзор лабораторных экспериментальных исследований, начатых в ИФЗ РАН в первой половине 1970-х годов по инициативе академика М. А. Садовского и воспроизводящих на моделях отдельные аспекты разрушения горных пород при сейсмическом процессе. Отмечены предпосылки и основные направления исследований. Приведены данные по отдельным экспериментам, основное внимание сосредоточено на методике. Даны основные сведения о крупномасштабном эксперименте по деформированию и разрушению блоков горных пород метрового размера на 50-тонном прессе. Эксперимент проводился в 1980-х годах под методическим и организационным руководством ИФЗ РАН (Г. А. Соболев) с привлечением широкого круга смежных организаций и специалистов. Описаны методика и результаты экспериментов на модели сейсмической бреши, экспериментов на слайдер-моделях разломов с триггерным воздействием и экспериментов на малых образцах с заданием сложного напряженного состояния. Результаты экспериментов поддержали основные идеи модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, предложенной в ИФЗ РАН в 1971 г.

Ключевые слова: физика разрушения горных пород, сейсмический процесс, лабораторный эксперимент, модель лавинно-неустойчивого трещинообразования, дилатантно-диффузионная модель, разломы.

Для цитирования: Пономарев А.В., Казначеев П.А. Развитие экспериментальных исследований разрушения горных пород в ИФЗ РАН с первой половины 1970-х годов // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 36–44. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_36

Введение

Развитие экспериментальных исследований в области физики очага землетрясения в ИФЗ РАН неразрывно связано с именем академика М. А. Садовского, который возглавил Институт в 1960 г. и которым он руководил более 30 лет. Этот период можно назвать «эпохой Садовского». В эти годы «геофизика, которая долгое время была скорее геомеханикой, действительно становится разделом физики» [Садовский, 1979; Садовский, 2004].

Как известно, в 1966 г. Михаил Александрович инициировал возобновление работ по проблеме прогноза землетрясений в ИФЗ РАН, а в 1969 г. сформулировал программу научных исследований, в которой заметное место занимали лабораторные и теоретические изыскания. Он указывал, что вряд ли можно уверенно говорить, что лабораторные модели будут полностью адекватны геологической среде, но сходство многих характерных процессов в модели и реальном очаге позволяет рассчитывать на перспективность лабораторных экспериментов. Ключевым положением являлось изучение физических свойств горных пород и процессов, протекающих в них при деформировании среды.

В 1969–1970 гг. при поддержке М. А. Садовского в ИФЗ РАН возникло новое направление «Физика очага землетрясения» (впоследствии был организован отдел), целью которого было соединить достижения сейсмологии и физики разрушения горных пород. Неформальными лидерами направления были В. И. Мячкин, Б. В. Костров, Г. А. Соболев, О. Г. Шамина. Теоретической основой направления служила кинетическая концепция прочности академика С. Н. Журкова [Журков и др., 1980]. С этого времени начинаются планомерные лабораторные эксперименты по выявлению закономерностей разрушения горных пород применительно к физике землетрясений.

Расширение сети сейсмологических наблюдений и развитие лабораторных экспериментов по разрушению горных пород позволило в конце 60-х и начале 70-х годов XX века предложить несколько моделей сейсмического процесса. Наиболее обсуждаемыми из них являются дилатантно-диффузионная (ДД) модель и модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ).

Модель ДД («*dilatancy model*») была основана на представлении о землетрясении как неустойчивой подвижке по существующему разлому [Brace, Byerly, 1966] и влиянии на этот процесс дилатансии горных пород и диффузии воды в приразломной зоне [Nur, 1972; Scholz et al., 1973].

Модель ЛНТ (иногда называемая «модель ИФЗ» или «*dry-dilatancy model*») была основана на представлении о землетрясении как развитии макроразрыва в изначально ненарушенной среде в результате лавинообразного роста множества трещин, стягивающихся к плоскости будущего разрыва. Её основные положения были впервые представлены на международном конгрессе по геодезии и геофизике (IUGG Congress) в Москве в 1971 г. [Mjachkin et al., 1972]. Основу модели ЛНТ составляют два явления: взаимодействие полей напряжений трещин и локализация процесса трещинообразования.

Во многом первичным посылом для создания обеих моделей послужила необходимость объяснения наблюдаемых перед землетрясениями бухтообразных вариаций («предвестников») различных физических параметров – деформации, скорости сейсмических волн, энергии землетрясений, наклона графика повторяемости, пористости пород, активности радона, удельного электрического сопротивления [Nur, 1972; Mjachkin et al., 1975]. Авторы обеих моделей отмечали, что особенно значимым для разработки моделей было обнаружение на Гармском полигоне вариаций отношения продольных и поперечных волн V_p/V_s перед землетрясениями [Нерсесов и др., 1971].

