

На правах рукописи



Пантелеев Иван Алексеевич

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И ГЕОСРЕД:
АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ
И ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ**

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Кривцов Антон Мирославович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН, директор Высшей школы теоретической механики и математической физики ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

Лисовенко Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией механики технологических процессов ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва.

Турунтаев Сергей Борисович, доктор физико-математических наук, директор ФГБУН Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Томск.

Защита состоится 13 октября 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (www.icmm.ru).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01,
доктор физико-математических наук, доцент



А.Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и разработанность темы исследования. Непрерывно возрастающая потребность человечества в полезных ископаемых является локомотивом развития новых подходов и технологий их добычи, включая добычу на больших глубинах, морском и океаническом шельфе, в сложных геологических условиях и в удароопасных районах. В рамках современной «зеленой» повестки идет активное освоение отработанных шахтных полей, коллекторов нефти и газа в качестве как временных хранилищ полезных ископаемых, так и герметичных резервуаров для захоронения отходов различного типа. Обеспечение безопасности ведения горных работ, повышение эффективности новых методов добычи и извлечения полезных ископаемых, проектирование и эксплуатация подземных хранилищ, обеспечение их экологической безопасности в эпоху масштабной цифровизации основывается на создании цифровых двойников горнотехнических систем и процессов, текущее состояние которых непрерывно корректируется в соответствии с данными многопараметрического мониторинга. Разработка геомеханических моделей, лежащих в основе таких двойников, требует расширения наших представлений о механизмах и закономерностях деформирования горных пород при произвольных, в том числе сложных условиях нагружения. В результате возрастает актуальность экспериментальных и теоретических исследований деформирования горных пород при монотонных и циклических непропорциональных трехосных нагрузках с учетом как ориентационных эффектов развития поврежденности, приводящих к индуцированной поврежденностью анизотропии свойств, так и направленного уплотнения, связанного с эволюцией порового пространства.

Низкопористые осадочные породы и породы кристаллического фундамента при различных видах нагружения обнаруживают специфическое деформационное поведение. Специфичность поведения заключается в нелинейном упругом отклике материала уже при малом уровне действующих напряжений, зависимости упругих свойств от вида напряженно-деформированного состояния, анизотропии упругих свойств, индуцированной ростом микротрещиноватости, накопления необратимых деформаций, обусловленных ее развитием. Для описания указанных эффектов развиваются теоретические подходы, которые, как правило, сфокусированы на отдельных аспектах деформирования и накопления повреждений в материалах такого класса: модели упругих разномодульных сред (С.А. Амбарцумян, А.А. Хачатрян, В.В. Болотин, Г.С. Шапиро, Н.М. Матченко, Ю.Л. Работнов, Е.В. Ломакин, В.П. Маслов, П.П. Мосолов, И.Ю. Цвелодуб, Z.M. Ye, K.P. Rao и др.); модели упругости с введением параметров вида напряженно-деформированного состояния (В.П. Мясников, Е.В. Ломакин, А.И. Олейников, В.А. Ляховский и др.); модели континуальной механики поврежденности с параметрами поврежденности различного ранга (Ю.Н. Работнов, Л.М. Качанов, D. Krajcinovic, J.A. Lemaitre, J.L. Chaboche, В.Н. Кукуджанов, G.Z. Voyiadjis, J.P. Cordebois, Ю.Н. Радаев, Ю.К. Петреня, V. Tamuzh, Ю.В. Соколкин и др.). В настоящее время актуальной задачей механики деформируемого твёрдого тела и теоретической геомеханики является разработка обобщенных моделей, нацеленных на описание бóльшего числа особенностей деформа-

ционного поведения горных пород, в том числе при сложных трехмерных траекториях нагружения.

С самого начала деформирования и до стадии предразрушения адаптация хрупкого материала к внешней нагрузке и возможные сценарии его деформационного отклика базируются на развитии и коллективном взаимодействии ансамблей микротрещин как различной ориентации, так и различных типов деформации. Вариации ориентаций и механизмов микротрещин в случае фиксированной конфигурации приложенных к хрупкому твердому телу нагрузок являются маркерами неоднородности микроструктуры материала и связанной с нею изменчивости локального напряженно-деформированного состояния. Исследование вариаций, с одной стороны, является ключом к пониманию процесса адаптации хрупкого материала к внешнему воздействию за счет перестройки и развития дефектной подсистемы, а с другой стороны, позволяет получить уникальную информацию для развития, идентификации и верификации физических моделей деформирования и разрушения материалов, включая физические модели и модели с тензорными параметрами поврежденности. Данные факторы определяют актуальность исследований, направленных на поиск и разработку подходов экспериментального определения ориентации и механизмов микротрещин при деформировании и разрушении хрупких твердых тел.

Широко распространенным методом для исследования развивающейся в процессе деформирования хрупких материалов микротрещиноватости является метод акустической эмиссии (АЭ). Подходы к анализу данных АЭ, направленные на определение типа ее источника, получили развитие в работах российских и зарубежных ученых (Н.В. Новиков, Л.Н. Степанова, А.Н. Серьезнов, Г.Г. Кочарян, А.А. Остапчук, Д.Л. Мерсон, А.В. Данюк, А.П. Брагинский, Г.Б. Муравин, О.В. Башков, А.В. Патонин, М. Ohtsu, G. Qi, S. Lomov, P.J. De Groot, R. Gutkin, A. Vinogradov, S. Huguet, L. Zhang). Несмотря на большое количество подходов к определению типа и механизмов источника АЭ, наиболее перспективными в плане объема предоставляемой информации являются сейсмологические методы, в частности, базирующиеся на понятии тензора сейсмического момента. Такие методы позволяют определить не только механизмы источников АЭ, но и их ориентацию в пространстве, и направление подвижки. Применение таких методов к данным акустической эмиссии предъявляет высокие требования к формированию исходного каталога событий АЭ, а также требует разработки подходов к уточнению найденных решений и отбраковки неустойчивых.

Эволюция разномасштабной разноориентированной микротрещиноватости в деформируемом материале является физическим механизмом эффекта памяти (эффект Кайзера), наблюдающегося при циклическом нагружении горных пород. Несмотря на интенсивные исследования проявления этого эффекта в горных породах на протяжении последних тридцати-сорока лет, выполненные российскими и зарубежными научными школами (В.Л. Шкуратник, А.В. Лавров, М.И. Рассказов, Н.Л. Бельтюков, П.В. Николенко, D.J. Holcomb, E. Tuncaу, T. Kanagawa, J. Browning, Y. Chen, B.J. Pestman и др.), вопрос о физических механизмах и параметрах, контролирующих проявление эффекта Кайзера, в особенности в случае многоосной нагрузки с переориентацией приложенных напряжений, является до сих пор открытым. Актуальность исследования этого эф-

фекта при трехмерных конфигурациях приложенных напряжений объясняется необходимостью его использования для оценки величины и ориентации природных напряжений в массиве горных пород в районах добычи полезных ископаемых, сложных геологических структур, разломных зон и вулканических построек.

При исходной пористости горных пород, превышающей первые проценты, ее эволюция становится ключевым фактором, наряду с эволюцией трещиноподобных дефектов, определяющих характер деформирования материала вплоть до его разрушения. При высоких уровнях среднего сжимающего напряжения в пористых хрупких материалах наблюдается снижение эффективной прочности, вызванное интенсивным разрушением пористого пространства, зерен, скелета породы, что приводит к их уплотнению. Существующие феноменологические модели деформирования хрупких пористых материалов, базирующиеся на концепции критического состояния (J. Alonso, M. Carroll, N.G. Gerogiannopoulos, G.D. Nguyen, R.A. Schultz, R. Siddharthan, K.R. Shah, H. Sheldon и др.), модели «шатровой» пластичности (P. Baud, A.F. Fossum, J.T. Fredrich, E. Grueschow, J. Rudnicki, K. Issen, M. Motamedi и др.), сфокусированы на строгом описании формы предельной поверхности и ее эволюции вследствие упрочнения/разупрочнения материала. При этом, как правило, игнорируется снижение жесткости материала, вызванное развитием поврежденности. В последние десять лет разработка моделей деформирования трещиноватых пористых сред является ключевым направлением развития теоретической геомеханики и механики деформируемого твердого тела (Ю.П. Стефанов, V. Lyakhovsky, J. Ma, A. Shojaei, V.D. Vu и др.). Необходимо отметить, что вопросу учета ориентационного характера развития поврежденности в пористых хрупких материалах при построении моделей до настоящего времени не уделялось особого внимания.

