



УДК 539.3

Ориентационная природа эффекта деформационной памяти при трехосном циклическом неравнокомпонентном сжатии песчаника

И. А. Пантелеев¹, А. В. Зайцев², К. Б. Устинов³,
В. А. Мубассарова¹, Н. И. Шевцов³, В. В. Химуля³,
В. И. Карев³, Ю. Ф. Коваленко³

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,

Россия, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1.

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29.

³ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
Россия, 119526, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 1.

Аннотация

Для описания механизмов и условий проявления эффекта деформационной памяти (эффекта Кайзера) в горных породах, подвергающихся трехмерному непропорциональному циклическому нагружению с изменением ориентации и формы эллипсоида Ламе, проведены эксперименты с кубическими образцами из полимиктового песчаника на Испытательной системе трехосного независимого нагружения с непрерывной записью сигналов акустической эмиссии. Результаты непропорционального трехосного сжатия по разработанной 9-цикловой программе нагружения показали, что доминирующим механизмом проявления эффекта памяти повреждений в каждом определенно ориентированном ансамбле дефектов является развитие микротрещин нормального отрыва, ориентированных субнормально к направлению минимального главного напряжения. Было обнаружено, что проявление эффекта Кайзера определяется не столько фактом раскрытия существующих «благоприятно» ориентированных микротрещин, сколько их дискретным ростом

Механика деформируемого твердого тела

Научная статья

© Коллектив авторов, 2022

© СамГТУ, 2022 (составление, дизайн, макет)

Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Пантелеев И. А., Зайцев А. В., Устинов К. Б., Мубассарова В. А., Шевцов Н. И., Химуля В. В., Карев В. И., Коваленко Ю. Ф. Ориентационная природа эффекта деформационной памяти при трехосном циклическом неравнокомпонентном сжатии песчаника // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2022. Т. 26, № 2. С. 293–310. EDN: [MMKNTJ](#). DOI: [10.14498/vsgtu1890](https://doi.org/10.14498/vsgtu1890).

Сведения об авторах

Иван Алексеевич Пантелеев <https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>

кандидат физико-математических наук; зав. лабораторией цифровизации горнотехнических процессов; e-mail: pia@icmm.ru

Алексей Вячеславович Зайцев <https://orcid.org/0000-0003-0578-7917>

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент каф. механики композиционных материалов и конструкций; e-mail: a-zaitsev@mail.ru


и появлением новых дефектов. Полученные экспериментальные результаты могут рассматриваться в качестве триггера для развития моделей деформирования и разрушения горных пород, учитывающих анизотропную природу и ориентационные эффекты развития поврежденности при различных сложных напряженно-деформированных состояниях и реальных условиях трехосного непропорционального нагружения, которые наблюдаются в природных и антропогенных системах.

Ключевые слова: эффект Кайзера, акустическая эмиссия, истинное трехосное нагружение, непропорциональное циклическое сжатие, вращение эллипсоида Ламе, изменение формы эллипсоида Ламе, ориентационная природа эффекта деформационной памяти.

Получение: 25 октября 2021 г. / Исправление: 28 апреля 2022 г. /

Принятие: 23 мая 2022 г. / Публикация онлайн: 28 июня 2022 г.

Введение. В настоящее время эффект Кайзера [1] — эффект памяти о ранее приложенных в испытаниях напряжениях используется в современных методах оценки напряженного состояния массива горных пород [2–12], а также при исследовании характера воздействия циклических вулканических процессов и их результатов — циклической деформации геосреды [7, 13]. Земная кора в районе активных разломных зон и вулканических построек может испытывать не только циклические деформации, но и переориентацию (вращение) напряженного состояния [14–16], приводящую к формированию анизотропной трещиноватости. Несмотря на многочисленные исследования эффекта Кайзера при циклическом деформировании горных пород, условия его проявления при трехосном сжатии по произвольным траекториям трехосного непропорционального нагружения, характеризующимся изменением формы и вращением эллипсоида приложенных напряжений (эллипсоида Ламе), остаются не до конца ясными. Изучение влияния вращения эллипсоида Ламе на проявление эффекта Кайзера проводилось различными научными

Константин Борисович Устинов  <https://orcid.org/0000-0001-5852-3355>

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник; главный научный сотрудник лаб. геомеханики; e-mail: ustinov@ipmnet.ru

Виргиния Анатольевна Мубассарова  <https://orcid.org/0000-0001-7593-6776>

кандидат физико-математических наук; научный сотрудник лаб. термомеханики твердых тел; e-mail: mubassarova.v@icmm.ru

Николай Иванович Шевцов  <https://orcid.org/0000-0003-0792-2262>

младший научный сотрудник лаб. геомеханики; e-mail: red3991@yandex.ru

Валерий Владимирович Химуля  <https://orcid.org/0000-0003-2116-6483>

кандидат физико-математических наук; младший научный сотрудник лаб. геомеханики; e-mail: valery.khim@gmail.com

Владимир Иосифович Карев  <https://orcid.org/0000-0003-3983-4320>

доктор технических наук; профессор; заместитель директора по науке; главный научный сотрудник лаб. геомеханики; e-mail: wikarev@ipmnet.ru

Юрий Федорович Коваленко  <https://orcid.org/0000-0002-6128-1737>

доктор физико-математических наук; профессор; заведующий лаб. геомеханики; e-mail: perfolinkgeo@yandex.ru

коллективами преимущественно в экспериментах на одноосное сжатие и косвенное растяжение горных пород для каждого типа нагружения в отдельности и с их чередованием [17–25].

В пионерских работах [26, 27] впервые были представлены результаты исследования эффекта Кайзера при истинном трехосном нагружении с вращением эллипсоида главных напряжений (эллипсоида Ламе). Было показано, что эффект Кайзера является эффектом памяти поврежденности, при этом его проявление зависит от взаимной ориентации ансамбля трещиноватости и приложенных напряжений. В экспериментах на истинное и традиционное трехосное нагружение была продемонстрирована возможность избирательного повторного инициирования ортогонально ориентированных ансамблей микротрещин. При этом вопрос о том, какие параметры напряженно-деформированного состояния, за исключением ориентации и величины максимального сжимающего напряжения, контролируют эффект памяти материала, остается открытым.

Настоящее исследование является продолжением изучения проявления эффекта Кайзера при трехосном циклическом нагружении песчаника с изменением ориентации эллипсоида Ламе. При этом в отличие от работ [26, 27] акцент сделан на изучении ориентационной природы эффекта деформационной памяти. Для этого разработана и реализована 9-цикловая экспериментальная программа непропорционального нагружения, отличающегося возможными механизмами развития микротрещин. В этой программе были последовательно реализованы циклы истинного трехосного и традиционного нагружения со сменой направлений активного сжатия.