Важным было, во-первых, понимание необходимости усовершенствования теоретических моделей, поскольку каждая из них отражала только часть аспектов окружения сейсмического очага [Mjachkin et al., 1975]. Например, ДД-модель была большей частью основана на наблюдениях за неглубокими землетрясениями в Калифорнии, связанных с разломом Сан-Андреас.

Во-вторых, понимание необходимости новых лабораторных исследований процессов разрушения горных пород, моделирующих сейсмический процесс и сопоставляемых с полевыми наблюдениями [Ohnaka, 1973; Мячкин и др., 1974; Физика очага землетрясения, 1975].

В результате такого осмысления сформировалось несколько направлений изучения разрушения горных пород при моделировании сейсмического процесса, которые соответствовали общемировым исследовательским тенденциям и в разной степени разрабатывались в ИФЗ РАН или с участием специалистов ИФЗ РАН:

1. Существенное увеличение размера модели для уменьшения влияния границ и соответствующим увеличением числа разнородных датчиков [Dieterich, 1981; Соболев и др., 1982; Соболев, Кольцов, 1988; Beeler et al., 2012; Кочарян и др., 2022].

2. Формирование в квазиоднородных образцах включений, отличающихся по прочностным характеристикам, включая модель сейсмической брешы [Соболев и др., 1980; Sobolev, Rummel, 1982; Sobolev, 1986] и др.

3. Моделирование скольжения по разломам с разными свойствами разлома и способами задания напряженного состояния, в том числе неоднородного [Ohnaka, 1973; Byerlee, Summers, 1975; Spetzler et al., 1991; Кочарян, Новиков, 2015] и др.

4. Исследование влияния задаваемых внешних условий и триггерных (инициирующих) воздействий на разрушение образцов горной породы [Rice, Gu, 1983; Dieterich, 1987; Sobolev et al., 1993; Соболев и др., 2001; Закупин и др., 2006] и др.

5. Исследование эволюции разрушения в образцах горных пород при управлении сложным напряженным состоянием (включая всестороннее и поровое давление) с отслеживанием акустической эмиссии [Lockner et al., 1991; Соболев, Пономарев, 1999] и др.

Осветить все эксперименты по указанным направлениям не представляется возможным в рамках одной статьи, поэтому остановимся подробнее только на некоторых из них.

Методика и результаты некоторых экспериментов

В начале 1980-х годов по инициативе ИФЗ РАН были проведены эксперименты по деформированию и разрушению блоков горных пород метрового размера на 50-ти килотонном прессе (рис. 1). Исследовались блоки гранита, базальта, мрамора, известняка, бетона объемом порядка 1 м^3 и максимальным линейным размером до 2-х метров, что позволяло использовать множество датчиков разнообразных физических величин [Соболев и др., 1982; Соболев, Кольцов, 1988]. Работы проводились под методическим и организационным руководством ИФЗ РАН (Г. А. Соболев.) с привлечением специалистов из широкого круга институтов.