Развитие дефектов различного типа в процессе деформирования горных пород и их коллективное взаимодействие приводят к локализации деформации, имеющей различные пространственно-временные формы. Интенсивные лабораторные исследования неупругого деформирования материалов показали, что автоволновые формы макролокализации деформации не зависят от структурных особенностей и физико-механических свойств материалов, их набор универсален для широкого спектра материалов, а реализация той или иной формы определяется соответствующей стадией неупругого деформирования материала. Распространение найденных закономерностей на горные породы различного литотипа (Л.Б. Зуев, С.А. Баранникова) поднимает вопрос о зависимости форм макролокализации деформации и очередности их следования от условий нагружения. Актуальность данной тематики подкрепляется необходимостью совершенствования подходов к геомеханическому обеспечению устойчивости краевых частей подработанного массива, для которых преобладающим механизмом деформирования является растяжение.

«Медленные» деформационные волны являются ярким проявлением локализации деформации в геосреде на геологическом масштабе. Несмотря на более чем полувековую историю, проблемы пространственно-временной миграции геодинамических процессов и «медленных» деформационных волн, которые рассматриваются как причина этих миграционных процессов, остаются одними из самых дискуссионных в современной геодинамике и геомеханике (Ю.О.

Кузьмин, П.В. Макаров). Ввиду трудоемкости, дороговизны и огромных масштабов, полевые наблюдения без создания специализированных государственных полигонов не дают возможности исследовать более подробно динамику распространения «медленных» волн и их взаимодействие с разномасштабными разломными структурами. Альтернативным подходом, который может помочь найти ответы на поставленные вопросы, является физическое моделирование процессов, протекающих в литосфере, получившее в настоящее время второе дыхание благодаря использованию новейших методов неразрушающего контроля.

Цель диссертационной работы состоит в разработке модели деформирования хрупких горных пород, описывающей ориентационные эффекты развития поврежденности и уплотнения при трехосном нагружении, и способов ее экспериментальной верификации, базирующихся на проявлении направленного эффекта Кайзера в горных породах и результатах определения механизмов источников акустической эмиссии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **научные задачи**:

1. Изучение форм локализации деформации при одноосном прямом растяжении соляных пород, особенностей распространения «медленных» деформационных волн в формирующейся сдвиговой зоне по данным физического моделирования с использованием современных оптических систем неразрушающего контроля.

2. Разработка методики восстановления механизмов событий акустической эмиссии, основанной на вычислении компонент тензора сейсмического момента, и ее апробация на модельных экспериментах.

3. Изучение закономерностей проявления эффекта Кайзера в горных породах при их трехосном нагружении с изменением ориентации, размеров и формы эллипсоида приложенных напряжений.

4. Разработка нелинейной модели деформирования хрупкого материала при трехосном непропорциональном нагружении, описывающей ориентационный характер развития поврежденности. Идентификация и верификация модели на данных по трехосному сжатию горных пород, исследование с использованием модели ориентации микротрещиноватости в хрупком материале при его одноосном сжатии с боковым подпором.

5. Обобщение предложенной нелинейной модели деформирования хрупкого материала на случай направленного уплотнения материала. Идентификация и верификация модели на данных по циклическому трехосному непропорциональному сжатию пористых хрупких горных пород.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. На основе анализа оптических изображений поверхности деформируемых образцов установлены сценарии развития форм локализации деформации в слое водной пасты монтмориллонитовой глины при простом сдвиге и в сильвините при его прямом одноосном растяжении. В случае водной пасты обнаружены «медленные» деформационные волны, установлены закономерности их распространения и взаимодействия с разрывными структурами различного ранга.

2. Реализованы оригинальные эксперименты по циклическому трехосному сжатию песчаника. Установлены условия проявления эффекта Кайзера при изменении ориентации, формы и размера эллипсоида приложенных напряжений.

3. Разработан новый трехступенчатый алгоритм уточнения найденных и отбраковки неустойчивых решений для тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. На основе предложенного алгоритма показано, что изгиб гранита сопровождается формированием и развитием микротрещин нормального отрыва с дополнительной сдвиговой составляющей различной интенсивности.

4. Построена и верифицирована новая нелинейная реологическая модель деформирования хрупкого тела, описывающая развитие анизотропной поврежденности. Предложено обобщение модели на случай учета направленного уплотнения пористого хрупкого тела. Показано, что обобщенная модель позволяет адекватно описать направленный характер проявления эффекта Кайзера при циклическом трехосном непропорциональном сжатии песчаника.

5. На основе предложенной модели показано, что при одноосном сжатии с боковым подпором хрупкого материала оптимальным углом наклона зоны локализованной поврежденности является угол, близкий к углу Кулона-Мора. Внутри зоны оптимальными являются две ориентации микротрещин: вертикальная ориентация трещиноватости, которая не зависит от степени анизотропии исходной поврежденности, ориентация относительно направления зоны локализованной поврежденности под углом, близким к углу Кулона-Мора.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии моделей деформируемого твердого тела, направленных на учет анизотропии упругих свойств, индуцированной поврежденностью.

Полученные новые экспериментальные результаты изучения деформационного поведения горных пород при циклическом непропорциональном трехосном сжатии способствуют более глубокому пониманию условий и механизмов проявления направленного эффекта Кайзера.

Результаты изучения форм локализации деформации в горных породах и экспериментальное наблюдение «медленных» деформационных волн в модели континентальной литосферы открывают новые возможности для исследования данного класса явлений и уточнения существующих теоретических моделей.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных моделей для геомеханического моделирования горнотехнических процессов, в которых анизотропный характер уплотнения и накопления поврежденности является ключевым фактором, обуславливающим вариацию механических и прочностных свойств, анизотропию проницаемости, теплопроводности и электропроводности.

Предложенная и апробированная методика определения микромеханизмов деформирования и разрушения хрупких пород на основе восстановления компонент тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии может

быть использована как новый инструмент для контроля отдельных элементов шахтных полей при локальном геоакустическом мониторинге.

Методология и методы исследования. В теоретической части работы методологической базой диссертационной работы являются разработки отечественных и зарубежных ученых в области нелинейной механики деформируемого твердого тела и континуальной механики поврежденности. При построении моделей используются подходы механики сплошной среды, термодинамики неравновесных процессов, пороупругости и механики поврежденности. Алгоритмы реализации моделей разработаны с применением численных методов интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, решения систем нелинейных алгебраических уравнений, численных методов оптимизации.

Экспериментальные результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены с помощью современных экспериментальных методик. Для восстановления полей перемещений и деформаций на свободной поверхности лабораторных образцов или модельного материала применялся метод корреляции цифровых изображений. Физическое моделирование формирования сдвиговой зоны осуществлялось на специализированной установке «Разлом», расположенной в Институте земной коры СО РАН. Для *in situ* мониторинга развития поврежденности в испытываемых образцах использовался метод акустической эмиссии. Трехосные квазистатические и циклические испытания образцов горных пород проводились на испытательной системе трехосного независимого нагружения в лаборатории геомеханики Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН.

Положения, выносимые на защиту:

1. Одноосное растяжение сильвинита, согласно результатам анализа серии оптических изображений свободной поверхности, сопровождается локализацией деформации в форме эквидистантно расположенных неподвижных зон, между которых материал находится в недеформированном состоянии. При достижении критического уровня приложенных напряжений деформирование материала продолжается в одной из неподвижных зон в режиме с обострением.