1. Экспериментальное оборудование и материал. Для испытаний был выбран полимиктовый песчаник, относящийся к Шешминской свите уфимского яруса пермской системы. Образцы песчаника отобраны в районе Верхнекамского месторождения калийных солей, расположенного в Соликамской впадине Предуральяского прогиба. Песчаник характеризуется слоистой структурой, обусловленной чередованием прослоек, обогащенных эпидотом и обломками кремней. SEM-исследования показали, что распределение зерен минералов по объему равномерное с размером от 150 до 450 мкм. Пористость песчаника составляет 9.5 % и развита в основном по границам зерен, что вызвано выщелачиванием кальцита грунтовыми водами. Кубические образцы с размером ребра 40 мм были изготовлены на специально спроектированном стенде лаборатории геомеханики ИПМех РАН с высокой точностью. Непараллельность граней не превышала 20 мкм.

Механические испытания проводились на испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) в лаборатории геомеханики ИПМех РАН. Подробное описание установки и ее характеристики можно найти в работах [28–33]. Независимое трехосное нагружение осуществлялось благодаря примененной в конструкции нагружающего узла оригинальной кинематической схеме, которая позволяет нажимным плитам сближаться в трех взаимно ортогональных направлениях, не препятствуя друг другу. Автоматизированный комплекс управления и сбора данных ИСТНН включал LVDТ-датчики перемещения и датчики усилия с разрешающей способностью 0.2 мкм и 0.03 МПа соответственно. Перед испытаниями между гранями образца и на-

конечниками нажимных плит устанавливались тонкие фторопластовые прокладки со смазкой для минимизации трения при сжатии образца.

Для регистрации акустической эмиссии (АЭ) была использована многоканальная система Amsy-6 Vallen с широкополосными датчиками SMEG-2P (частотный диапазон 200–2000 кГц), закрепленными на каждой из трех нажимных плит ИСТНН. В работе [34] было показано, что расположение датчиков на плитах позволяет регистрировать данные скорости и суммарного счета АЭ, аналогичные результатам, полученным от датчиков, установленных непосредственно на гранях образца.

2. Протокол эксперимента. Для исследования особенностей проявления эффекта деформационной памяти в песчанике при трехосном непропорциональном нагружении с изменением формы и ориентации эллипсоида Ламе была разработана и реализована 9-цикловая программа, которая включала три последовательных «блока» по три цикла активного нагружения – разгрузки в каждом, отработка которых начиналась после предварительного гидростатического сжатия образца до 10 МПа. В первом цикле каждого блока осуществляется двухосное сжатие до величины 58 МПа при неизменном напряжении в третьем направлении. В первом блоке происходит рост σ_{xx} и σ_{yy} при $\sigma_{zz} = 10$ МПа, во втором – рост σ_{zz} и σ_{yy} при постоянном σ_{xx} , в третьем – рост σ_{zz} и σ_{xx} при постоянном σ_{yy} соответственно (рис. 1). Во втором и третьем циклах каждого блока происходило последовательное одноосное сжатие в одном из двух направлений до величины 77 МПа, по которым осуществлялось сжатие в первом цикле этого блока. При этом в двух других направлениях напряжения поддерживались постоянными, равными 10 МПа. В первом блоке были реализованы второй $\sigma_{xx} > \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$ и третий $\sigma_{yy} > \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$ циклы; во втором блоке – второй $\sigma_{yy} > \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$ и третий $\sigma_{zz} > \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ циклы; в третьем блоке – второй $\sigma_{xx} > \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$ и третий $\sigma_{zz} > \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ циклы соответственно (см. рис. 1). Нагрузка и разгрузка в каждом из девяти циклов осуществлялась со скоростью 31 кПа/с. Увеличение амплитуды сжатия во втором и третьем циклах относительно первого цикла в каждом из блоков нагружения позволяло исследовать проявления

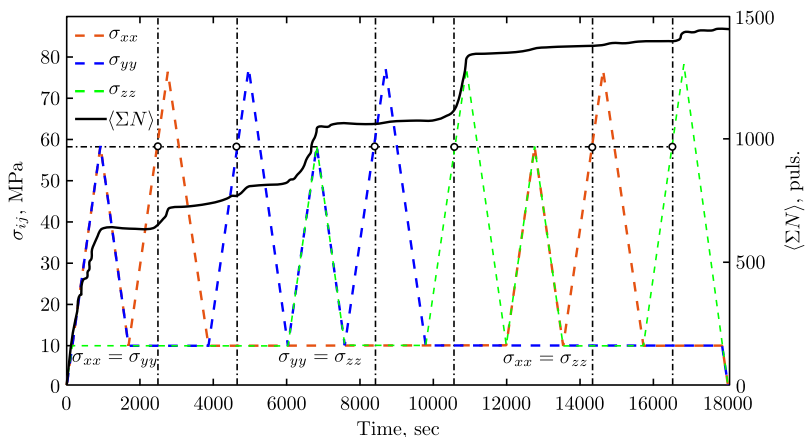


Рис. 1. Программа нагружения 9-циклового непропорционального сжатия и средний суммарный счет АЭ

[Figure 1. Loading program of the 9-cycle nonproportional compression and the average total sum of acoustic emission (AE)]

ориентационной природы эффекта Кайзера при изменении формы и вращении эллипсоида Ламе.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение. Реализация 9-цикловой программы экспериментов по трехосному непропорциональному сжатию образцов песчаника показала, что эффект Кайзера, характеризующийся резким ростом активности АЭ при достижении максимального уровня напряжений предыдущего цикла, наблюдается избирательно в каждом из трех блоков нагружения. Так, например, в первой тройке циклов активизация АЭ отчетливо наблюдается во втором цикле и слабо проявляется в третьем (рис. 1). Во второй тройке циклов «активное нагружение – разгрузка» регистрируется всплеск АЭ в третьем цикле, в то время как второй цикл характеризуется отсутствием активизации АЭ. В третьем блоке циклов в целом рост АЭ незначительный с небольшой активизацией в третьем цикле.

Для определения причин избирательного проявления эффекта памяти был проведен анализ деформированного состояния образца песчаника и определены осевые деформации ε_{xx} , ε_{yy} и ε_{zz} в трех взаимно ортогональных направлениях Ox , Oy и Oz , вдоль которых осуществляется «активное непропорциональное нагружение – разгрузка». На рис. 2 представлены совмещенные траектория деформирования и зависимость относительного среднего суммарного счета АЭ (ΣN)/ N_{\max} от времени (N_{\max} — максимальное количество сигналов АЭ, зарегистрированных во время проведения эксперимента). Деформации ε_{xx} , ε_{yy} и ε_{zz} образца, соответствующие окончанию этапа всестороннего сжатия, принимались за реперные отсчетные величины. Далее от цикла к циклу определялись приращения $\Delta\varepsilon_{xx}$, $\Delta\varepsilon_{yy}$ и $\Delta\varepsilon_{zz}$ относительного сжатия по каждому из направлений. Так, во втором цикле первого блока ε_{yy} и ε_{zz} меньше соответствующих реперных значений. Это может быть объяснено увеличением деформации относительного сжатия в этих направлениях. В каждом случае фиксировался момент времени превышения предыдущего уровня относительных деформаций сжатия и амплитуда приращения в абсолютных единицах. Если в рассматриваемом цикле превышение не наблюда-