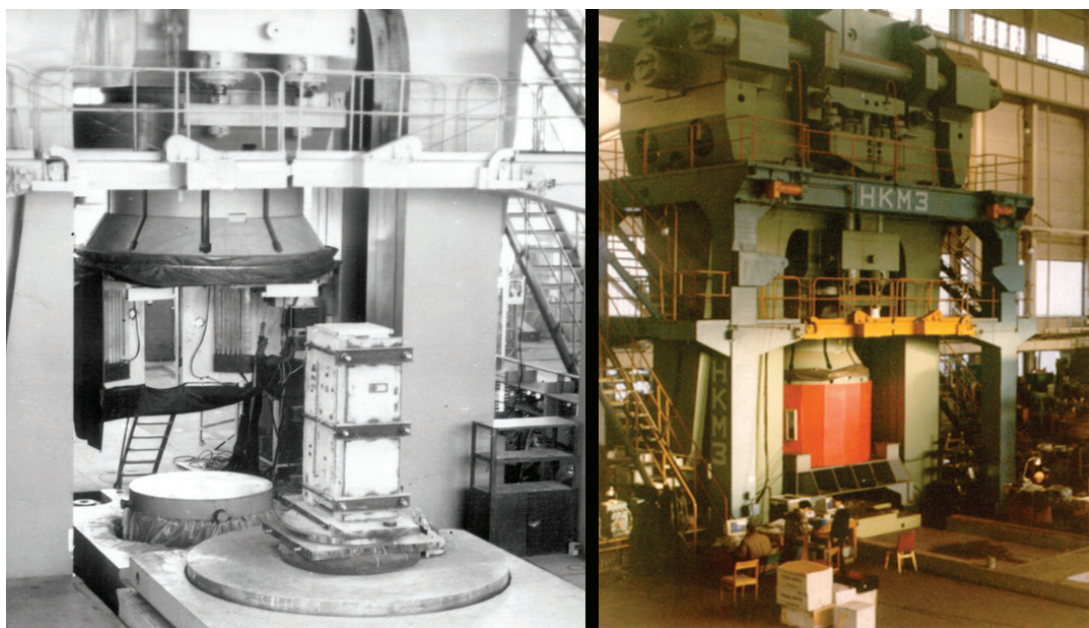


Рис. 1. Внешний вид установки и модели в экспериментах по разрушению образцов метрового размера. Видна опорная станина и нагружающая часть 50-ти килотонного пресса с открытым (слева) и закрытым (справа) защитным кожухом, а также блок горной породы в оправке (слева)

Деформация измерялась системой тензометрических «розеток», каждая из которых состояла из трёх тензодатчиков, позволявших определять две ортогональные и диагональную компоненты деформации. «Розетки» были объединены в единую решетку тензодатчиков, результаты измерений интерпретировались как непрерывное поле деформаций.

Акустическая эмиссия (АЭ) регистрировалась с помощью аппаратуры, разработанной в Университете Колорадо (Шпетцлер Х. и Сондергельд К.) и ИФЗ РАН:

- 8 датчиков (по два на грань) АЭ резонансной частотой 1 МГц;
- запоминающие осциллографы Nicolet Instr. Co 2090 с частотой оцифровки 20 МГц и глубиной записи 2048 точек;
- дискриминатор сигналов, запускающий регистрацию по порогу и отбраковывающий сигналы, похожие на электромагнитные и акустические помехи.

Такая система позволяла производить зональную локацию источников АЭ и определять механизмы развивающихся трещин на разных циклах нагружения.

Измерение скоростей продольных и поперечных упругих волн осуществлялось по схеме «просвечивания» образца с одной грани на другую.

Одной из проблем при разрушении больших блоков целой (ненарушенной) горной породы является то, что разрушение вблизи свободной поверхности начинается раньше разрушения внутри образца. В реальной среде всегда присутствуют концентраторы напряжений, например, в виде ранее

образовавшихся трещин. В сейсмологии известно понятие «сейсмической бреши» [Mogi, 1978–1979], где происходит землетрясение, соединяющее два разрыва от предыдущих землетрясений. Её можно смоделировать, если в образце заранее создать области, имитирующие существующие разрывы.

В работах [Sobolev et al., 1987; Соболев, Кольцов, 1988] сейсмическая брешь моделировалась на образце бетона, в котором при изготовлении были установлены концентраторы напряжения – две пары стеклянных пластин с высокотемпературной смазкой между стеклами в каждой паре. В процессе развития разрушения визуально на поверхности образца наблюдалось развитие сложной системы трещин, тяготеющей к плоскости бреши. Результаты «препарирования» образца после эксперимента показали, что магистральный разрыв совпадает с плоскостью заложения концентраторов.

В похожих экспериментах деформация отслеживалась не только с помощью тензометрии, но и с использованием голографического метода. Для этого одна из сторон образца освещалась лазерным излучением, и на фотопленку фиксировалась разностная голограмма между двумя последовательными моментами времени (рис. 2). Такая схема позволяла увидеть приращение вертикальной деформации образца [Sobolev et al., 1978; Sobolev et al., 1989]. Голографический метод позволил реконструировать изменение нормальной составляющей смещения поверхности образца в процессе формирования самого разрыва [Sobolev et al., 1989].

