

ЛОКАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ ПО ДАННЫМ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОДЕ–НАДАИ

© 2024 Р.А. Лементуева, Ю.Л. Ребецкий, Н.Я. Бубнова, А.В. Треусов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; e-mail: lraifz2@mail.ru

Поступила в редакцию 20.08.2023; после доработки 03.12.2024; принята в печать 25.12.2024

В настоящей работе исследуется взаимосвязь коэффициента Лодэ–Надаи, определяющего форму эллипсоида напряжений, с характером хрупкого разрушения в образцах песчаника, пиррофиллита и доломита для жесткой нагрузочной машины. Измерение неоднородного поля деформаций в образцах и наблюдение за внутренним процессом разрушения выполнялось с использованием тензометрических и акустических датчиков. Показано, что формированию магистральной трещины предшествует эволюция локальных деформаций в образце, фиксируемая методом тензометрии. Специальная обработка данных тензометрии, учитывающая свободную боковую поверхность образцов, позволила рассчитать главные деформации и три инварианта тензора деформаций: максимальную деформацию сдвига, деформацию изменения объема и коэффициент Лодэ–Надаи. Установлено, что на завершающем этапе деформирования при образовании магистральной трещины в локальных участках образца происходит переиндексация осей главных деформаций, выражающаяся в достижении коэффициентом Лодэ–Надаи предельных значений +1 и –1. Проведено сравнение с натурными наблюдениями.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, деформации, разрушение, тензометрия, акустические события, землетрясения.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы подготовки и реализации землетрясений происходят на больших глубинах, что существенно усложняет прямое изучение деформационного состояния пород и причины активизации сейсмогенных разломов (Ружич, Кочарян, 2017; Chester et al., 2013; Lin et al., 2007; Lockner et al., 2009). В этой связи в ходе разработки физических основ очага землетрясения стали уделять большое внимание изучению вариаций естественных физических полей образцов пород, подвергающихся нагружению до предела прочности, в лабораторных условиях (Соболев, Пономарев, 2003; Ребецкий и др., 2005). Следует отметить, что большая часть экспериментов по изучению зарождения разрушения в образцах проводится в условиях их однородного напряженного состояния (наиболее часто, это одноосное сжатие или чистый сдвиг) (Виноградов, 1989; Дамаскинская и др., 2017). С другой стороны эти же эксперименты показали, что

в исследуемых образцах появляются зоны неоднородности напряженного состояния, изучение которых позволяет выделять стадии процесса деформирования.

Данные о существующих напряжениях в сейсмогенных зонах в период подготовки мегаземлетрясений (Ребецкий, 2007; Rebetsky, Guo, 2020) позволили установить их существенную крупномасштабную неоднородность в виде протяженных зон пониженного уровня напряжений. Эта неоднородность напряжений длительно существует и в период непосредственно перед землетрясением в зоне его эпицентра может эволюционировать. Предполагается, что этой зоне идет процесс разупрочнения в виде медленного скольжения (Кочарян, 2014), который может реализоваться в виде сильного стандартного землетрясения, либо, ускорив медленное скольжения, перейти в тихое или низкочастотное землетрясение (Кочарян и др., 2014а, 2014б).

Одной из задач серии выполненных нами лабораторных экспериментов являлось изучение

особенности эволюции деформаций с выделением стадийности процесса деформирования на основе тензометрических наблюдений. Другой задачей проведенных исследований являлось изучение вариаций компонент деформации на стадии «предразрушения» в период формирования в образце магистральной трещины, процесс развития которой контролируется данными акустической эмиссии. Для этой стадии процесса возможно нахождение соотношения характерных изменений параметров неоднородности поля деформаций и излучаемой энергии акустической эмиссии.

В экспериментах, выполненных в работах (Виноградов, 1989; Соболев, Пономарев, 2003) была показана возможность анализа мест возникновения сдвиговых микротрещин по акустическим данным (Виноградов, 1989; Дамаскинская и др., 2017). Следует отметить, что критически важным недостатком некоторых экспериментов на прессе, не имеющем специального оборудования, является невозможность изменения хода нагружения в момент начала разрушения образца. В таких исследованиях процесс разрушения происходит в условиях совершения дополнительной работы внешними силами, т.е. за счет упругости контактных пластин самого пресса («мягкая нагрузочная машина») при увеличивающихся необратимых деформациях. Таким образом, в условиях существования мягкой нагрузочной машины скорость деформирования фактически предопределяется упругой энергией, запасенной в элементах нагружающего устройства — пресса. Такой механизм разрушения соответствует, например, процессу, наблюдаемому в горных выработках и шахтах. Здесь основным источником нагружения является вес вышележащих пород. В тоже время существующие представления о процессе подготовки и развития землетрясения показывают, что оно происходит за счет механической энергии, уже накопленной в массиве (Райс, 1982). Скорость подкачки новой механической энергии за счет внешнего нагружения существенно меньше скорости процесса разрушения (Ставрогин, Протосеня, 1992), что происходит, в том числе, при таких природных явлениях, как землетрясения. В силу этого, в лабораторном эксперименте следует использовать *жесткие нагрузочные машины*.