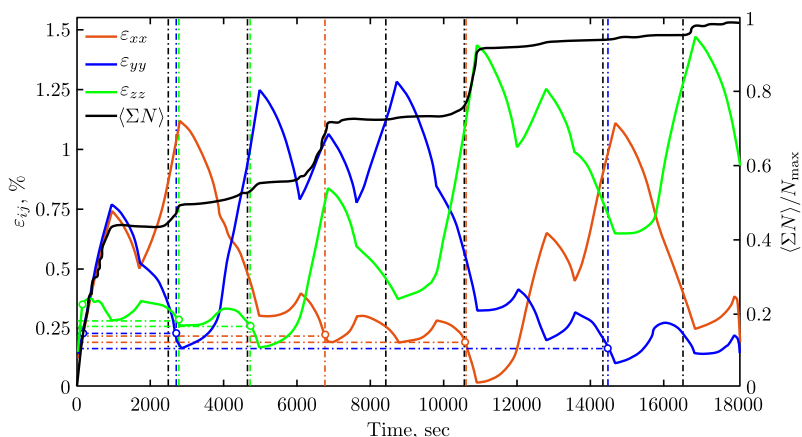


Рис. 2. Траектория деформирования (зависимость осевых деформаций ε_{xx} , ε_{yy} и ε_{zz} от времени) и относительный средний суммарный счет АЭ $(\Sigma N)/N_{\max}$

[Figure 2. Time dependences of axial strains ε_{xx} , ε_{yy} , and ε_{zz} (i.e. strain path) the relative average total sum of AE $(\Sigma N)/N_{\max}$]

лось ни по одному из трех направлений, приращение принималось равным нулю и относилось либо к моменту окончания этапа активного нагружения, либо к моменту окончания разгрузки.

На рис. 3 представлены зависимости приращений деформации относительного сжатия $\Delta\varepsilon_{xx}$, $\Delta\varepsilon_{yy}$ и $\Delta\varepsilon_{zz}$ в трех взаимно ортогональных направлениях Ox , Oy и Oz и относительного среднего суммарного сжатия АЭ от времени, совмещенные с обезразмеренными по оси напряжений (нормировка выполнена на 77 МПа) траекториями нагружения. Точками черного цвета на траекториях отмечены моменты превышения напряжения, достигнутого в первом цикле каждого блока.

Рассмотрим результаты по каждому блоку циклов нагружения отдельно.

3.1. Циклы 1–3 (рис. 3, а). Во втором цикле рост σ_{xx} не сопровождается АЭ активностью вплоть до напряжения, соответствующего максимальному напряжению первого цикла. При этом момент превышения напряжения предыдущего уровня (отмечен черной точкой) не сопровождается ростом деформации относительного сжатия в направлениях, по которым напряжение поддерживается постоянным. Рост $\Delta\varepsilon_{yy}$ и $\Delta\varepsilon_{zz}$ наблюдается спустя 230 сек. и сопровождается увеличением активности АЭ, изменением наклона на кривой суммарного сжатия. В третьем цикле момент превышения напряжения первого цикла и начало роста $\Delta\varepsilon_{zz}$ совпадают (см. рис. 3, а) и сопровождаются слабовыраженным изменением наклона кривой суммарного сжатия при существенном увеличении $\Delta\varepsilon_{zz}$.

В первом цикле образец песчаника подвергается истинному непропорциональному трехосному сжатию. В этом случае ансамбль возникающих дефектов, согласно [27], характеризуется плоской трансверсальной изотропией (planar transverse isotropy): возникающие трещины принадлежат плоскостям, субнормальным к $\sigma_z = \sigma_{zz}$. Во втором цикле истинное трехосное сжатие сменяется традиционным трехосным сжатием с возможностью роста трещин, ориентированных преимущественно параллельно $\sigma_1 = \sigma_{xx}$ с нормалью, произвольно ориентированной в плоскости $\sigma_{yy} - \sigma_{zz}$. Во втором цикле рост трещин и дефектов, субнормальных к σ_{zz} , начинается только после достижения максимального напряжения, при котором они были сформированы в первом цикле. При этом рост трещин, субнормальных к σ_{yy} , ожидаемо вызывает больший прирост деформации относительного сжатия. По абсолютной величине за два цикла $\Delta\varepsilon_{zz}$ больше, чем $\Delta\varepsilon_{yy}$, что отражает факт более интенсивного развития ансамбля трещин, субнормальных к σ_{zz} . Задержка между моментом превышения напряжения первого цикла и превышения деформациями своих реперных значений, по мнению авторов, с одной стороны, связана с тем, что макроскопическое деформационное проявление раскрытия микротрещин является пороговым процессом, требующим некоторой критической плотности одинаково ориентированных трещин. С другой стороны, эта задержка может быть связана с чувствительностью используемого метода измерения деформаций. По сравнению с деформационными измерениями метод АЭ, безусловно, более чувствителен к росту микротрещиноватости.

В третьем цикле происходит смена направления активного сжатия. Оно осуществляется в направлении OY при постоянных напряжениях σ_{zz} и σ_{xx} . Такая конфигурация приложенных нагрузок допускает рост трещиноватости субпараллельной σ с произвольно ориентированными нормальными в плоско-