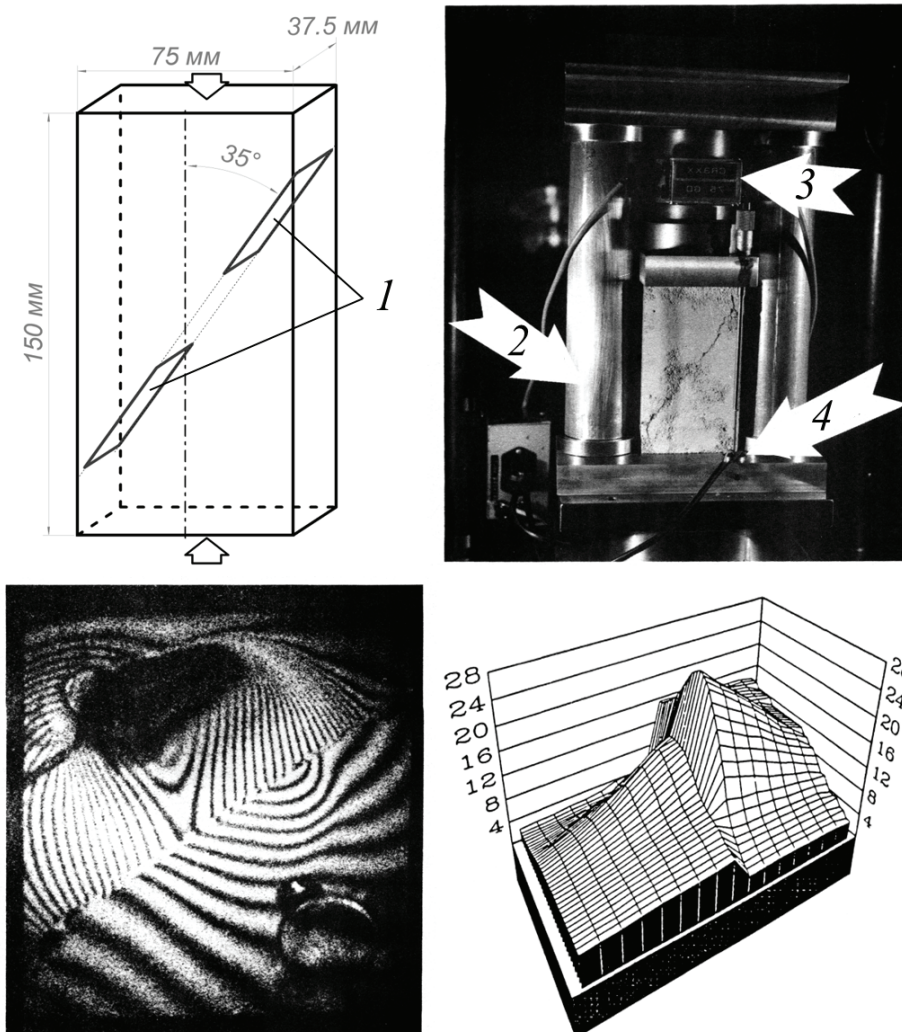


Рис. 2. Эксперимент на модели сейсмической «бреши» (по [Sobolev et al., 1989], с изменениями): слева (вверху) – схема установки с указанием направления приложения нагрузки (стрелки); справа (вверху) – внешний вид установки; слева (внизу) – зарегистрированная с помощью голографической системы интерферограмма; справа (внизу) – результат восстановления величины нормального смещения поверхности образца вблизи сформировавшегося разлома, [мкм]. 1 – концентраторы напряжения; 2 – жесткие опорные колонны; 3 – датчик силы; 4 – датчик перемещения

Кроме механических параметров, другие измеряемые величины также демонстрировали значительные изменения перед образованием разрыва. Например, электрическое сопротивление около проекции плоскости разрыва резко увеличивалось, в отличие от сопротивления в стороне от будущего разрыва (рис. 3).

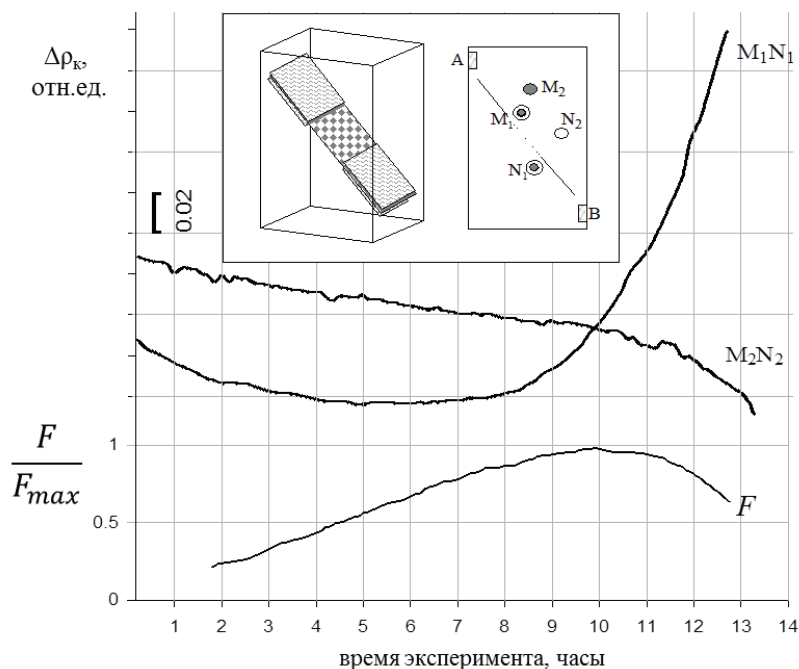


Рис. 3. Разрушение образца с сейсмической «брешью»: изменение электрического сопротивления, зарегистрированное парами измерительных электродов вблизи зоны разрыва (M_1N_1) и вдали от неё (M_2N_2), в процессе изменения нагрузки (F). На вставках показана условная схема модели и расположение измерительных (пары MN) и излучающих (А и В) электродов