2. Формирование сдвиговой зоны в модельном материале сопровождается генерацией и распространением «медленных» деформационных волн со скоростями на два порядка выше скорости смещения активного штампа. Развитие разрывных структур приводит к фрагментации волновых фронтов и их трансформации в неподвижные фронты локализованной деформации, оконтуривающие отдельные объемы материала.

3. Предложенный для определения механизмов источников акустической эмиссии метод, основанный на нахождении и уточнении компонент тензора сейсмического момента, позволяет изучать механизмы разрушения хрупких материалов при их квазистатическом деформировании по данным акустической эмиссии.

4. При непропорциональном трехосном нагружении песчаника эффект Кайзера наблюдается в случае неизменности ориентации и формы эллипсоида

приложенных напряжений от цикла к циклу. В противном случае проявление эффекта зависит от величины и соотношения накопленных деформаций относительного растяжения в трех ортогональных направлениях.

5. Разработанная нелинейная модель деформирования хрупкого тела с тензорным параметром поврежденности позволяет описать анизотропный характер развития поврежденности при трехосном непропорциональном сжатии материала.

6. При одноосном сжатии с боковым подпором хрупкого материала оптимальной, с точки зрения скорости диссипации энергии, ориентацией зоны локализованной деформации является наклон к оси активного сжатия под углом близким к углу Кулона-Мора. Степень близости определяется степенью анизотропии поврежденности. Внутри зоны оптимальными конфигурациями являются вертикально ориентированная трещиноватость и трещиноватость, ориентированная относительно направления зоны локализованной поврежденности под углом близким к углу Кулона-Мора.

7. Обобщение нелинейной модели деформирования хрупкого тела на случай учета тензорного уплотнения позволяет описать направленное упрочнение пористого материала, определяющее направленный характер проявления эффекта Кайзера в песчанике при его циклическом трехосном сжатии с вращением эллипсоида приложенных напряжений.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается применением современных экспериментальных методов визуализации и измерения физических величин, хорошей воспроизводимостью результатов наблюдений и измерений, подтверждается удовлетворительным соответствием результатов численного моделирования экспериментальным данным, полученным как самим автором, так и взятым из литературных источников.

Личный вклад автора. Автором или с его непосредственным участием получены все включенные в диссертацию результаты. Автор принимал непосредственное участие в формулировке задач, выполнении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации результатов, подготовке статей. В теоретической части работы автором или при его непосредственном участии получены определяющие соотношения обеих моделей, автор занимался идентификацией и верификацией моделей, осуществлял анализ и интерпретацию полученных результатов, принимал ключевое участие в подготовке статей по теме диссертации.

Работа [12] выполнена автором лично и без соавторов. В работах [7,10,11] автору принадлежит постановка задачи, автор является разработчиком большинства траекторий нагружения, регистрация акустической эмиссии и ее анализ производились непосредственно автором при участии соавтора В.А. Мубассаровой, интерпретация полученных результатов выполнена совместно с соавторами Н.И. Шевцовым, А.В. Зайцевым, Ю.Ф. Коваленко, В.И. Каревым. В работах [8,9,14] автор совместно с соавторами сформулировал постановку задачи, принимал участие в разработке экспериментальной программы, требований к метрологическому обеспечению оптических измерений, единолично вы-

полнил обработку оптических изображений, совместно с соавторами С.А. Борняковым, А.А. Тарасовой осуществил интерпретацию результатов и подготовку статей. В работах [3, 16] автору принадлежит постановка задачи, руководство и участие в проведении экспериментов, обработка экспериментальных данных выполнена автором лично, интерпретация и подготовка статей выполнены совместно с соавторами. В работе [5] автору принадлежит постановка задачи, разработка программы экспериментов, совместно с соавторами реализована экспериментальная программа, проведена интерпретация и обобщение полученных результатов. В работах [1,15] автор является идеологом способа обобщения скалярной модели, автору принадлежит постановка задачи, математические выкладки выполнены совместно с соавтором В. Ляховским, автор единолично реализовал процедуры идентификации и верификации модели, интерпретация полученных данных и подготовка статьи выполнена совместно с соавтором. В работе [6] автор принимал участие в постановке задач, численные расчеты выполнены автором единолично, интерпретация и подготовка статьи выполнены совместно с соавтором В. Ляховским. В работах [4,13] автор принимал участие в постановке задачи, экспериментальная часть работы выполнена совместно с соавтором В.А. Мубассаровой, математическая формулировка модели выполнена совместно с соавторами Е. Shalev и В. Ляховским, идентификация и верификация модели выполнена автором единолично, интерпретация и подготовка статей выполнены совместно с соавторами. В работе [2] автор принимал участие в постановке задачи, формулировке математической модели, идентификации и верификации модели, интерпретации результатов совместно с соавторами.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийских и Международных конференциях: Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2015, 2017, 2019), «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (Тольятти, 2018; Санкт-Петербург, 2021), «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Бишкек, 2017), «Триггерные эффекты в геосистемах» (Москва, 2017, 2018, 2019), «Петербургские чтения по проблемам прочности» (Санкт-Петербург, 2016), «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2017), "Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах" (Москва, 2018), «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (Южно-Сахалинск, 2019), «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (Апатиты, 2016; Пермь, 2019), «Геодинамика, геомеханика и геофизика» (п. Солонешное, 2019), «Актуальные проблемы прочности» (Екатеринбург, 2022), International conference on Rock Dynamics and Applications (Сучжоу, 2016), 12th Euro-conference on Rock Physics and Geo-Mechanics (Иерусалим, 2018), International Conference on Continental Earthquakes (Ченду, 2018), 13th EURO-Conference on Rock Physics and Geomechanics (Потсдам, 2019). Работа полностью докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (руково-

дитель – д.ф.-м.н., проф. П.В. Трусов), Института механики сплошных сред УрО РАН (руководитель – академик РАН, д.т.н., проф. В.П. Матвеевко).

Связь исследований с научными программами. Работы по тематике диссертации проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (гос. задание АААА-А19-119013090021-5), Российского научного фонда (проект 17-11-01204, 19-77-30008), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 21-55-53019_ГФЕН-а, 17-41-590148_р-а, 17-05-00720-а, 16-55-44017-Монг_а, 16-41-590779_р-а, 16-35-00349-мол_а).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, из них 16 – в ведущих научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций (в том числе 13 статей – в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus), 6 статей – в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Работа изложена на 365 страницах, содержит 144 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 564 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы диссертационного исследования, представлены положения, выносимые на защиту, описана апробация результатов и данные о структуре и объеме работы.

В первой главе представлены результаты исследований форм локализации деформации в горных породах с использованием метода корреляции цифровых изображений, выполненных на экспериментальной базе ИМСС УрО РАН (г. Пермь) и Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). Результаты первой главы опубликованы в работах [3,8,9,14,16].

В п. 1.1 приведен краткий обзор пространственно-временных форм локализации деформации в твердых телах (включая горные породы), обнаруженных в лабораторных экспериментах. Отмечается, что вопрос о вариациях пространственно-временных форм в зависимости от литотипа горной породы и условий ее нагружения остается открытым.

В п. 1.2 приведены основные сведения, методы регистрации и подходы к описанию распространения «медленных» деформационных волн в земной коре. Проведенный обзор показал, что полевые наблюдения позволяют обнаружить и изучить базовые закономерности распространения «медленных» деформационных волн. Более подробное исследование динамики распространения «медленных» волн и их взаимодействия с разномасштабными разрывными структурами должно базироваться на физическом моделировании с привлечением современных методов неразрушающего контроля.