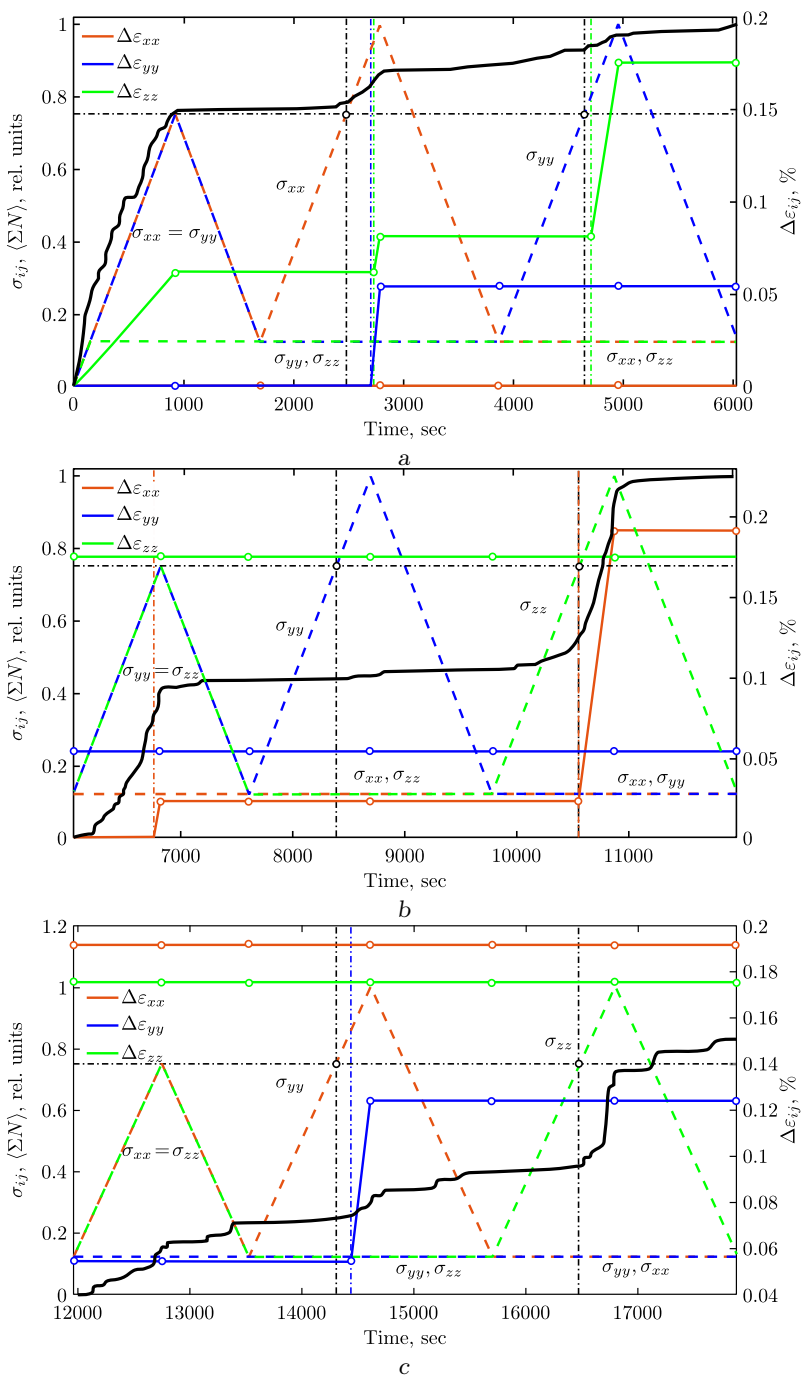


Рис. 3. Зависимости приращений деформаций относительного сжатия $\Delta\varepsilon_{xx}$, $\Delta\varepsilon_{yy}$ и $\Delta\varepsilon_{zz}$ (сплошная линия) в трех взаимно ортогональных направлениях и относительный средний суммарный счет АЭ ΣN (черная линия) для первого (а), второго (б) и третьего (с) блока циклического нагружения от времени. Пунктирная линия — участки программы нагружения

[Figure 3. Time dependences for increment of compression strain $\Delta\varepsilon_{xx}$, $\Delta\varepsilon_{yy}$, and $\Delta\varepsilon_{zz}$ (solid line) in three mutually orthogonal directions and the relative average total sum of AE ΣN (black line) for the first (a), the second (b), and the third (c) triple of cycles. Dotted line — a loading program]

сти $\sigma_{xx} - \sigma_{zz}$. Деформации относительного сжатия $\Delta\varepsilon$ за цикл нагружения не превосходит реперную величину (рис. 3). При этом рост $\Delta\varepsilon_{zz}$ продолжается. Незначительное изменение суммарного счета АЭ в третьем цикле после достижения максимального по абсолютной величине напряжения первого цикла вместе с ощутимым приростом $\Delta\varepsilon_{zz}$ позволяет сделать вывод о том, что основной вклад в деформацию относительного сжатия в этом направлении дают микротрещины, сформировавшиеся на предыдущих этапах нагружения. Фактором, сдерживающим активный рост трещинообразования в третьем цикле нагружения (появление новых и увеличение длины имеющихся трещин), может служить многочастичное взаимодействие в ансамблях уже сформированных разноориентированных дефектов. Необходимо также отметить, что от цикла к циклу наблюдался рост $\Delta\varepsilon_{zz}$ с различной интенсивностью при последовательном уменьшении общего числа импульсов АЭ.

3.2. Циклы 4–6 (рис. 3, b). Для второй тройки циклов характерен рост деформации относительного сжатия в направлении Ox , который в течение первых трех циклов не наблюдался. При этом если в четвертом цикле $\Delta\varepsilon_{xx}$ сравнительно невелико (0.23 %), то в пятом цикле прирост уже составил 1.68 %. Примечательно, что после четвертого цикла изменение конфигурации приложенных напряжений (изменение формы эллипсоида Ламе) при увеличении максимального сжимающего напряжения в пятом цикле не приводит к росту $\Delta\varepsilon_{xx}$ и АЭ активности. Переход от пятого цикла к шестому сопровождается разворотом эллипсоида Ламе на угол $\pi/2$, т. е. сменой направления активного сжатия. Достижение наибольшего по абсолютной величине напряжения третьего цикла и момент начала роста $\Delta\varepsilon_{xx}$ совпадают по времени и сопровождаются существенным увеличением АЭ активности. Суммарная деформация $\Delta\varepsilon_{xx}$ превосходит достигнутую к этому моменту деформацию $\Delta\varepsilon_{zz}$ в ортогональном к Ox направлении Oz .

По аналогии с первой тройкой циклов в пятом цикле следовало ожидать продолжения роста (или раскрытия) трещин и дефектов, сформировавшихся в четвертом цикле и ориентированных субнормально к σ_{xx} . Отсутствие такого роста вместе с отсутствием интенсификации АЭ позволяет предположить, что на развитие раскрытия и увеличения длины трещин влияет как вид напряженного состояния, так и характер взаимодействия в уже сформированном к этому моменту ансамбле разноориентированных дефектов. В пятом цикле при активном нагружении в направлении σ_{yy} имеет место формирование трещин, субнормальных к Ox и Oz . Активное сжатие в предыдущем (четвертом) цикле по двум ортогональным направлениям Ox и Oz создало условие для формирования системы трещин и дефектов в ансамбле, субнормальных к Ox . В пятом цикле на ее развитие влияет наличие наиболее развитой в образце к этому циклу подсистемы дефектов, ориентированной субнормально к Oz . Прикладываемые нагрузки недостаточны для ее развития, но именно она определяет возможность эволюции ансамбля трещин с преимущественно ортогональной ориентацией. Данное предположение подтверждается в шестом цикле, когда активное сжатие в направлении σ_{zz} , приводящее к частичному закрытию и блокировке наиболее представительного ансамбля трещин, субнормальных к σ_{zz} , инициирует активный рост и развитие трещин, субнормально ориентированных к σ_{xx} . Это выражается как в существенном росте деформации $\Delta\varepsilon_{xx}$, имеющей максимальное за шесть циклов значение

по сравнению с деформациями в двух других ортогональных направлениях, так и в активном росте АЭ. Суммарное количество импульсов АЭ, зарегистрированных за шестой цикл, превышает аналогичное количество импульсов третьего цикла.