Для исследования этой важной особенности природного процесса разрушения авторами была использована методика, основанная на применении невзрывной разрушающей смеси (НРС) (Ребецкий и др., 2005; Соболев и др., 2003). Поскольку скорость воздействия НРС практически не зависит от обжимающих напряжений, то развитие хрупкого разрушения не сопровождается подкачкой энергии в образец породы

(см. далее). Таким образом, применение НРС позволяет «замедлить» процесс разрушения и приблизить лабораторный эксперимент к натурным условиям (Лементуева и др., 2014).

Процесс подбора внешних условий нагружения образцов в экспериментах предварялся расчетами напряженного состояния с помощью программного комплекса *UWAY*, представленный в работе (Ребецкий и др., 2005). Для решения задачи изучения эволюции деформаций в образце был использован стандартный подход тензометрии с наклейкой на поверхности образца розетки из трех тензодатчиков (для всех розеток). Обычно на основе этих данных рассчитываются компоненты плоского 2D тензора деформаций. Однако в проводимых нами исследованиях требовалось определять данные об инвариантах тензора деформаций в виде главной деформации сдвига, деформации изменения объема, вид тензора деформаций, которые позволяют полностью контролировать процесс подготовки хрупкого разрушения в эксперименте. Для этого должны быть получены данные о линейных деформациях в направлении ортогональном плоскости образа в месте наклейки розетки тензодатчиков. Поэтому вместо стандартного 2D подхода нами был использован другой подход обработки тензометрических данных, представленный также в работе (Ребецкий и др., 2005). При этом подходе, используется факт отсутствия нормальных к поверхности напряжений и гипотезу об упругой стадии деформирования в месте наклейки тензодатчиков вплоть до формирования зоны разрушения, что является понятным и вполне допустимым. В этом случае, используя упругие модули для исследуемых образцов, можно рассчитать компоненту линейной деформации в направлении нормали к поверхности и таким образом получить трехмерный тензор деформаций. Подобную приборную базу и алгоритм расчета, применяемый в лабораторном эксперименте, мы назвали «тензометрической квази-3D» системой.

В экспериментах, представленных в работе (Соболев и др., 2003), при деформировании образцов методом растяжения (кern-образец нагружался за счет НРС, помещенной в центре образца, в специально подготовленном отверстии) наблюдали изменения главных деформаций ε_1 , ε_2 , ε_3 , и был выявлен характер изменений инвариантов: тензора деформации — максимального сдвига и изменения объемной деформации. Было установлено, что существует особенность эволюции главных компонент деформаций, проявляющаяся в поведении коэффициента Лодэ–Надаи (μ_g) в процессе деформирования и разрушения образцов песчаника и пиррофиллита. В цитированной работе этот факт был описан,

но причины резких колебаний значений μ_e , определяющего вид тензора — форму эллипсоида деформаций в момент разрушения, не исследовался.

В работе (Гущенко, 1982) было показано, что в Курило-Камчатской сейсмофокальной области ряд сейсмических событий происходил на подъеме коэффициента Лодэ-Надаи, сведения о котором были получены из тектонофизической инверсии напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений. При этом указанному явлению предшествовал этап стабилизации коэффициента μ_e . После переиндексации главных напряжений (μ_e достиг -1 или $+1$) и снижения амплитуды коэффициента μ_e происходило само землетрясение.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕНЗОМЕТРИИ

Для исследования выбирались образцы горных пород различного типа (мрамор — 1 обр., доломит — 2 обр., песчаник — 2 обр.), которые стандартно используются в экспериментах по хрупкому разрушению. Эксперименты выполнялись для образцов сходных размеров ($X = 160$ мм, $Y = 65$ мм, $Z = 55$ мм), имеющих влажность и температуру, отвечающую «комнатным условиям». На лабораторном стенде образец (рис. 1) помещался на нижнюю плиту пресса, а на поверхности образца устанавливалась «обойма» (отрезок трубы из металла, диаметром 50 мм и длиной 100 мм), куда помещалась НРС. Сверху на обойму с НРС опускалась верхняя плита пресса. Такой метод нагружения позволял создавать нагрузку на образец в течение суток или более. Смесь, расширяясь, создавала на поверхности образца нагрузку 12 кг/см^2 в течение одного часа.

Образец в процессе нагружения подвергался изгибу за счет давления пресса по середине верхней горизонтальной грани. Поскольку боковые границы опор внизу образца располагались почти под боковыми границами пресса, действующего на его верхней горизонтальной грани, то между ними в вертикальной плоскости в теле образца формировалась состояние близкое к простому сдвигу. В нижней части образца вблизи границы его контакта с двумя опорами имеет место состояние, близкое к одноосному вертикальному сжатию. Между двумя этими областями образец под действием пресса выгибается вниз из-за чего испытывает горизонтальное удлинение, что создает в середине нижней его части состояние, близкое к одноосному горизонтальному растяжению. Вверху прямо над этой областью образец также выгибается вниз, но при этом испытывает горизонтальное укорочение,

что вместе с вертикальной нагрузкой от пресса создает здесь состояние двуосного сжатия. Этот участок образца с боков соседствует с зоной, где развивается состояние горизонтального удлинения.

Таким образом, розетки тензодатчиков R_1 и R_2 располагались вблизи зоны простого сдвига, развивающегося в условиях горизонтального растяжения, а тензодатчик R_3 располагался в зоне вертикального сжатия.