Отдельно исследовались движения по модели заранее сформированного разлома по усовершенствованным методикам, основанным на методике Онаки [Ohnaka, 1973]. Модель состояла из двух контактирующих блоков горной породы косой призматической формы (рис. 4), что позволяло уменьшить влияние регулируемого усилия, определяющего сдвиговое напряжение, на нормальное напряжение на разломе [Spetzler et al., 1991].

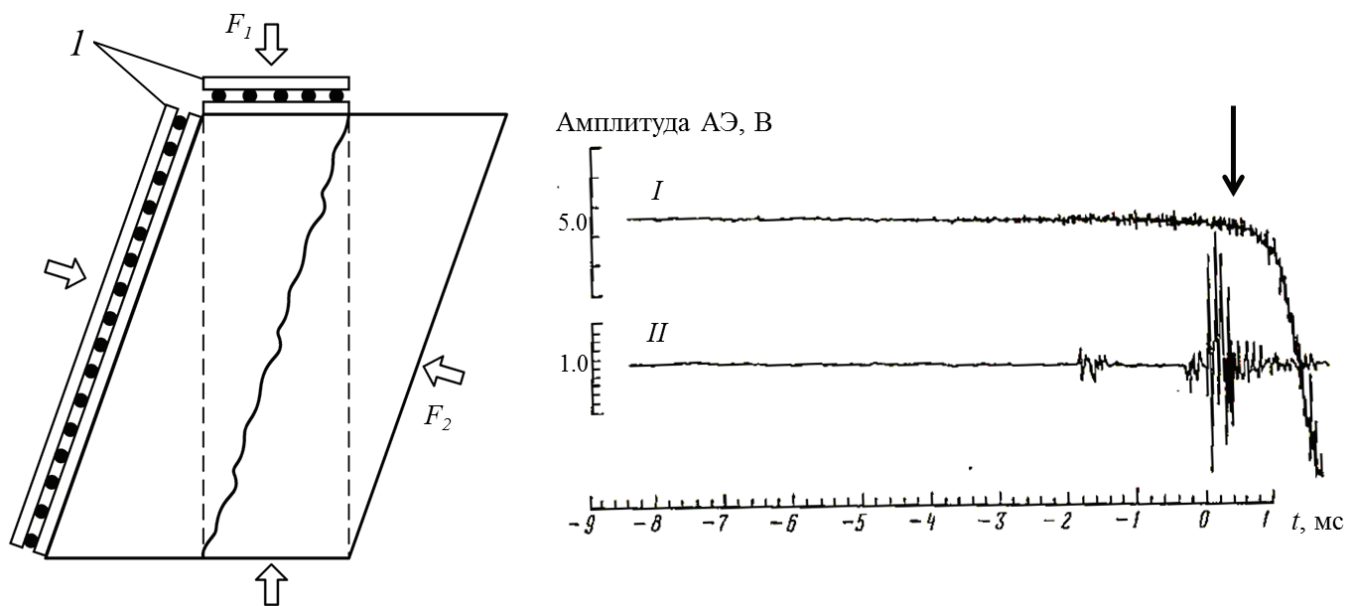


Рис. 4. Эксперименты на модели разлома (по [Соболев и др., 1991], с изменениями): слева – схема с указанием регулируемой F_1 и фиксированной поджимающей F_2 нагрузки; справа – результаты регистрации АЭ: для гладкой (I) и неровной (II) поверхности контакта. Стрелкой показан момент начала резкого ускорения подвижки

Была обнаружена акустическая эмиссия, сопровождающая медленное движение берегов разлома, за несколько миллисекунд до подвижки. При гладком контакте наблюдались сигналы АЭ с постепенно возрастающей амплитудой. При неровном контакте АЭ начиналась с одиночного сигнала относительно большой амплитуды. Такие сигналы интерпретировались как форшоки.