3.3. Циклы 7–9 (рис. 3, с). В восьмом цикле (втором цикле блока) наблюдается эффект Кайзера. Об этом свидетельствует наблюдаемый рост АЭ активности после достижения максимального по абсолютной величине напряжения предыдущего цикла. Проявление этого эффекта не такое яркое, как во втором или шестом циклах, но оно также сопровождается ростом $\Delta\varepsilon_{yy}$ с временной задержкой. Как было отмечено ранее, рост деформации относительного сжатия $\Delta\varepsilon_{yy}$ на фоне незначительного роста АЭ указывает на то, что основной вклад в деформацию дает раскрытие уже существующих трещин и дефектов без увеличения их длины. В девятом цикле при развороте эллипсоида Ламе наблюдается противоположная ситуация. На фоне отсутствия приращения деформации относительного сжатия в трех взаимно ортогональных направлениях наблюдается рост суммарного счета АЭ начиная с момента достижения максимального по абсолютной величине напряжения первого цикла в этом блоке. С точки зрения авторов, причиной активизации АЭ в этом случае является взаимодействие трех систем трещин, имеющих преимущественную взаимно ортогональную друг относительно друга ориентацию. Эта дефектная система была сформирована в предыдущих восьми циклах. Необходимо отметить, что по сравнению со всплесками АЭ активности в предыдущих циклах наблюдаемое увеличение накопленных сигналов АЭ в девятом цикле можно охарактеризовать как незначительное.

Заключение. Проведенные эксперименты, по мнению авторов, позволяют продвинуться в понимании механизмов и условий проявления эффекта деформационной памяти в горных породах, подвергающихся трехмерному непропорциональному циклическому нагружению с изменением ориентации и формы эллипсоида Ламе. Подобные условия нагружения наблюдаются в различных природных системах: это и вулканические постройки, и разломные зоны различного масштаба и происхождения, и такие элементы подземных сооружений, как резервуары природного газа и хранилища отходов различного типа [35]. Циклическая смена ориентации и формы эллипсоида Ламе приводит к формированию анизотропной поврежденности: системы разноориентированных ансамблей дефектов и трещин различного масштаба, каждый из которых может демонстрировать независимый контролируемый эффект памяти повреждений (эффект Кайзера). Результаты непропорционального трехосного сжатия по разработанной 9-цикловой программе нагружения показали, что преобладающим механизмом проявления эффекта памяти повреждений в каждом определенно ориентированном ансамбле трещин является развитие микротрещин нормального отрыва, ориентированных субнормально к направлению минимального главного напряжения. В случае традиционного трехосного напряженно-деформированного состояния $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ вклад в АЭ-отклик на превышение напряжения предыдущего цикла могут давать ансамбли разноориентированных дефектов и трещин, нормаль которых произвольно ориентирована в плоскости $\sigma_2 - \sigma_3$. Необходимо также отметить, что проявление эффекта памяти повреждений определяется не столько фактом раскрытия существующих «благоприятно»

ориентированных микротрещин, сколько дискретным ростом (увеличением длины) существующих и появлением новых микротрещин.

Полученные результаты являются основой для развития моделей механики деформирования и разрушения горных пород, учитывающих анизотропный характер накопления повреждений [36,37]. Действительно, подавляющее большинство моделей, описывающих неупругое поведение горных пород и их разрушение, оперирует критериями, базирующимися на линейном, квадратичном и третьем инвариантах тензоров напряжений и/или деформаций без учета естественной анизотропной природы материалов. Использование этих инвариантов исключает возможность описания преимущественной ориентации повреждений по отношению к приложенным главным напряжениям и их ориентациям. Полученные результаты, по мнению авторов, могут послужить триггером для развития подходов, учитывающих ориентационные эффекты развития поврежденности при различных сложных напряженно-деформированных состояниях и в реальных условиях трехосного непропорционального нагружения, которые наблюдаются на практике при эксплуатации подземных сооружений.

Конкурирующие интересы. Заявляем, что в отношении авторства и публикации этой статьи конфликта интересов не имеем.

Авторский вклад и ответственность. И.А. Пантелеев — разработка программы экспериментальных исследований, проведение испытаний, обработка и анализ экспериментальных данных, интерпретация полученных результатов, подготовка первичного варианта рукописи, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. А.В. Зайцев — разработка программы экспериментальных исследований, отбор материала для экспериментов и обоснование его выбора, проведение испытаний, обработка и анализ экспериментальных данных, интерпретация полученных результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. К.Б. Устинов — интерпретация полученных результатов, подготовка первичного варианта рукописи, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. В.А. Мубассарова — проведение испытаний, обработка и анализ экспериментальных данных. Н.И. Шевцов — подготовка и изготовление образцов, проведение испытаний, обработка и анализ экспериментальных данных. В.В. Химуля — подготовка и изготовление образцов, проведение испытаний. В.И. Карев — идея исследования, разработка программы экспериментальных исследований, интерпретация полученных результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. Ю.Ф. Коваленко — разработка программы экспериментальных исследований, интерпретация полученных результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ FSNM–2020–0027 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 г. и плановый период 2021 и 2022 гг.

Библиографический список

1. Kaiser J. *An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Tests or a Study of Acoustic Phenomena in Tensile Tests*: Ph.D. Thesis, Tech. Hosch. Munchen, Munich, Germany, 1950.
2. Holcomb D. J., Costin L. S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions // *J. Appl. Mech.*, 1986. vol. 53, no. 3. pp. 536–544. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3171807>.
3. Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. International loading rates // *Mech. Materials*, 1993. vol. 33, no. 11. pp. 669–677.
4. Villaescusa E., Seto M., Baird G. Stress measurements from oriented core // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2002. vol. 39, no. 5. pp. 603–615. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00059-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00059-X).
5. Zang A., Stephansson O. *Stress Field of the Earth's Crust*. Dordrecht: Springer, 2010. xix+324 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8444-7>.
6. Lehtonen A., Cosgrove J. W., Hudson J. A., Johansson E. An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect // *Eng. Geol.*, 2012. vol. 124. pp. 24–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.012>.
7. Heimisson E. R., Einarsson P., Sigmundsson F., Brandsdóttir B. Kilometer-scale Kaiser effect identified in Krafla volcano, Iceland // *Geophys. Res. Lett.*, 2015. vol. 42, no. 19. pp. 7958–7965. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015gl065680>.
8. Рассказов М. И., Терешкин А. А., Цой Д. И. Оценка напряженного состояния массива месторождения “Пионер” на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти горных пород // *Проблемы недропользования*, 2019. № 2(21). С. 62–67. EDN: NTILVU. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.02.062>.
9. Белютюков Н. Л. Особенности использования эффекта Кайзера для оценки напряженного состояния массива горных пород // *Горное эко*, 2019. № 3(76). С. 24–31. EDN: UCRGVR. DOI: <https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.7>.
10. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Об использовании эффекта Кайзера в эпоксидной смоле с кварцевым наполнителем для оценки напряжений в массиве горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2012. № S1. С. 97–104. EDN: QCLEQZ.
11. Николенко П. В., Шкуратник В. Л., Чепур М. Д., Кошелев А. Е. Использование эффекта Кайзера в композиционных материалах для контроля напряженного массива горных пород // *ФТПРПИ*, 2018. № 1. С. 25–31. EDN: YTIKTM. DOI: <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180103>.
12. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V. Spectral characteristics of acoustic emission in carbon fiber-reinforced composite materials subjected to cyclic loading // *Adv. Mat. Sci. Eng.*, 2018, 1962679. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1962679>.
13. Kilburn C. Precursory deformation and fracture before brittle rock failure and potential application to volcanic unrest // *J. Geophys. Res.*, 2012. vol. 117, no. B2, B02211. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JB008703>.
14. Faulkner D. R., Mitchell T. M., Healy D., Heap M. J. Slip on ‘weak’ faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone // *Nature*, 2006. vol. 444, no. 7121. pp. 922–925. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature05353>.
15. Gudmundsson A., Philipp S. L. How local stress fields prevent volcanic eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2006. no. 3–4. pp. 257–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.06.005>.
16. Karaoglu Ö., Browning J., Bazargan M., Gudmundsson A. Numerical modelling of triple-junction tectonics at Karlova, Eastern Turkey, with implications for regional magma transport // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2016. no. 452. pp. 157–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.037>.
17. Lavrov A. V. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003. vol. 40, no. 2. pp. 151–171. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00138-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00138-7).