Благодаря методике по применению НРС в обойме, описанной в работе (Лементуева и др., 2014), можно было создавать более плотное и равномерное нагружение образца. Самое главное, система нагружения на стадии разрушения практически не инерционная в сравнении с применением только одного пресса.

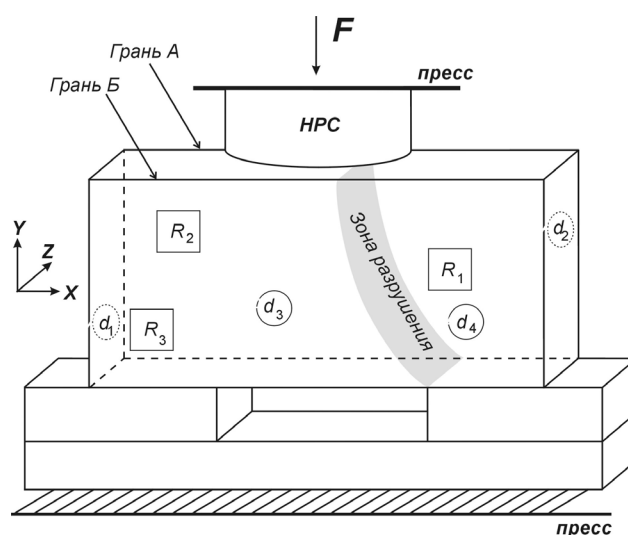


Рис. 1. Схематическое (трехмерное) изображение образца доломита и установки. На гранях образца установлены датчики для регистрации деформаций (R_1, R_2, R_3) и акустических сигналов (АС). Обойма с НРС закрывалась сверху. R_1, R_2, R_3 — розетки тензодатчиков, d_1, d_2, d_3, d_4 — акустические датчики, НРС — обойма с невзрывной разрушающей смесью на основе расширяющихся цементов. Датчики на видимых плоскостях образца выделены сплошными квадратами и кругами, а на невидимых — пунктирными. Областью светло-серой заливки внутри образца обозначена поверхность зоны разрушения.

Fig. 1. Schematic (three-dimensional) image of the dolomite sample and the installation. Sensors are installed on the sample faces to register deformations (R_1, R_2, R_3 and acoustic signals (AS). The HPC casing was closed from above. R_1, R_2, R_3 are sockets of strain gauges, d_1, d_2, d_3, d_4 are acoustic sensors, HPC is a cage with a non-explosive destructive mixture based on expanding cements. Sensors on the visible planes of the sample are marked with solid squares and circles, and on the invisible ones — with dotted squares and circles. The area of light gray fill inside the sample indicates the surface of the fracture zone.

Для изучения деформационных процессов на образцах горных пород требуется особо точный тензомер с дрейфом нуля не более 5 %. Такой тензомер Т-2В был разработан в Институте физики Земли (ИФЗ) РАН и описан в работе (Лементуева и др., 2014). Для регистрации акустических сигналов применялся измерительно-вычислительный комплекс Aline 32D (Лементуева и др., 2014) и четыре пьезоэлектрических датчика типа GT300, которые были закреплены на противоположных (свободных) гранях образца по разные стороны от предполагаемого местоположения магистральной трещины (рис. 1) с помощью пластилина. Расположение зоны разрушения в образце определялась из предварительных экспериментов. Согласно установленного положения этой зоны производилось размещение датчиков тензометрии (R_1, R_2, R_3) и акустических датчиков (d_1, d_2, d_3, d_4). Стенд для наблюдений был экранирован от всевозможных электромагнитных помех.

Исследование закономерности локальных изменений деформационного процесса в образцах при длительном их нагружении проводилось на основе анализа инвариантов деформации: Θ и γ — объемная и максимальная сдвиговая деформации, рассчитываемые в безразмерных относительных единицах; μ_ϵ — коэффициент Лоде-Надаи, определяющий форму эллипсоида деформаций:

$$\begin{aligned} \Theta &= (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \\ \gamma &= (\epsilon_1 - \epsilon_3) / 2, \\ \mu_\epsilon &= 2(\epsilon_2 - \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3) - 1, \end{aligned} \quad (1)$$

при $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$ (удлинение положительно).

Возможность получения выражений (1), характеризующих инварианты тензора деформаций, связана с двумерностью напряженного состояния в образце и использованием условия равенства нулю напряжений, нормальных к

вертикальным его поверхностям. Выражения (1) отвечают чисто упругой стадии и для продвинутой стадии закритического деформирования, когда в образце развиваются трещинные необратимые деформации до 10–20 % от упругих, должны рассматриваться как приближенные.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

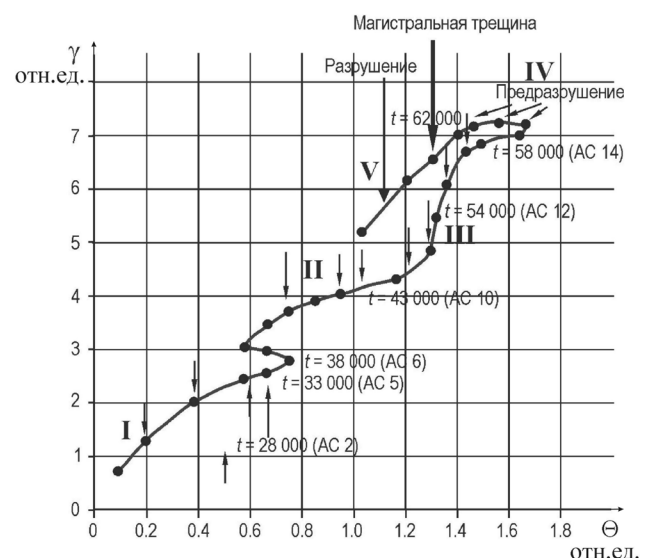
Полученные в результате эксперимента главные компоненты деформации ($\epsilon_i, i = 1, 2, 3$) линейно изменяются на упругой стадии деформирования и нелинейным образом изменяются в процессе накопления дефектов на стадии подготовки разрушения (Лементуева и др., 2014).