В п. 1.3 приведены результаты исследования форм макролокализации деформации при квазистатическом одноосном прямом растяжении сильвинита с использованием метода корреляции цифровых изображений. Для реализации прямого растяжения было использовано специальное реверсивное устройство. Образцы представляли собой квадратную призму с основанием 30 мм и высотой 90 мм. Нагружение выполнялось с постоянной скоростью деформирования, равной $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Для восстановления полей перемещения и деформации на боковой поверхности нагружаемых образцов была использована цифровая оптическая система LaVision Strain Master с разрешением 1600x1200 пикселей (размер пикселя 54 мкм). Во всех экспериментах поля перемещений и деформации рассчитывались для поверхностной области образца размером 54.5 мм на 29 мм с размером подобласти 4 мм и шагом 2 мм.

Анализ эволюции распределения компонент тензора деформации на боковой поверхности образца сильвинита в процессе деформирования показал, что деформирование протекает неоднородно с самого начала нагружения. Неоднородность деформирования сильвинита проявляется в виде системы эквидистантно расположенных зон локализованной деформации (как продольной, так и поперечной), ориентированных к оси нагружения под углом около $\pm 54^\circ$ (рис. 1.1).

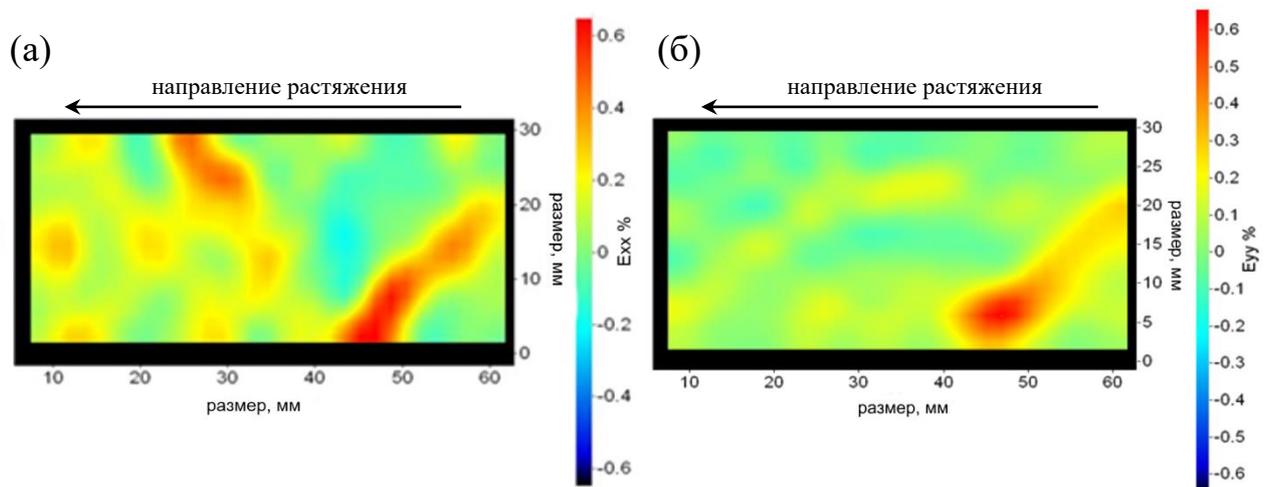


Рисунок 1.1 – Распределение продольной (а) и поперечной (б) деформации на поверхности сильвинита при общей деформации образца 0.36%

Установлено, что зоны локализованной деформации формируются с самого начала растяжения и остаются неподвижными в процессе нагружения. Области материала вне зон локализации находятся фактически в недеформированном состоянии (рис. 1.2). Средняя величина пространственного периода расположения зон локализованной деформации, оцененная для серии испытанных образцов, составляет 13.5 ± 1.1 миллиметров.

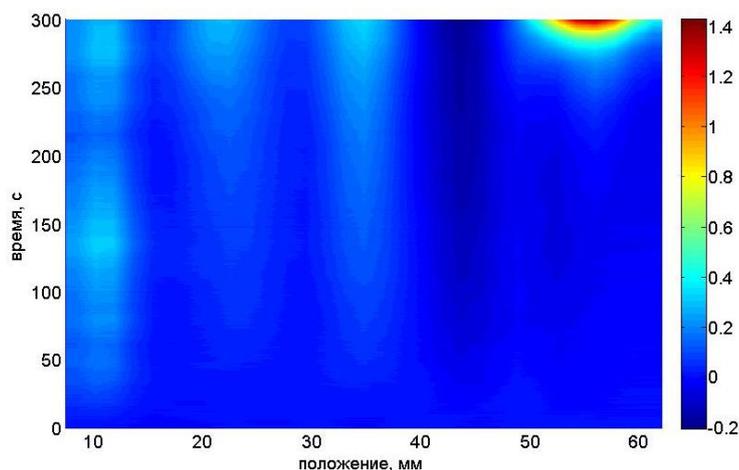


Рисунок 1.2 – Эволюция продольной деформации для средней линии образца сильвинита

Процесс деформирования в виде эквидистантно расположенных локализованных зон протекает вплоть до момента, когда напряжение в образце достигает своего максимума. В этот момент происходит смена формы макролокализации: процесс деформирования продолжается только в одной из зон локализации и заканчивается разрушением, тогда как в других зонах деформирование полностью останавливается (рис. 1.2).

В п. 1.4 приведены результаты физического моделирования процесса формирования сдвиговой зоны в модели континентальной литосферы с использованием метода корреляции цифровых изображений. Модельный материал (водная паста монтмориллонитовой глины) выбирался согласно критерию подобия, включающего коэффициенты подобия модели и натурального объекта по вязкости, плотности, размерам и характерному времени. Физическое моделирование формирования сдвиговой зоны осуществлялось на специализированной установке «Разлом». Геометрические размеры модельного слоя: длина 35 см, высота 10 см, ширина 12 см. Смещение активного штампа относительно неподвижного (пассивного) штампа осуществлялось со скоростью 10^{-5} м/с (рис. 1.3). Для фотофиксации свободной поверхности модельной среды была использована цифровая камера Basler acA2000-50gm (макс. частота съемки – 50 Гц, разрешение – 2 Мпикс).

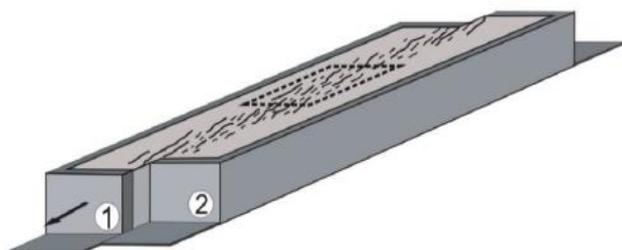


Рисунок 1.3 – Схема эксперимента: 1 – активный и 2 – пассивный штампы. Стрелка указывает направление смещения активного штампа

Предварительная обработка и непосредственно анализ оптических изображений осуществлялись в специализированном ПО StrainMaster LaVision. Для обработки была выбрана серия изображений, соответствующая первой (ранней дизъюнктивной) стадии развития сдвиговой разломной зоны. Расчет полей компонент тензора деформации осуществлялся в пределах пря-

моугольной области размером 257x106 мм. Для достаточного уровня детализации деформационных полей реализация метода корреляции цифровых изображений осуществлялась для размера подобласти 3.43x3.43 мм и шага 1.52 мм.

Установлено, что деформационный процесс в формирующейся сдвиговой зоне контролируется двумя составляющими – общим перемещением ее активного крыла под действием приложенной к модели нагрузки и периодической миграцией по зоне фронтов локализованной деформации. В процессе дефор-

мирования модельной среды локализация сдвиговой деформации происходит как на формирующихся разрывных нарушениях, так и в виде мигрирующих зон (фронтов) (рис. 1.4а). Мигрирующие фронты имеют продольную, поперечную и сдвиговую составляющие.