18. Lavrov A., Vervoort A., Wevers M., Napier J. A. L. Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2002. vol. 39, no. 3. pp. 287–302. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(02\)00038-2](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(02)00038-2).
19. Chen Z. H., Tham L. G., Xie H. Experimental and numerical study of the directional dependency of the Kaiser effect in granite // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007. vol. 44, no. 7. pp. 1053–1061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.09.009>.
20. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks // *Rock Mech. Rock Engng.*, 1993. vol. 26, no. 4. pp. 333–351. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01027116>.
21. Pestman B. J., Van Munster J. G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts*, 1996. vol. 33, no. 6. pp. 585–593. DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)00011-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00011-3).
22. Pestman B. J., Kenter C. J., Van Munster J. G. Estimation of in-situ stress magnitudes from measurements on cores // *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, 1998 (Trondheim, Norway, July 1998), SPE-47239-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/47239-ms>.
23. Pestman B. J., Holt R. M., Kenter C. J., Van Munster J. G. Field application of a novel core-based in-situ stress estimation technique // *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference*, 2002 (Irving, Texas, October 2002), SPE-78158-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/78158-ms>.
24. Шкурятник В. Л., Лавров А. В. *Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели*. М.: Акад. горных наук, 1997. 159 с.
25. Лавров А. В., Шкурятник В. Л., Филимонов Ю. Л. *Акустэмиссионный эффект памяти в горных породах*. М.: МГГУ, 2004. 456 с. EDN: **SDSUPF**.
26. Browning J., Meredith P. G., Stuart C. E., Healy D., Harland S., Mitchell T. M. Acoustic characterization of crack damage evolution in sandstone deformed under conventional and true triaxial loading // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2017. vol. 122, no. 6. pp. 4395–4412. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016jb013646>.
27. Browning J., Meredith P. G., Stuart C., Harland S., Healy D., Mitchell T. M. A directional crack damage memory effect in sandstone under true triaxial loading // *Geophys. Res. Lett.*, 2018. vol. 45, no. 14. pp. 6878–6886. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL078207>.
28. Карев В. И., Климов Д. М., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б. О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния // *Изв. РАН. МТТ*, 2016. № 5. С. 15–21. EDN: **WRJKER**.
29. Климов Д. М., Карев В. И., Коваленко Ю. Ф. Экспериментальное исследование влияния неравнокомпонентного трехосного напряженного состояния на проницаемость горных пород // *Изв. РАН. МТТ*, 2015. № 6. С. 39–48. EDN: **VKACQZ**.
30. Shevtsov N., Zaitsev A., Pantelev I. Deformation and destruction of rocks on the true triaxial loading system with continuous acoustic emission registration / *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*. Cham: Springer, 2019. pp. 424–432. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11533-3_42.
31. Пантелеев И. А., Мубассарова В. А., Зайцев А. В., Шевцов Н. И., Коваленко Ю. Ф., Карев В. И. Эффект Кайзера при трехосном сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида заданных напряжений // *ФТПРПИ*, 2020. № 3. С. 47–55. EDN: **BFAPJC**. DOI: <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200305>.
32. Пантелеев И. А., Мубассарова В. А., Зайцев А. В., Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б., Шевцов Н. И. Эффект Кайзера при многоосном непропорциональном сжатии песчаника // *Докл. РАН. Физ., техн. науки*, 2020. Т. 495, № 1. С. 63–67. EDN: **QWRQGD**. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2686740020060152>.
33. Шевцов Н. И., Зайцев А. В., Пантелеев И. А. Исследование связи напряженно-деформированного состояния горных пород с потоком акустической эмиссии на испытательной системе трехосного независимого нагружения // *Процессы в геосредах*, 2019. № 1(19). С. 129–136. EDN: **RQVKMG**.
34. Пантелеев И. А., Коваленко Ю. Ф., Сидорин Ю. В., Зайцев А. В., Карев В. И., Устинов К. Б., Шевцов Н. И. Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонент-

- ном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // *Физ. мезомех.*, 2019. Т. 22, № 4. С. 56–63. EDN: QXJPUS. DOI: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-14006>.
35. Healy D., Blenkinsop T. G., Timms N. E., Meredith P. G., Mitchell T. M., Cooke M. L. Polymodal faulting: Time for a new angle on shear failure // *J. Struct. Geol.*, 2015. vol. 80. pp. 57–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.08.013>.
 36. Panteleev I., Lyakhovsky V., Browning J., Meredith P. G., Healy D., Mitchell T. M. Non-linear anisotropic damage rheology model: Theory and experimental verification // *Eur. J. Mech., A/Solids*, 2021. vol. 85, 104085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104085>.
 37. Lyakhovsky V., Panteleev I., Shalev E., Browning J., Mitchell T. M., Healy D., Meredith P. G. A new anisotropic poroelasticity model to describe damage accumulation during cyclic triaxial loading of rock // *Geophys. J. Int.*, 2022. vol. 230, no. 1. pp. 179–201. EDN: FEJKUL. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggac062>.

MSC: 74L10

Orientation nature of the damage-memory effect under triaxial cyclic nonproportional compression of a sandstone

*I. A. Panteleev¹, A. V. Zaitsev², K. B. Ustinov³,
V. A. Mubassarova¹, N. I. Shevtsov³, V. V. Khimulia³,
V. I. Karev³, Yu. F. Kovalenko³*

¹ Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
1, Academician Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation.

² Perm State National Research Polytechnical University,
29, Komsomolskiy pr., 614990, Perm, Russian Federation.

³ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences,
101–1, pr. Vernadskogo, Moscow, 119526, Russian Federation.