Как видно из данных в розетке R_1 (рис. 2) на начальной стадии (I и II) деформирования наблюдался квазилинейное соотношение между деформациями сдвига и объема. Далее (стадия III), в результате деформирования отмечен убыстряющийся рост компоненты сдвига (γ) по сравнению с объемной деформацией. Этот ускоряющийся рост компоненты сдвига происходит в процессе структуризации среды в результате накопления дефектов (Лементуева и др., 2014; Ребецкий и др., 2005). Выполаживание кривых γ (рис. 2, между стадией IV и V, при падении γ) происходит на стадии «предразрушение», где преобладают сдвиговые необратимые деформации. При этом снимаемая энергия упругих деформаций идет и на изменение напряженного состояния в окрестности зоны локализации сдвига, переходит в потенциальную энергию образующихся новых поверхностей.

Расчет по приведенной формуле для объемной деформации (рис. 3) показал, что в верхней части образца, где были установлены розетки

Рис. 2. Взаимозависимость компонент Θ и γ в образце из доломита. Римскими цифрами обозначены выявленные этапы деформирования по данным тензометрии, а также этапы «предразрушения» и «разрушения» образца: $t(AC 2), t(AC 5) \dots t(AC 14)$ — времена возникновения интенсивных акустических сигналов большой амплитуды. $t=62\ 000$ — момент возникновения магистральной трещины. Стрелкой отмечено появление магистральной трещины в конце стадии «предразрушение» — IV.

Fig. 2. The interdependence of the components Θ and γ in the dolomite sample. Roman numerals indicate the identified stages of deformation according to strain gauge data, as well as the stages of «pre-destruction» and «destruction» of the sample: $t(AC 2), t(AC 5) \dots t(AC 14)$ are the times of occurrence of intense acoustic signals of large amplitude. $t=62\ 000$ — the moment of occurrence of the main crack. The arrow marks the appearance of a mainline crack at the end of the «pre-collapse» stage — IV.



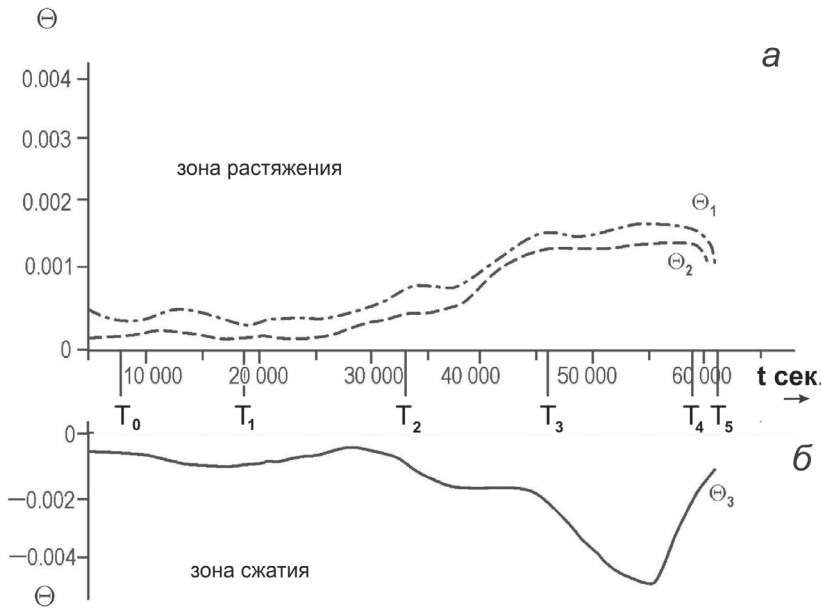


Рис. 3. Зависимость величин объемной деформации ($\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ — нижний индекс отвечает номеру розетки) для трех розеток тензодатчиков R_1, R_2, R_3 от времени эксперимента (в сек) в образце из доломита (см. рис. 1). T — время эксперимента: a — зона растяжения (по розеткам R_1, R_2), b — зона сжатия (по розеткам R_3).

Fig. 3. Dependence of volume deformation values ($\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ — the lower index corresponds to the socket number) for three sockets of load cells R_1, R_2, R_3 from the time of the experiment (in seconds) in a sample of dolomite (see Fig.1). T is the time of the experiment: a — is the tension zone (according to sockets R_1, R_2), b — is the compression zone (according to sockets R_3).

R_1 и R_2 развивалось состояние объемного растяжения (кривые Θ_1, Θ_2), в нижней части образца по данным расчета для розетки R_3 развивалась объемная деформация сжатия (Θ_3).