Формирование сдвиговой зоны происходит в три этапа. На первом этапе деформирования модельной среды наблюдается квазиоднородная деформация всего объема с миграцией единичных деформационных волн от активного штампа к пассивному (рис. 1.4а). Деформационные волны в процессе миграции не меняют свои размеры и форму пока будущая сдвиговая зона представлена мелкими разрывами. При появлении крупных разрывов вошедшая в сдвиговую зону единичная протяженная деформационная волна разделяется ими на серию отдельных фрагментов. Новообразованные фрагменты меняют направление движения и перемещаются по простиранию блоков, выделенных крупными разрывами.

По мере приближения межстадийной структурной перестройки, неподвижные фрагменты образуют систему преимущественно замкнутых округлых и эллипсовидных фронтов локализованной деформации, оконтуривающих локальные объемы модельного материала, испытывающие вращение (рис. 1.4б).

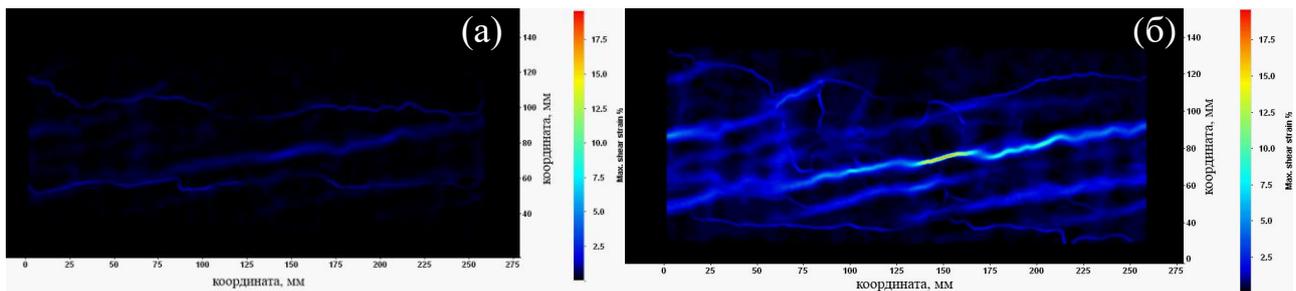


Рисунок 1.4 – Карты максимальной сдвиговой деформации $\varepsilon_{xy}^{max} = \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 / 4 + \varepsilon_{xy}^2}$ на поверхности модельной среды в момент $T = 30$ с (а) и $T = 210$ с (б)

Реперные точки, расположенные вдоль одного из сдвиговых нарушений, были использованы для оценки скоростей распространения деформационных волн. Начальный этап деформирования характеризуется отсутствием явно выраженных разрывных нарушений и повышенными скоростями распространения деформационных волн (рис. 1.5а). С течением времени наблюдается уменьшение скоростей распространения деформационных волн. Среднее значение скорости составляет 0.89 мм/с при коэффициенте вариации 37%. Скорость распространения деформационных волн на два порядка выше скорости смещения активного штампа.

Изменение скорости распространения деформационных волн в процессе формирования сдвиговой зоны проиллюстрировано на карте изменения модуля поперечных деформаций с течением времени (рис. 1.5б), построенной для выбранного вертикального профиля. В целом наблюдается уменьшение скорости деформационных волн при движении от активного штампа к пассивному. Ве-

личина модуля деформации на фронте волны постепенно растет по мере ее продвижения.

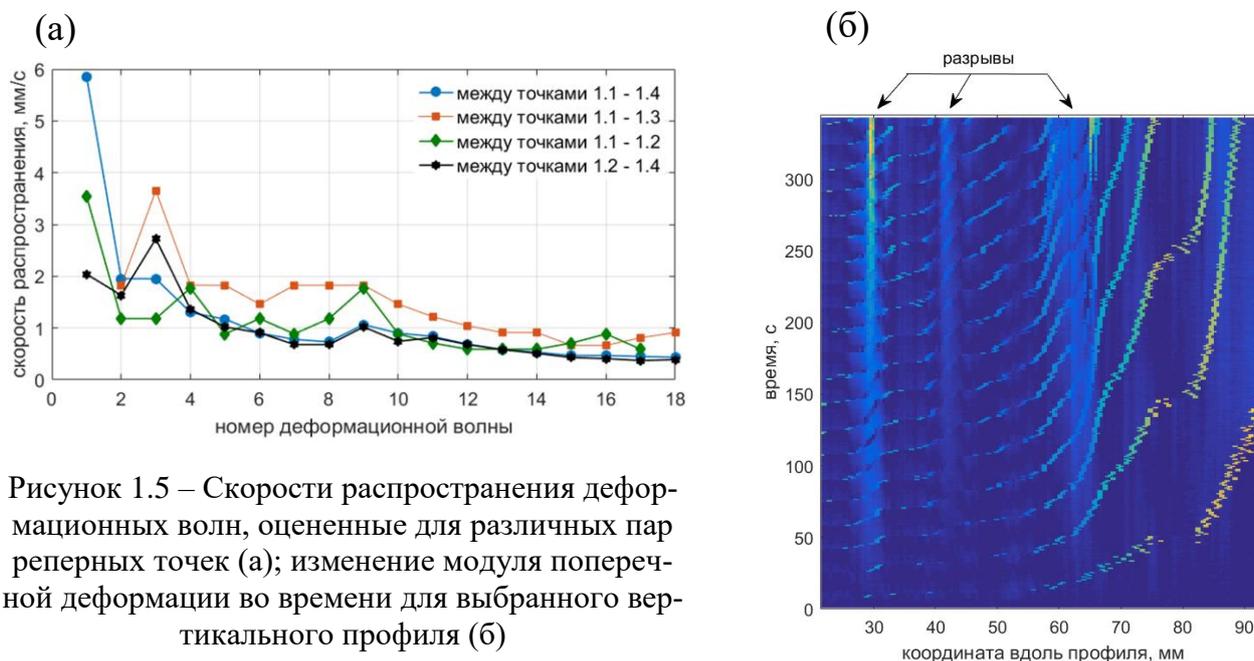


Рисунок 1.5 – Скорости распространения деформационных волн, оцененные для различных пар реперных точек (а); изменение модуля поперечной деформации во времени для выбранного вертикального профиля (б)

Во второй главе приведены результаты исследования микромеханизмов разрушения гранита при трехточечном изгибе на основе анализа тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. Результаты этой главы опубликованы в работах [5,12].

В п. 2.1 приведен обзор подходов к определению типа источника акустической эмиссии при деформировании материалов, включающих методы, базирующиеся на анализе огибающих сигналов АЭ, на спектральном анализе сигналов АЭ, кластерном анализе параметров АЭ, а также сейсмологические методы. Выполненный обзор показал, что наиболее исчерпывающую информацию об источнике позволяет получить анализ компонент тензора сейсмического момента. Однако его использование предьявляет качественно иные требования к формированию исходного каталога событий акустической эмиссии.

В п. 2.2 приведены основные понятия и базовые соотношения для тензора сейсмического момента. В приближении дальнего поля, в приближении бесконечного полупространства, равных зависимостей компонент тензора сейсмического момента от времени получено уравнение для нахождения амплитуды нормальной компоненты смещения в точке установки датчика АЭ через компоненты тензора сейсмического момента. Введена классификация источников АЭ по типу деформации, основанная на соотношения шаровой (ISO) и сдвиговой (DC) части тензора сейсмического момента. Получены соотношения, позволяющие определить направление подвижки (вектор смещения берегов) и нормаль к плоскости разрыва (трещины), через главные оси тензора сейсмического момента.