Моделирование развития разрушения в условиях трехкомпонентного напряженного состояния возможно пока только в испытательных камерах высокого давления на относительно небольших образцах. Исследование [Соболев, Пономарев, 1999], выполненное по результатам совместных экспериментов в USGS, Menlo Park (Д. Локнер) и в GFZ, Potsdam (С. Станчиц), показало, что приближение к образованию разрыва в образце гранита приводит к увеличению активности АЭ в области, близкой к разрыву, и уменьшению активности АЭ во внешней по отношению к ней области (рис. 5).

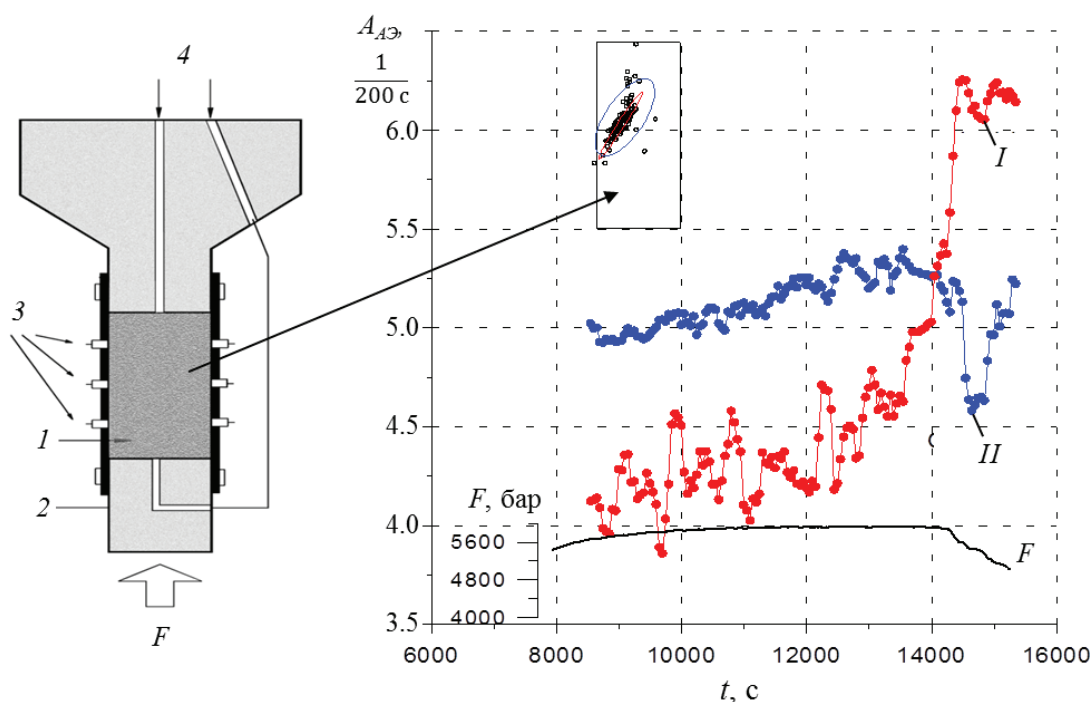


Рис. 5. Исследование разрушения образцов горных пород при сложном напряженном состоянии: слева – схема установки (показаны границы областей: 1 – образец; 2 – поршень прессы; 3 – датчики АЭ; 4 – система ввода флюида для регулирования порового давления); справа – результаты измерений нагрузки (F), активность АЭ ($A_{АЭ}$) в области формирования будущего разлома (I) и во внешней по отношению к ней области (II)

Кроме того, анализ формирования кластеров событий АЭ показал, что до начала формирования разрыва кластеры распределены с широким разбросом по расстоянию от будущей плоскости разрыва. Под кластером понимались последовательности нескольких близких по времени, месту и силе событий АЭ. С приближением к моменту разрыва кластеры начинали группироваться ближе к плоскости разрыва. При этом «длинные» («long») кластеры появлялись только около момента разрыва. Эти данные свидетельствовали в пользу модели ЛНТ.

Заключение

Возвращаясь к мнению М. А. Садовского о физическом моделировании сейсмических процессов, вспомним его напутственные слова про новые представления о геофизической среде, органично объединившей свойства блокового строения горных пород, обмен энергией между блоками разного размера и динамику геофизических полей.

Эти представления потребуют пересмотра «привычных приемов сейсмологических исследований», включая традиционные приемы лабораторного моделирования землетрясения, сводящиеся во многом к наблюдению за развитием трещин в сплошных образцах горных пород, вместо исследований «дискретных» моделей и эквивалентных сред. По-видимому, такое «моделирование позволит охватить весь сейсмический процесс», от перестройки структуры горной породы, до потери устойчивости блокового строения [Дискретные свойства ..., 1989].