Ранее, в публикации об экспериментах по методике, представленной в работе (Лементуева и др., 2014), были рассчитаны координаты всех сильных сигналов акустических «событий» (АС), зарегистрированных при проведении эксперимента. Анализ временного хода АС показал, что в период их возникновения формировалась и локализовалась зона разрушения.

Как было показано в работе (Лементуева и др., 2014) в центре возникновения АС наблюдались в виде двух крупных локальных групп, а проведенный расчет позволил определить размеры дефектов и расстояния между ними (примерно 8–10 мм). На стадии IV «предразрушение» укрупненные дефекты происходили с интервалом порядка 400 сек. Было отмечено, что магистральная трещина возникла при слиянии укрупненных микротрещин в одну крупномасштабную в зоне формирующегося разрушения. Процесс прохождения магистральной трещины занимал ~3–4 сек при общей продолжительности наблюдений 70000 сек и сопровождался акустическим сигналом максимальной амплитуды по сравнению с другими, происходившими после 33000 сек эксперимента, имеющим для первого вступления знак минус. В работе (Соболев, Пономарев 2005) было отмечено, что в экспериментах расстояние между дефектами (центры излучений) составляло 5–7 мм. Мы предполагаем, что максимальный рост градиента деформации сдвига предшествует и соответствует возникновению и перемещению более крупномасштабных дефектов в зоне формирования макротрещины. Для образца доломита на стадии «предраз-

рушение» в наибольшей степени характерна стабилизация значений сдвига при уменьшении объемной деформации.

Можно предположить, что на этой стадии происходило зарождение сложного характера сдвиговой магистральной трещины (рис. 1).

Рассмотрим характер изменений коэффициента Лоде–Надаи в образцах доломита (рис. 4б), мрамора (рис. 5б) и песчаника (рис. 6б). На II и III стадиях значения коэффициента μ_σ изменяются в диапазоне от +0.5 до -0.5 и даже до -0.8 (рис. 4б, 5б). Результаты расчетов коэффициента Лоде–Надаи показывают, что на начальной стадии нагружения, характеризующейся близкими значениями ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$), значения μ_σ близко к +1. Здесь возможна переиндексация осей главных деформаций без их значимого изменения в ориентации (рис. 4б).

Переиндексацией осей главных деформаций именуется такое состояние изменения поля напряжений или деформаций в пространстве или во времени, когда ориентация главных осей практически не изменяется, но изменяются индексы, отвечающие этим осям. Это происходит тогда, когда величины двух главных деформаций постепенно становятся близкими друг к другу. В случае, когда это происходит с осями главных деформаций с индексами ϵ_1 и ϵ_2 , то коэффициент Лоде–Надаи становится равным +1, а когда с индексами ϵ_2 и ϵ_3 , то коэффициент Лоде–Надаи становится равным -1. Стадия стабилизации во всех экспериментах в этот временной период сопровождалась ростом коэффициента Лоде–Надаи.

В эксперименте на песчанике отмечен сходный с экспериментом на доломите характер поведения коэффициента μ_σ . Методика эксперимента была аналогична образцам из мрамора

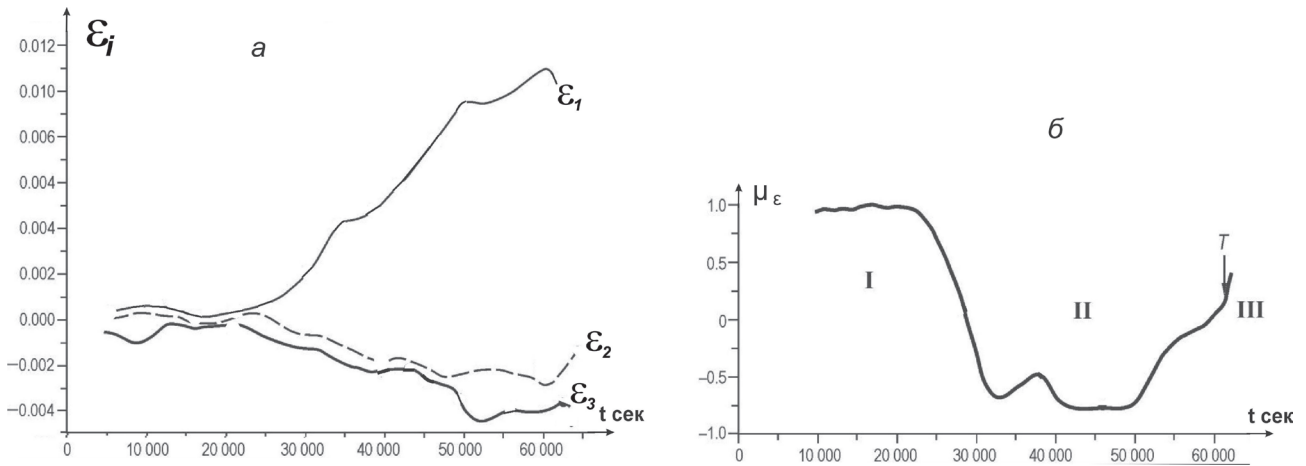


Рис. 4. Зависимость главных деформаций (а) от времени эксперимента и поведение коэффициента μ_ϵ (б) на образце доломита для розетки R_1 (графики деформаций — ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 и для коэффициента Лодэ–Надаи сглажены). Т — время возникновения магистральной трещины. I, II, III обозначены стадии деформации по коэффициенту μ_ϵ .