В п. 2.3 приведены результаты исследования микромеханизмов разрушения гранита при трехточечном изгибе по данным АЭ. Геометрия образцов и ме-

ста расположения датчиков акустической эмиссии представлены на рис. 2.1. Испытуемый образец устанавливался на цилиндрические опоры диаметром 24 мм, изгиб осуществлялся металлической оправкой с диаметром закругления 10 мм. Скорость перемещения верхнего захвата составляла 4 мкм/мин. Измерение прогиба образца в процессе испытания осуществлялось видео-экстензометром TRViewX240S Shimadzu (класс точности 0.5). Для непрерывной регистрации акустической эмиссии в процессе испытания была использована система Amsy-6 Vallen (Германия), укомплектованная миниатюрными датчиками М-31 (Fujisera, Япония) с рабочим частотным диапазоном 300-800 кГц. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась с порогом дискретизации 47.1 дБ и записью волновой формы каждого импульса с частотой дискретизации 10 МГц.

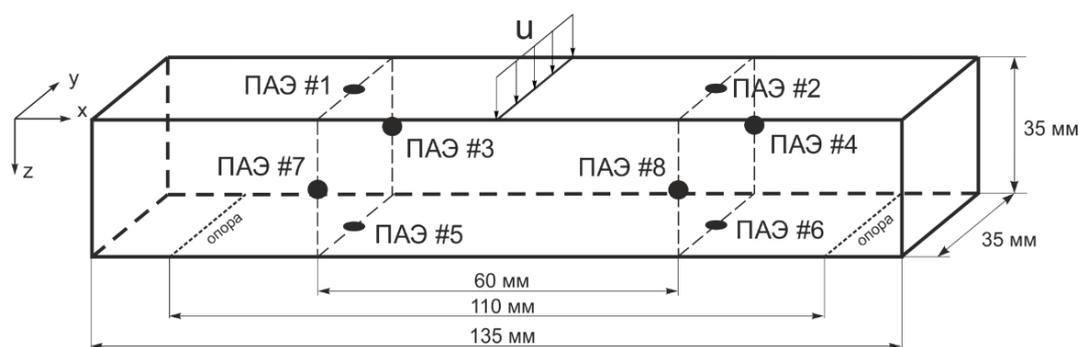


Рисунок 2.1 – Схема нагружения образца и расположение датчиков акустической эмиссии (на схеме отмечены как ПАЭ)

Для автоматического определения времени первого вступления импульсов АЭ (Р-волны) использовался классический информационный критерий Акайке.

Для выбора метода абсолютной калибровки ПАЭ проведен сравнительный анализ метода калибровки по теоретически вычисленному сигналу¹ и метода сравнения с эталонным сигналом². В результате показано, что амплитудно-частотные характеристики восстановленных передаточных функций ПАЭ имеют количественное соответствие в диапазоне частот 10 кГц – 250 кГц. Частота 250 кГц является предельной для первого метода, поэтому калибровка использованных в экспериментах ПАЭ М-31 выполнена по методу сравнения с эталонным сигналом. Решение задачи локации для сформированных наборов импульсов акустической эмиссии осуществлялось путем минимизации теоретической (для известной скоростной модели) и фактической разностей времен прихода волны на ПАЭ.

Для проверки устойчивости найденных решений механизмов событий АЭ предложен трехстадийный алгоритм. На первом, предварительном, этапе решение уточняется на основе итерационного гибридного алгоритма³. Результатом

¹ McLaskey G.C. Acoustic Emission Sensor Calibration for Absolute Source Measurements / S.D. Glaser, G.C. McLaskey // J Nondestruct Eval. – 2012. – V.31. – P. 157-168.

² Electromagnetic method of elastic wave excitation for calibration of acoustic emission sensors and apparatus / S. Lazarev, A. Mozgovoï, A. Vinogradov et al. // J. Acoustic Emission. – 2009. – V. 27. – P. 212-223.

³ Andersen L.M., A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining: Ph.D. dissertation – Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg, 2001.

реализации алгоритма являются поправочные коэффициенты для каждого ПАЭ. На втором этапе используется метод «складного» ножа, заключающийся в последовательном исключении из решения для данного события акустической эмиссии данных с одного из датчиков акустической эмиссии. Решения для тензора сейсмического события считается устойчивым, если минимум пять решений из девяти удовлетворяют условиям: углы простирания и падения обоих nodальных плоскостей в этих решениях лежат в секторе $\pm 15^\circ$ по каждому из углов; азимуты и углы погружения Р и Т-осей также лежат в секторе $\pm 15^\circ$. На третьем (заключительном) этапе находим среднее решение для найденных наборов механизмов по каждому событию акустической эмиссии.

Итоговые механизмы для событий акустической эмиссии с указанием моментной магнитуды представлены на рисунке 2.2 в виде диаграммы Хадсона⁴. В результате анализа устойчивых решений показано, что наиболее часто встречающимися источниками событий АЭ по типу разрыва являются сбросы. Оцененная моментная магнитуда M_w события АЭ варьируется в диапазоне от -5.3 до -4 (рис. 2.2), что коррелирует с оценками других исследователей. События акустической эмиссии с механизмом нормального отрыва регистрируются в

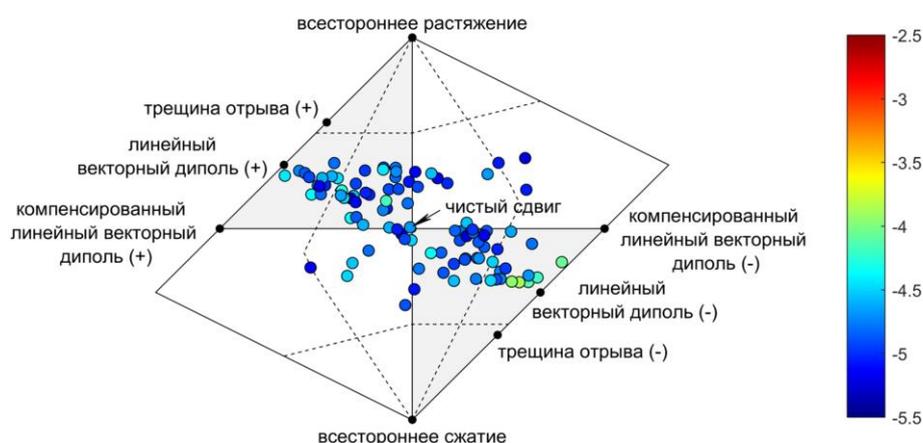


Рисунок 2.2 – Диаграмма Хадсона с устойчивыми решениями для механизмов событий АЭ (цветовая градация – величина моментной магнитуды)

начале изгиба, тогда как механизмы сдвигового типа преобладают на стадии, предшествующей разрушению образца (рис. 2.3). На этой же стадии имеют место механизмы акустической эмиссии смешанного типа с увеличением или уменьшением объема источника.

В результате анализа устойчивых решений показано, что трещины сдвига и нормального отрыва являются преобладающими (рис. 2.4), тогда как источники смешанного типа (сдвиг+отрыв, сдвиг+сжатие) не превышают 35% от общего числа событий АЭ. В целом кинематика найденных механизмов событий акустической эмиссии соответствует конфигурации приложенных к образцу нагрузок и характеризуется нормальной модой с дополнительной сдвиговой составляющей различной величины.

⁴ Hudson J. A. Source type plot for inversion of the moment tensor / J.A. Hudson, R.G. Pearce, R.M. Rogers // Journal of Geophysical Research. – 1989. – V.94. – P. 765-774.