Использование сервоуправляемых комплексов и малошумящих механических систем нагружения, широкого набора материалов с различными петрофизическими свойствами, высокопроизводительных систем регистрации позволяет решить несколько принципиальных проблем, стоящих перед лабораторным экспериментом в области физики сейсмического процесса. Это – обеспечение некоторых критериев подобия лабораторного и натурального процесса, многократное повторение опытов для получения надёжных и воспроизводимых результатов, проведение очень длительных экспериментов в условиях постоянной нагрузки или на запредельной стадии деформирования [Смирнов, Пономарев, 2020].

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

Дискретные свойства геофизической среды: Сб. науч. тр. ИФЗ АН СССР / Отв. ред. акад. М. А. Садовский. М. : Наука, 1989. – 172 с.

Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султанов У.С. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. В кн.: Физические процессы в очагах землетрясений / Отв. ред. акад. Садовский М. А., Мячкин В. И. М. : Наука, 1980. С. 78–86.

Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006. № 10. С. 43–50.

Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 4. С. 94–104.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Hongwen J., Пантелеев И.А. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты // Физика Земли. 2022. № 6. С. 162–174. <http://dx.doi.org/10.31857/S0002333722060060>

Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Лабораторные и теоретические исследования процесса подготовки землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10. С. 107–112. EDN: SAAAFI

Нерсесов И.Л., Семенов А.Н., Симбирева И.Г. Пространственно временное распределение отношений времен пробега поперечных и продольных волн в Гарском районе. В кн.: Экспериментальная сейсмология / Отв. ред. акад. Садовский М. А. М. : Наука, 1971. С. 334–360.

Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / ИДГ РАН. Отв. ред. акад. В. В. Адушкин. М. : Наука, 2004. – 439 с. https://elbib.biblioatom.ru/text/sadovskiy_izbrannye-trudy_2004/

Садовский М.А. Институту физики Земли АН СССР – 50 лет // Земля и Вселенная. 1979. № 1. С. 55–61.

Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М. : РАН, 2020. – 411 с. <https://istina.msu.ru/download/406690538/1t5Usi:HVbDbf3qBbItfSPdgTrJ4e31IOI/>

Соболев Г.А., Кольцов А.В. Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясения. М. : Наука. 1988. – 205 с.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 50–62. <https://elibrary.ru/sgjvnh>.

Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Салов Б.Г., Бабичев О.В., Терентьев В.А., Патонин А.В., Мострюков А.О. Возбуждение акустической эмиссии упругими импульсами // Физика Земли. 2001. № 1. С. 79–84.

Соболев Г.А., Семерчан А.А., Салов Б.Г., Шпетцлер Х.А., Сондергельд К.Х., Баданов В.Н., Кольцов А.В., Лось В.Ф., Насимов Р.М., Пономарев А.В., Стаховский И.Р., Терентьев В.А., Турецкий И.М. Предвестники разрушения большого образца горной породы // Физика Земли. 1982. № 8. С. 29–43. <https://elibrary.ru/yfppdar>

Соболев Г.А., Шпетцлер Х., Кольцов А.В. Некоторые свойства неустойчивого скольжения по неровному разрыву. В кн.: Физика горных пород при высоких давлениях: Сб. науч. тр. ИФЗ АН СССР / Отв. ред. Соболев Г. А. М. : Наука, 1991. – 212 с.

Соболев Г.А., Шпетцлер Х., Кольцов А.В., Сондергельд К. Ультразвуковое излучение трещин в деформируемом образце горной породы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1980. № 11. С. 32–44.

Физика очага землетрясения: Сборник статей / Отв. ред. акад. М. А. Садовский. М. : Наука, 1975. – 243 с.

Beeler N., Kilgore B., McGarr A., Fletcher J., Evans J., Baker S.R. Observed source parameters for dynamic rupture with non-uniform initial stress and relatively high fracture energy // Journal of Structural Geology. 2012. Vol. 38. P. 77–89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2011.11.013>

Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-Slip as a Mechanism for Earthquakes // Science. 1966. Vol. 153. P. 990–992. <http://dx.doi.org/10.1126/science.153.3739.990>

Byerlee J.D., Summers R. Stable Sliding Preceding Stick-slip on Fault Surfaces in Granite at High Pressure // Pure Appl. Geoph. 1975. Vol. 113. P. 63–68. <https://doi.org/10.1007/BF01592899>.

Dieterich J.H. Nucleation and triggering of earthquake slip: effect of periodic stresses // Tectonophysics. 1987. Vol. 144. P. 127–139. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90012-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90012-6).