Fig. 4. The dependence of the principal deformations (а) on the time of the experiment and the behavior of the coefficient μ_ϵ (б) on the dolomite sample for socket R_1 (the graphs of deformations — ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 and for the Lode–Nadai coefficient are smoothed). T is the time of occurrence of the main crack. I, II, III are the stages of deformation by the coefficient μ_ϵ .

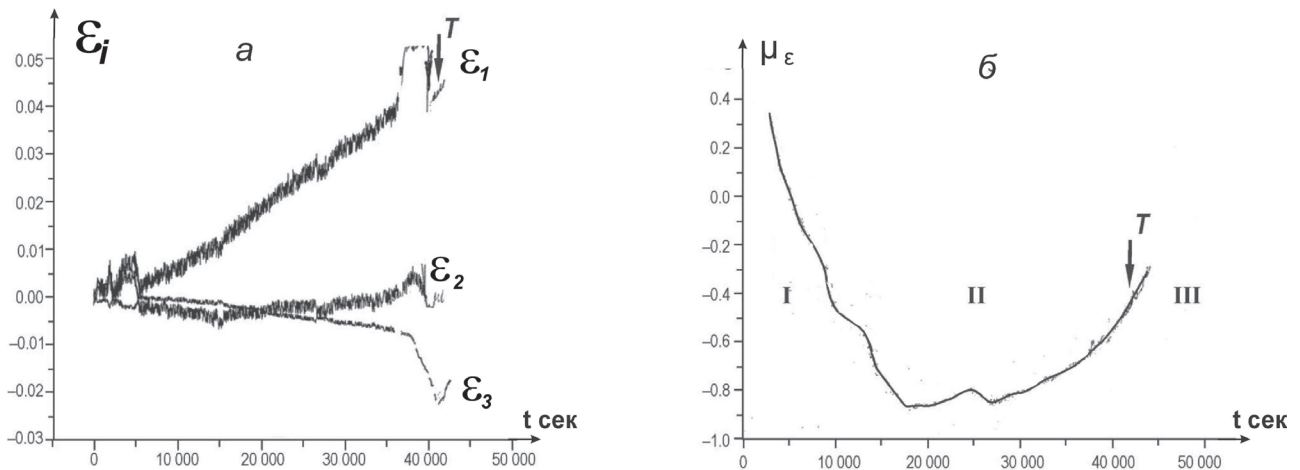


Рис. 5. Зависимость главных деформаций (а) от времени эксперимента и поведение коэффициента μ_ϵ (б) на образце мрамора для розетки R_1 . Т — время возникновения магистральной трещины.

Fig. 5. The dependence of the principal deformations (а) on the time of the experiment and the behavior of the coefficient μ_ϵ (б) on the marble sample for the socket R_1 . T is the time of occurrence of the main crack.

и доломита, однако форма образца и размеры были немного другими (рис. 6а) (размер образца 120×50×50 мм). Образец песчаника прямоугольной формы нагружался по торцевой грани (рис. 6), что позволяло увеличить нагрузку на поверхность и более четко определить зону разрушения сдвигом.

Согласно (1) изменение соотношения ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 определяет стадии изменения величин коэффициента Лодэ–Надаи, независимо от методики эксперимента и формы образца. Возрастание величины коэффициента μ_ϵ после переиндексации осей главных деформаций свидетельствует о смене напряженного состояния. В определенные

моменты времени, когда энергии, накопленной в микроструктурах, может оказаться достаточно для роста макротрещины даже после остановки дальнейшего нагружения образца.

На стадии «предразрушение» (рис. 2, 3, стадия IV) отмечена возможность новой переиндексации осей главных напряжений (рис. 6б), что отражается в изменении величины μ_ϵ в сторону повышения. Именно на этой стадии возникает магистральная трещина. На всех образцах (доломит, мрамор, песчаник) наблюдалось сходное изменение хода главных значений ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 перед разрушением магистральной трещиной.

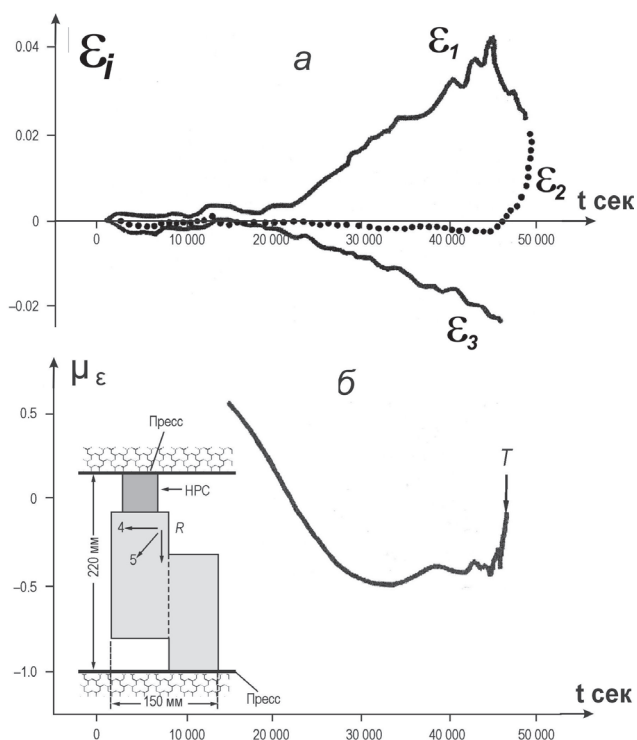


Рис. 6. Зависимость главных деформаций (а) от времени эксперимента и поведение коэффициента μ_ϵ (б) на образце песчаника (схема эксперимента внизу слева). Т — время возникновения магистральной трещины. R — тензометрическая розетка. Штриховая линия на схеме эксперимента показывает место прохождения магистральной трещины.