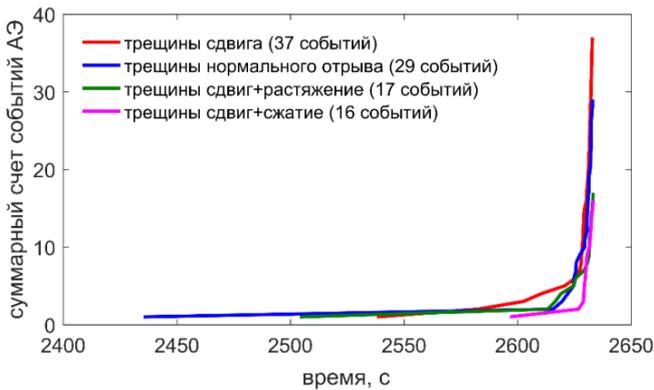


Рисунок 2.3 – Суммарный счет событий акустической эмиссии, построенный отдельно для различных типов трещин

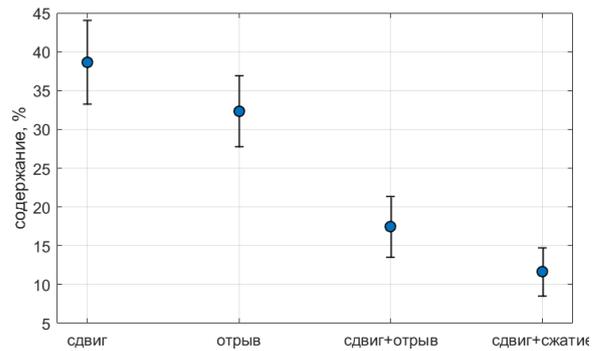


Рисунок 2.4 – Относительное количество сигналов АЭ от различных типов источников в общем количестве лоцированных сигналов

В **третьей главе** представлены результаты исследования особенностей проявления эффекта Кайзера при циклическом непропорциональном сжатии песчаника с изменением ориентации, размеров и формы эллипсоида приложенных напряжений. Результаты третьей главы опубликованы в работах [7,10,11].

В **п. 3.1** приведен литературный обзор проявления эффекта Кайзера в горных породах при различных условиях нагружения, а также теоретических представлений о механизмах этого явления.

В **п. 3.2.1** представлено описание выбранного материала, условий проведения экспериментов и полученных результатов для различных программ нагружения. Была изготовлена партия кубических образцов (размер ребра 40 мм) из полимиктового песчаника.

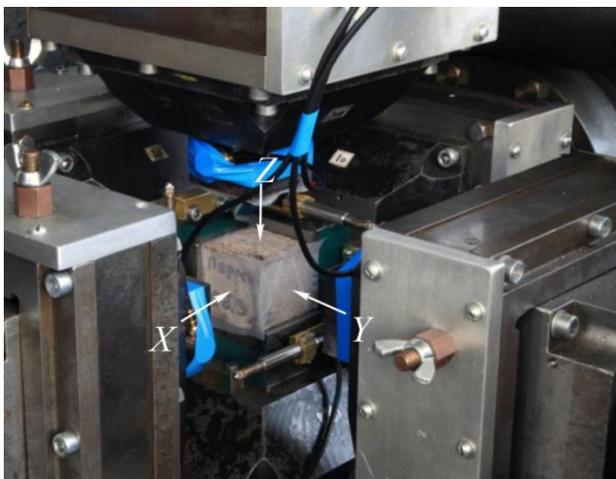


Рисунок 3.1 – Образец в ИСТНН после остановки испытания на трехосное непропорциональное сжатие в лаборатории геомеханики ИПМех РАН

Механические испытания проводились на испытательной системе трехосного независимого нагружения⁵ (ИСТНН) в лаборатории геомеханики Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН. ИСТНН позволяет осуществлять нагружения образца независимо в трех ортогональных направлениях (рис. 3.1). В процессе нагружения акустическая эмиссия регистрировалась тремя широкополосными преобразователями 2SMEG-P (Deci, США) (рабочий диапазон 200-2000 кГц), закрепленными на каждой из трех нагружающих плит. Регистрация АЭ осуществлялась с фиксированным порогом отсека по амплитуде в 38.9 дБ.

Регистрация АЭ осуществлялась с фиксированным порогом отсека по амплитуде в 38.9 дБ.

⁵ Mechanical-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media / V.I. Karev, D.M. Klimov, Yu.F. Kovalenko et al. // Mech. of Solids. – 2013. – V.48, N.4. – P. 357-363.

В п. 3.2.2 представлены результаты циклического всестороннего сжатия

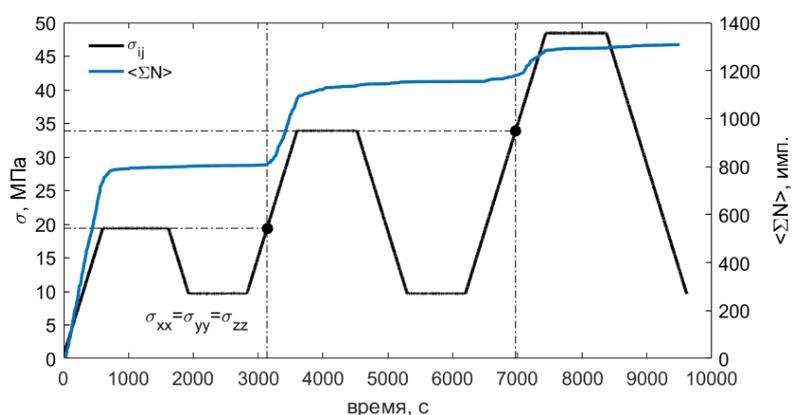


Рисунок 3.2 – Программа циклического всестороннего сжатия песчаника и средний суммарный счет АЭ (точки — моменты активации акустической эмиссии)

песчаника с постоянной скоростью нагрузки/разгрузки. В первом цикле максимальная нагрузка составила 19.5 МПа, во втором – 34 МПа и в третьем – 48.5 МПа. После каждого цикла образец разгружался до напряжения 9.75 МПа (рис. 3.2).

Показано, что в случае всестороннего сжатия (во втором и третьем циклах) наблюдается эффект Кайзера строго при превышении максимума

напряжения предыдущего цикла. При этом от цикла к циклу наблюдается уменьшение количества новых зарегистрированных импульсов, что указывает на уменьшение количества источников акустической эмиссии, реализующих эффект Кайзера.

В п. 3.2.3 и 3.2.4 приведены результаты испытаний песчаника по 6-ти и 9-ти цикловым программам трехосного сжатия с изменением формы, размеров и ориентации эллипсоида напряжений Ламе. В обоих случаях предварительно образец подвергался всестороннему сжатию до 10 МПа, после чего следовали три пары (6-ти цикловая программа) или три тройки (9-ти цикловая программа) циклов «активное нагружение – разгрузка». В первом цикле нагружения каждой пары/тройки осуществлялось сжатие в одном/двух направлениях при удерживании напряжений постоянными

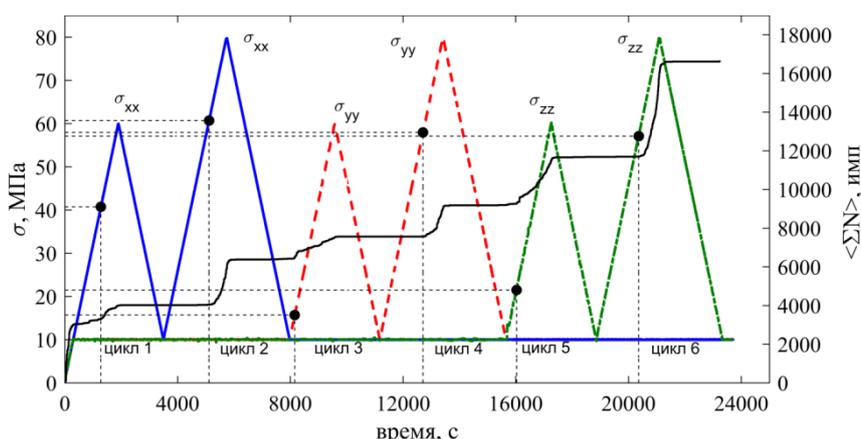


Рисунок 3.3 – Программа нагружения песчаника и средний суммарный счет акустической эмиссии (точки — моменты активации акустической эмиссии)

напряжений постоянными (10 МПа) в других направлениях (рис. 3.3, 3.4). Далее осуществлялось повторное нагружение в этом же направлении (6-ти цикловая программа) или последовательно в каждом из двух направлений первого цикла (9-ти цикловая программа) до напряжений, превышающих напряжение первого

цикла на 20 МПа с удерживанием напряжений постоянными по другим направлениям на уровне 10 МПа. По окончании каждой пары/тройки циклов изменялось направление/направления активного сжатия (ориентация эллипсоида Ламе).