Abstract


The paper describes the mechanisms and conditions for the damage-memory effect (Kaiser effect) in rocks subjected to a three-dimensional non-proportional cyclic loading with changes in the rocks' shape and orientation of the Lamé-ellipsoid. The experiments with the cubic samples taken from polymictic sandstone were conducted on Triaxial Independent Loading Testing System with continuous recording of an acoustic emission signals. The results of a nonproportional triaxial compression under the developed protocol, it is 9-cycle loading program, have shown that a dominate mechanism of the damage-memory effect in each ensemble of cracks (vectored differently) is the development of micro-cracks of opening fracture mode oriented sub-normally to the minimum main stress. It was found that the Kaiser damage-memory effect is detected not so much to the fact of opening cracks, friendly oriented, as to a discrete growing (increase of length) of already existing and newly emerging micro-cracks. The obtained results can be considered as a trigger for models development oriented to strain and destruction of rocks, taking into account the anisotropic nature of damage accumulation.

Mechanics of Solids

Research Article

© Authors, 2022

© Samara State Technical University, 2022 (Compilation, Design, and Layout)

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Panteleev I. A., Zaitsev A. V., Ustinov K. B., Mubassarova V. A., Shevtsov N. I., Khimulia V. V., Karev V. I., Kovalenko Yu. F. Orientation nature of the damage-memory effect under triaxial cyclic nonproportional compression of a sandstone, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2022, vol. 26, no. 2, pp. 293–310. EDN: MMKNTJ. DOI: [10.14498/vsgtu1890](https://doi.org/10.14498/vsgtu1890) (In Russian).

Authors' Details:

Ivan A. Panteleev  <https://orcid.org/0000-0002-7430-3667>

Cand. Phys. & Math. Sci.; Head of Laboratory of Digitalization of Mining Processes;
e-mail: pia@icmm.ru

Alexey V. Zaitsev  <https://orcid.org/0000-0003-0578-7917>

Cand. Phys. & Math. Sci.; Associate Professor; Dept. of Mechanics of Composite Material and Structures; e-mail: a-zaitsev@mail.ru

Keywords: Kaiser effect, acoustic emission, true triaxial loading, rotation of Lamé-ellipsoid, changes in Lamé-ellipsoid shape, nonproportional cyclic compression, orientation nature of the damage-memory effect.

Received: 25th October, 2021 / Revised: 28th April, 2022 /

Accepted: 23rd May, 2022 / First online: 28th June, 2022

Competing interests. We declare that we have no conflicts of interest in the authorship and publication of this article.

Authors' contributions and responsibilities. I.A. Panteleev: Development of an experimental research program; Carrying out tests; Processing and analysis of experimental data; Interpretation of the results; Writing — original draft and review & editing. A.V. Zaitsev: Development of an experimental research program; Selection of materials for testing and justification of its choice; Carrying out tests; Processing and analysis of experimental data; Interpretation of the results; Writing — original draft and review & editing. K.B. Ustinov: Interpretation of the results; Writing — original draft and review & editing. V.A. Mubassarova: Carrying out tests; Processing and analysis of experimental data. N.I. Shevtsov: Sample preparation and fabrication; Carrying out tests; Processing and analysis of experimental data. V.V. Himulya: Sample preparation and fabrication; Carrying out tests. V.I. Karev: Idea of study; Development of an experimental research program; Interpretation of the results; Writing — original draft and review & editing. Yu.F. Kovalenko: Development of an experimental research program; Interpretation of the results; Writing — original draft and review & editing. The authors are absolutely responsible for submit the final manuscript to print. Each author has approved the final version of manuscript.

Funding. The study is supported by the Russian Ministry of Science and Education (State Assignment FSNM-2020-0027 for Basic Researches in 2020-2022).

Konstantin B. Ustinov  <https://orcid.org/0000-0001-5852-3355>

Dr. Phys. & Math. Sci.; Chief Researcher; Lab. of Geomechanics; e-mail: ustinov@ipmnet.ru

Virginia A. Mubassarova  <https://orcid.org/0000-0001-7593-6776>


Cand. Phys. & Math. Sci.; Researcher; Lab. of Thermomechanics of Solids;
e-mail: mubassarova.v@icmm.ru

Nikolai I. Shevtsov  <https://orcid.org/0000-0003-0792-2262>


Junior Researcher; Lab. of Geomechanics; e-mail: red3991@yandex.ru

Valerii V. Khimulia  <https://orcid.org/0000-0003-2116-6483>

Cand. Phys. & Math. Sci. Junior Researcher; Lab. of Geomechanics;
e-mail: valery.khim@gmail.com

Vladimir I. Karev  <https://orcid.org/0000-0003-3983-4320>

Dr. Techn. Sci.; Professor; Deputy Director for Science; Chief Researcher; Lab. of Geomechanics; e-mail: wikarev@ipmnet.ru

Yurii F. Kovalenko  <https://orcid.org/0000-0002-6128-1737>

Dr. Phys. & Math. Sci.; Professor; Head of Laboratory; Lab. of Geomechanics;
e-mail: perfolinkgeo@yandex.ru

References

1. Kaiser J. *An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Tests or a Study of Acoustic Phenomena in Tensile Tests*, Ph.D. Thesis, Tech. Hosch. Munchen, Munich, Germany, 1950.
2. Holcomb D. J., Costin L. S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions, *J. Appl. Mech.*, 1986, vol. 53, no. 3, pp. 536–544. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3171807>.
3. Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. International loading rates, *Mech. Materials*, 1993, vol. 33, no. 11, pp. 669–677.
4. Villaescusa E., Seto M., Baird G. Stress measurements from oriented core, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2002, vol. 39, no. 5, pp. 603–615. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(02\)00059-x](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(02)00059-x).
5. Zang A., Stephansson O. *Stress Field of the Earth's Crust*. Dordrecht, Springer, 2010, xix+324 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8444-7>.
6. Lehtonen A., Cosgrove J. W., Hudson J. A., Johansson E. An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect, *Eng. Geol.*, 2012, vol. 124, pp. 24–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.012>.
7. Heimisson E. R., Einarsson P., Sigmundsson F., Brandsdóttir B. Kilometer-scale Kaiser effect identified in Krafla volcano, Iceland, *Geophys. Res. Lett.*, 2015, vol. 42, no. 19, pp. 7958–7965. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015gl065680>.
8. Rasskazov M. I., Tereshkin A. A., Tsoi D. I. Estimate of the stress-strain state of the rock mass in the pioner deposit based on acoustic emission memory effect of rocks, *Problems of Subsoil Use*, 2019, no. 2(21), pp. 62–67 (In Russian). EDN: NTILVU. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.02.062>.
9. Belyutyukov N. L. Features of Kaiser effect use to estimate stress state of the rock mass, *Gornoe Ekho*, 2019, no. 3(76), pp. 24–31 (In Russian). EDN: UCRGVR. DOI: <https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.7>.
10. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V. About using the Kaiser effect in epoxy resin with quartz filler to estimate stresses in the rock mass, *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2012, no. S1, pp. 97–104 (In Russian).
11. Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L., Chepur M. D., Koshelev A. E. Using the Kaiser effect in composites for stressed rock mass control, *J. Min. Sci.*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 21–26. EDN: FFEHBR. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739118013282>.
12. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V. Spectral characteristics of acoustic emission in carbon fiber-reinforced composite materials subjected to cyclic loading, *Adv. Mat. Sci. Eng.*, 2018, 1962679. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1962679>.
13. Kilburn C. Precursory deformation and fracture before brittle rock failure and potential application to volcanic unrest, *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, no. B2, B02211. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JB008703>.
14. Faulkner D. R., Mitchell T. M., Healy D., Heap M. J. Slip on ‘weak’ faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone, *Nature*, 2006, vol. 444, no. 7121, pp. 922–925. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature05353>.
15. Gudmundsson A., Philipp S. L. How local stress fields prevent volcanic eruptions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2006, no. 3–4, pp. 257–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.06.005>.
16. Karaoglu Ö., Browning J., Bazargan M., Gudmundsson A. Numerical modelling of triple-junction tectonics at Karlova, Eastern Turkey, with implications for regional magma transport, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2016, no. 452, pp. 157–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.037>.
17. Lavrov A. V. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, vol. 40, no. 2, pp. 151–171. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(02\)00138-7](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(02)00138-7).