Fig. 6. The dependence of the principal deformations (a) on the time of the experiment and the behavior of the coefficient μ_ϵ (b) on the sandstone sample (experimental diagram at the bottom left). T is the time of occurrence of the main crack. R is a strain gauge socket. The dashed line on the experiment diagram shows the place of passage of the main crack.

ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При изучении деформационных процессов в сейсмоактивных районах часто отмечалось, что сейсмические события происходят на стадии максимальных значений или падения напряжений в зоне возникновения землетрясения (Соболев, Пономарев, 2003). С другой стороны исследование тектонофизическими методами зон подготовки сильнейших землетрясений показало, что распределение в их очагах кулоновых напряжений, определяющих соотношение касательных напряжений на разломе с силами трения, существенно неоднородно. Для катастрофических Веньчуаньского землетрясения 2008 г., $M=8.2$ в Китае и Пазарджикского землетрясения 2023 г., $M=7.8$ в Турции (Тихоцкий и др., 2023) установлена их изменчивость перед сильным землетрясением. Эта изменчивость

должна приводить к эволюции во времени соотношения между компонентами напряжений, что отражается в изменениях значений коэффициента Лоде–Надаи и геодинамического типа напряженного состояния.

Анализ особенности изучения природных напряжений, полученных тектонофизическим методом О.И. Гущенко (1981), также дает основание говорить о том, что перед сильным событием происходит перестройка сейсмического процесса, что приводит к появлению более разнообразных по ориентации фокальных механизмов. Это фактически показывает, что в геосреде происходит разгрузка (Ребецкий, 2003), т.е. процесс медленного движения по будущему сейсмогенному разрыву уже начался (Rebetsky, Guo, 2020).

Проведенные нами эксперименты показали сходство характера изменений коэффициента Лоде–Надаи с тем, что было отмечено на стадии подготовки сильных землетрясений.

ВЫВОДЫ

Во всех экспериментах была показана сложная взаимосвязь главных компонент деформации ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ и Θ, γ) при длительном деформировании образцов. Установлено, что на завершающем этапе деформирования при образовании магистральной трещины в локальных участках образца происходит переиндексация осей главных деформаций, выражающаяся в достижении коэффициентом Лоде–Надаи предельных значений +1 или -1. Согласно полученным экспериментальным данным стадия стабилизации сопровождается ростом амплитуды μ_ϵ . Магистральная трещина возникала именно на этой стадии — стадии повышенной опасности. Акустический сигнал при прохождении магистральной трещины возникал на подъеме коэффициента Лоде–Надаи, был максимальной амплитуды и имел первое вступление со знаком минус.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы [References]

- Виноградов С.Д.* Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М.: Наука, 1989. 175 с. [*Vinogradov S.D.* Acoustic method in research on earthquake physics. Moscow: Nauka, 1989. 175 p. (in Russian)].
- Гущенко О.И.* Кинематический метод определения параметров напряжений и характеристика их связей с тектоническими движениями по разрывам разных структурных уровней // Автореф. дис. ...канд. геол.-минерал. наук. М., 1981. 21 с. [*Gushchenko O.I.* Kinematic method for