Dieterich J.H. Potential for geophysical experiments in large scale tests // Geophysical Research Letters. 1981. Vol. 8. P. 653–656. <http://dx.doi.org/10.1029/GL008I007P00653>

Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V.S., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // Nature. 1991. Vol. 350. P. 39–42. <https://doi.org/10.1038/350039A0>.

Mjachkin V.I., Soboлев G.A., Brace W.F., Dieterich J.H. Two models for earthquake forerunners // Pure and Applied Geophysics. 1975. Vol. 113 (1). P. 169–181. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01592908>

Mjachkin V.I., Soboлев G.A., Dolbilkina N.A., Morozov V.N., Preobrazensky V.B. The study of variations in geophysical fields near focal zones of Kamchatka // Tectonophysics. 1972. Vol. 14 (3–4). P. 287–293. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(72\)90077-7](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(72)90077-7)

Mogi K. Two kinds of seismic gaps // Pure and Appl. Geophys. 1978–1979. Vol. 117. P. 1172–1186.

Nur A. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of ts/tp travel times // BSSA. 1972. Vol. 62 (5). P. 1217–1222. <http://dx.doi.org/10.1785/BSSA0620051217>

Ohnaka M. Experimental studies of stick-slip and their application to the earthquake source mechanism // Journal of physics of the Earth. 1973. Vol. 21. P. 285–303. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.21.285>.

Rice J., Gu Y.-Ch. Earthquake Aftershocks and Triggered Seismic Phenomena // Pure and Appl. Geophys. 1983. Vol. 121. P. 187–219. <https://doi.org/10.1007/bf02590135>.

Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake Prediction: A Physical Basis // Science. 1973. Vol. 181. P. 803–810. <http://dx.doi.org/10.1126/science.181.4102.803>

Soboлев G.A. The study of barrier fracture in relation to earthquake and rock burst predication // PAGEOPH. 1986. Vol. 124 (4–5). P. 811–824. <https://doi.org/10.1007/BF00879612>.

Soboлев G.A., Getting I.G., Spetzler H. Laboratory study of the strain field and acoustic emissions during the failure of a barrier // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92 (9). P. 9311–9318. <https://doi.org/10.1029/JB092iB09p09311>.

Soboлев G.A., Rummel F. Shear fracture development and seismic regime in pyrophyllite specimens with soft inclusions // Journal of Geophysics – Zeitschrift fur Geophysik. 1982. Vol. 51. P. 180–187.

Soboлев G.A., Spetzler H., Getting I.C. Holography in laboratory experiments pertinent to rock deformation and failure. In: Laser holography in geophysics. Halsted Press. No 4. Brisbane, Toronto, 1989. P. 31–105.

Soboлев G.A., Spetzler H., Koltsov A., Chelidze T. An Experimental Study of Triggered Stick-slip // PAGEOPH. 1993. Vol. 140 (1). P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/BF00876872>

Soboлев G.A., Spetzler H., Salov B. Precursors of failure in rocks while undergoing anelastic deformations // J. Geophys. Res. 1978. Vol. 83. P. 1775–1784. <https://doi.org/10.1029/JB083iB04p01775>

Spetzler H., Soboлев G., Koltsov A., Zang A., Getting I.C. Some properties of unstable slip on rough surfaces // Pure and Applied Geophysics. 1991. Vol. 137 (1-2). P. 95–112. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00876891>

THE DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL STUDIES OF ROCK FAILURE IN THE IPE RAS SINCE THE FIRST HALF OF THE 1970S

© 2024 A. V. Ponomarev, P. A. Kaznacheev*

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: p_a_k@mail.ru*

The paper presents a brief historical overview of laboratory experimental studies initiated at the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences in the first half of the 1970s on the initiative of academician M.A. Sadovsky and reproduced certain aspects of rock failure during the seismic process using models. The background and main directions of research are noted. Data on individual experiments are presented, the main attention is focused on the methodology. The basic information about a large-scale experiment on deformation and destruction of blocks of rocks of meter size on a 50-ton press is given. The experiment was conducted in the 1980s under the methodological and organizational guidance of the IPE RAS (Sobolev G.A.) with the involvement of a wide range of related organizations and specialists. The methodology and results of experiments on the seismic gap model, experiments on slider models of faults with trigger initiation and experiments on small samples with a complex stress state are described. The experimental results supported the main ideas of the avalanche-unstable fracturing formation model proposed at the IPE RAS in 1971.

Keywords: physics of rock failure., seismic process, laboratory experiment, avalanche-unstable fracturing formation model, dilatancy model, faults.