18. Lavrov A., Vervoort A., Wevers M., Napier J. A. L. Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2002, vol. 39, no. 3, pp. 287–302. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(02\)00038-2](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(02)00038-2).
19. Chen Z. H., Tham L. G., Xie H. Experimental and numerical study of the directional dependency of the Kaiser effect in granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, vol. 44, no. 7, pp. 1053–1061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.09.009>.
20. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks, *Rock Mech. Rock Engng.*, 1993, vol. 26, no. 4, pp. 333–351. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01027116>.
21. Pestman B. J., Van Munster J. G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts*, 1996, vol. 33, no. 6, pp. 585–593. DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)00011-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00011-3).
22. Pestman B. J., Kenter C. J., Van Munster J. G. Estimation of in-situ stress magnitudes from measurements on cores, *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, 1998 (Trondheim, Norway, July 1998), SPE-47239-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/47239-ms>.
23. Pestman B. J., Holt R. M., Kenter C. J., Van Munster J. G. Field application of a novel core-based in-situ stress estimation technique, *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference*, 2002 (Irving, Texas, October 2002), SPE-78158-MS. DOI: <https://doi.org/10.2118/78158-ms>.
24. Shkuratnik V. L., Lavrov A. V. *Effekty pamiati v gornykh porodakh. Fizicheskie zakonomernosti, teoreticheskie modeli* [Memory Effects in Rocks. Physical Laws, Theoretical Models]. Moscow, Akad. Gornykh Nauk, 1997, 159 pp. (In Russian)
25. Lavrov A. V., Shkuratnik V. L., Filimonov Yu. L. *Akustoemissionnyi effekt pamiati v gornykh porodakh* [Acoustic Emission Memory Effect in Rocks]. Moscow, Moscow State Mining University, 2004, 456 pp. (In Russian). EDN: SDSUPF.
26. Browning J., Meredith P. G., Stuart C. E., Healy D., Harland S., Mitchell T. M. Acoustic characterization of crack damage evolution in sandstone deformed under conventional and true triaxial loading, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2017, vol. 122, no. 6, pp. 4395–4412. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016jb013646>.
27. Browning J., Meredith P. G., Stuart C., Harland S., Healy D., Mitchell T. M. A directional crack damage memory effect in sandstone under true triaxial loading, *Geophys. Res. Lett.*, 2018, vol. 45, no. 14, pp. 6878–6886. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL078207>.
28. Karev V. I., Klimov D. M., Kovalenko Yu. F., Ustinov K. B. Fracture of sedimentary rocks under a complex triaxial stress state, *Mech. Solids*, 2016, vol. 51, no. 5, pp. 522–526. EDN: YVFUNL. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0025654416050022>.
29. Klimov D. M., Karev V. I., Kovalenko Yu. F. Experimental study of the influence of a triaxial stress state with unequal components on rock permeability, *Mech. Solids*, 2015, vol. 50, no. 6, pp. 633–640. EDN: WPQWWR. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0025654415060047>.
30. Shevtsov N., Zaitsev A., Pantelev I. Deformation and destruction of rocks on the true triaxial loading system with continuous acoustic emission registration, In: *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*. Cham, Springer, 2019, pp. 424–432. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11533-3_42.
31. Pantelev I. A., Mubassarova V. A., Zaitsev A. V., Shevtsov N. I., Kovalenko Yu. F., Karev V. I. Kaiser effect in sandstone in polyaxial compression with multistage rotation of an assigned stress ellipsoid, *J. Min. Sci.*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 370–377. EDN: LHZOJI. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739120036653>.
32. Pantelev I. A., Mubassarova V. A., Zaitsev A. V., Karev V. I., Kovalenko Yu. F., Ustinov K. B., Shevtsov N. I. The Kaiser effect under multiaxial nonproportional compression of sandstone, *Dokl. Phys.*, 2020, vol. 65, no. 11, pp. 396–399. EDN: SPBANH. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335820110075>.
33. Shevtsov N. I., Zaitsev A. V., Pantelev I. A. Studying the relationship between the stress-strain state of the rock mass and acoustic emission flux using triaxial independent loading test system, *Protsessy v geosredakh*, 2019, no. 1(19), pp. 129–136 (In Russian). EDN: RQBKMG.

34. Panteleev I. A., Kovalenko Yu. F., Sidorin Yu. V., Zaitsev A. V., Karev V. I., Ustinov K. B., Shevtsov N. I. Damage evolution under complex nonuniform compression of sandstone according to acoustic emission data, *Phys. Mesomech.*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 56–63 (In Russian). EDN: QXJPUS. DOI: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-14006>.
35. Healy D., Blenkinsop T. G., Timms N. E., Meredith P. G., Mitchell T. M., Cooke M. L. Polymodal faulting: Time for a new angle on shear failure, *J. Struct. Geol.*, 2015, vol. 80, pp. 57–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.08.013>.
36. Panteleev I., Lyakhovsky V., Browning J., Meredith P. G., Healy D., Mitchell T. M. Non-linear anisotropic damage rheology model: Theory and experimental verification, *Eur. J. Mech., A/Solids*, 2021, vol. 85, 104085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104085>.
37. Lyakhovsky V., Panteleev I., Shalev E., Browning J., Mitchell T. M., Healy D., Meredith P. G. A new anisotropic poroelasticity model to describe damage accumulation during cyclic triaxial loading of rock, *Geophys. J. Int.*, 2022, vol. 230, no. 1, pp. 179–201. EDN: FEJKUL DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggac062>.