- determining stress parameters and characterization of their connections with tectonic movements by discontinuities of different structural levels // Autoref. dis. ...candidate of geol.-mineral. nauk. Moscow: 1981. 21 p. (in Russian)].
- Гущенко О.И. Определение тектонических полей напряжений методом кинематического анализа структур разрушения (в связи с прогнозом сейсмической опасности) // Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1982. С. 35–52 [Gushchenko O.I. Determination of tectonic stress fields by the method of kinematic analysis of fracture structures (in connection with the prediction of seismic hazard) // Nature and methodology of determining tectonic stresses in the upper part of the Earth's crust. Apatites: Kola branch of the USSR Academy of Sciences, 1982. P. 35–52 (in Russian)].
- Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Кадомцев А.Г., Наймарк О.Б. Влияние состояния внутренних границ раздела на характер разрушения гранита при квазистатическом сжатии // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. Вып. 5. С. 920–930 [Damaskinskaya E.E., Panteleev I.A., Kadomtsev A.G., Naimark O.B. Influence of the state of internal interface boundaries on the nature of granite destruction under quasi-static compression // Solid State Physics. 2017. V. 59. Iss. 5. P. 920–930 (in Russian)].
- Кочарян Г.Г. Масштабный эффект в сейсмотектонике // Геодинамика и тектонофизика. 2014а. № 5. Вып. 2. С. 353–385 [Kocharyan G.G. Scale effect in seismotectonics // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. № 5. Iss. 2. P. 353–385 (in Russian)].
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика. 2014б. № 5. Вып. 4. С. 863–891 [Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Novikov V.A., Ostapchuk A.A. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects // Geodynamics & Tectonophysics № 5. Iss. 4. P. 863–891 (in Russian)].
- Лементуева Р.А., Бубнова Н.Я., Треусов А.В. Особенности динамики формирования магистральной трещины // Физика Земли. 2014. № 1. С. 33–39 [Lementueva R.A., Bubnova N.Ya., Trusov A.V. Dynamical features of fracture formation // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2014. V. 50. № 1. P. 32–37].
- Райс Дж. Механика очага землетрясения. Сер. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир, 1982. 217 с. [Rice J. The mechanics of earthquake rupture. 1980. 649 p.].
- Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин // Дис. док. физ.мат. наук. М.: Изд. ОИФЗ. 2003. 455 с. [Rebetsky Yu.L. The stress-strain state and mechanical properties of natural massifs according to data on the mechanisms of earthquake foci and structural-kinematic characteristics of cracks // Dis. doc. phys.mat. sci. Moscow: OIFZ Publishing House. 2003. 455 p. (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 1. С. 25–37 [Rebetsky Yu.L. Tectonic stresses and regions of the trigger mechanism of the occurrence of earthquakes // Physical mesomechanics. 2007. V. 10. № 1. P. 25–37 (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л., Лементуева Р.А., Дьяур Н.И., Михайлова А.В. Соподчиненность микроструктурных деформаций и хрупкого микроразрушения // ДАН. 2005. Т. 403. № 2. С. 253–257 [Rebetskiy Yu.L., Lementueva R.A., D'yaur, Mikhailova A.V. Subordination of microstructure deformations and brittle macrodestruction // Doklady Earth Sciences. 2005. V. 403. № 2. P. 253–257].
- Ружич В.В., Кочарян Г.Г. О строении и формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Статья I. Приповерхностный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. Вып. 4. С. 1021–1034. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0330> [Ruzhich V.V., Kocharyan G.G. On the structure and formation of earthquake sources in the faults located in the subsurface and deep levels of the crust. Part I. Subsurface level. Geodynamics & Tectonophysics. 2017. V. 8. Iss. 4. P. 1021–1034 (in Russian)].
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с. [Sobolev G.A., Ponomarev A.V. Physics of earthquakes and harbingers. Moscow: Nauka, 2003. 270 p. (in Russian)].
- Соболев Г.А., Лементуева Р.А., Гвоздев А.А. Динамика механоэлектрических параметров в образцах горных пород при внутреннем источнике упругих напряжений // Моделирование геофизических процессов. М.: Изд-во ОИФЗРАН. 2003. С. 5–9 [Sobolev G.A., Lementueva R.A., Gvozdev A.A. Dynamics of mechanoelectric parameters in rock samples with an internal source of elastic stresses // Modeling of geophysical processes. Moscow: OIFZRAS. 2003. P. 5–9 (in Russian)].
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра. 1992. 223 с. [Stavrogin A.N., Protosenya A.G. Mechanics of deformation and destruction of rocks. Moscow: Nedra. 1992. 223 p. (in Russian)].
- Chester F.M., Rowe C., Ujiie K. et al. Expedition 343 and 343T Scientists, 2013. Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake // Science. 2013. V. 6163. P. 1208–1211. <https://doi.org/10.1126/science.1243719>
- Lin A., Maruyama T., Kobayashi K. Tectonic implications of damage zone related fault-fracture networks re-vealed in drill core through the Nojima Fault, Japan // Tectonophysics. 2007. V. 443. № 3–4. P. 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.01.011>
- Lockner D.A., Tanaka H., Ito H. et al. Geometry of the Nojima Fault at Nojima-Hirabayashi, Japan – I. A simple damage structure inferred from borehole core permeability // Pure and Applied Geophysics. 2009. V. 166. № 10–11. P. 1649–1667. <https://doi.org/10.1007/s00024-009-0515-0>
- Rebetsky Y.L., Guo Y.S. From natural stresses in seismic zones to predictions of megaequake nucleation zones // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. № 1. P. 421–440. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02128-0>

**LOCAL CHANGE IN THE STRESS STATE IN ROCK SAMPLES
BEFORE DESTRUCTION ACCORDING TO THE LODE–NADAI COEFFICIENT**

R.A. Lementueva, Yu.L. Rebetsky, N.Ya. Bubnova, A.V. Treusov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: lraifz2@mail.ru*

Received August 20, 2023; revised December 03, 2024; accepted December 25, 2024

In this paper, the relationship of the Lode–Nadai coefficient, which determines the shape of the stress ellipsoid, with the nature of brittle fracture in sandstone, pyrophyllite and dolomite samples for a rigid loading machine is investigated. The measurement of the inhomogeneous deformation field in the samples and the observation of the internal fracture process were performed using strain gauges and acoustic sensors. It is shown that the formation of the main crack is preceded by the evolution of local deformations in the sample, recorded by the strain gauge method. Special processing of strain gauge data, taking into account the free lateral surface of the samples, made it possible to calculate the principle deformations and three invariants of the strain tensor: maximum shear deformation, volume change deformation and the Lode–Nadai coefficient. It has been established that at the final stage of deformation, when a main crack is formed in local sections of the sample, the axes of the principal deformations are reindexed, which is expressed in the achievement of the maximum values of +1 and -1 by the Lode–Nadai coefficient. A comparison with field observations was made.

Keywords: laboratory experiment, deformations, fracture, strain gauge, acoustic events, earthquakes.