Проведенные испытания песчаника по 6-ти цикловой программе

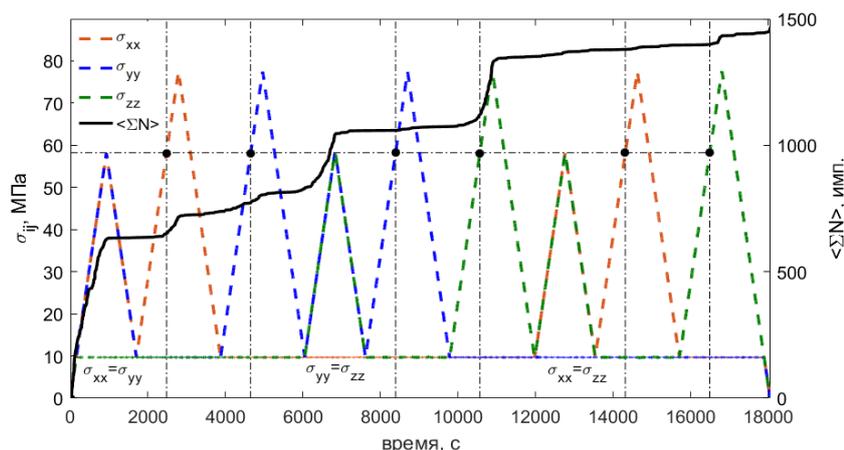


Рисунок 3.4 – Траектории нагружения 9-ти циклового эксперимента и суммарный счет АЭ

позволили показать отсутствие “памяти” материала при смене направления главного напряжения (вращении эллипсоида заданных напряжений) и наличие “памяти” при повторном деформировании материала в заданном направлении. Это доказывает, что эффект Кайзера — ориентационный эффект памяти состояния ансамбля трещиноподоб-

ных дефектов относительно направления действия максимального сжимающего напряжения.

В результате реализации 9-и цикловой программы циклических испытаний песчаника установлено, что эффект Кайзера, характеризующийся резким ростом активности АЭ при достижении максимального уровня напряжений предыдущего цикла, наблюдается избирательно в каждом из трех блоков нагружения. На основе анализа изменений компонент тензора деформации в каждом из трех блоков показано, что эффект Кайзера выполняется в том случае, когда в направлении действия минимального главного напряжения наблюдается превышение ранее достигнутого уровня деформаций относительно растяжения. На выполнение этого условия влияет неизменность ориентации эллипсоида приложенных напряжений и уровень накопленных деформаций в трех ортогональных направлениях. Установлено, что проявление эффекта памяти повреждений определяется не столько фактом раскрытия существующих “благоприятно” ориентированных микротрещин, сколько дискретным ростом (увеличением длины) существующих и появлением новых микротрещин.

В п. 3.2.5 представлены результаты циклических испытаний песчаника с изменяющимся уровнем девиаторных напряжений. Образец песчаника предварительно подвергается всестороннему сжатию до напряжения 50 МПа. Далее следовали четыре цикла нагрузка-разгрузка, отличающиеся уровнем девиатора напряжений (интенсивности касательных напряжений), действующих на образец при неизменном среднем напряжении. Траектории нагружения в каждом цикле в пространстве Хейга-Вестергаарда задаются углом Лоде θ_σ (рис. 3.5а).

Первые три цикла активного нагружения – разгрузки характеризовались увеличением угла Лоде с -30° до 19° (рис. 3.5б) при последовательном увеличении уровня девиатора напряжений. Четвертый цикл характеризуется тем же уровнем девиатора напряжений, но большей величиной максимального сжимающего напряжения. Скорость нагружения и разгрузки для каждого цикла и по

каждому направлению задавалась индивидуально для обеспечения априори заданной длительности цикла.

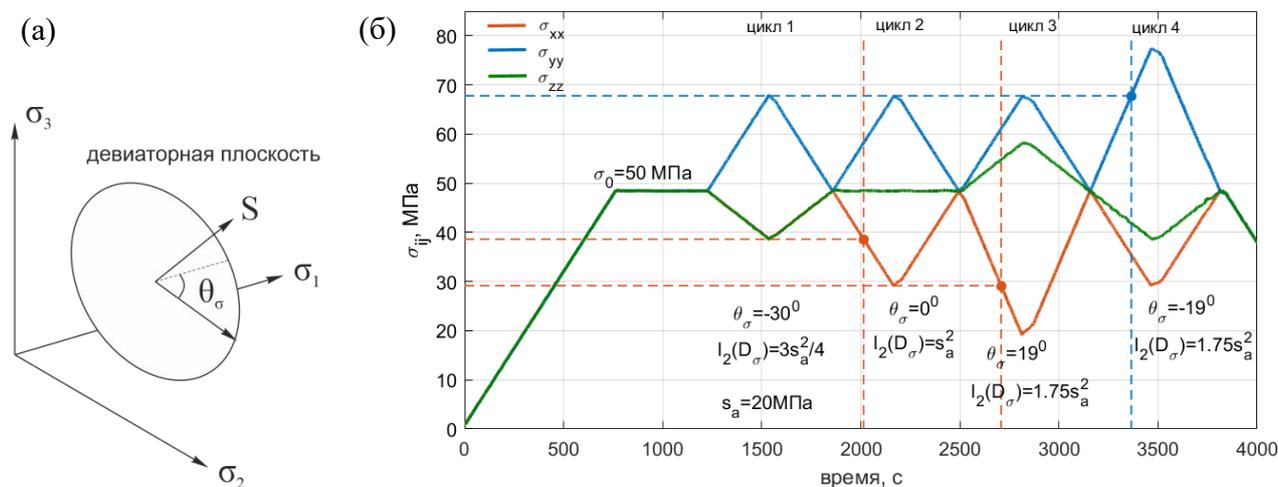


Рисунок 3.5 — Определение траектории нагружения в пространстве Хейга-Вестергаарда (а) и зависимости компонент напряжений от времени (б)

В результате проведенных испытаний и анализа деформационных кривых и данных АЭ показано, что на проявление эффекта Кайзера не влияет уровень интенсивности касательных напряжений, действующих на образец. Эффект Кайзера наблюдается также в случае превышения ранее достигнутого уровня деформаций относительного растяжения.

Полученные в экспериментальной части работы результаты были использованы для идентификации и верификации модели деформирования хрупкого пористого материала, этапам построения которой посвящены четвертая и пятая главы.

В **четвертой главе** представлена формулировка нелинейной реологической модели деформирования хрупкого тела с тензорной поврежденностью, являющейся обобщением неклассической нелинейной упругой модели деформирования хрупкого материала предложенной академиком РАН В.П. Мясниковым⁶, и развитой впоследствии в работах его учеников⁷. Результаты четвертой главы представлены в работах [1,6,15].

В **п. 4.1** приведен краткий обзор особенностей деформирования структурно-неоднородных хрупких материалов и теоретических подходов к их описанию. Отмечено, что развиваемые теоретические подходы сфокусированы на отдельных аспектах деформирования и накопления повреждений в хрупких материалах, подчеркнута актуальность развития обобщенных моделей.

В **п. 4.2** приведены основные этапы построения модели деформирования и накопления повреждений в хрупком материале. Вводится параметр повре-

⁶ Мясников В.П. Основные общие соотношения изотропно-упругой разносопротивляющейся среды / В.П. Мясников, А.И. Олейников // Докл. АН СССР. – 1992. – Т. 332, № 1. – С. 57-60.

⁷ Lyakhovsky V. Distributed damage, faulting, and friction / V. Lyakhovsky, Y. Ben-Zion, A. Agnon // J. Geophys. Res. – 1997b. – V.102, N.B12. – P. 27635-27649.

жденности в виде симметричного тензора второго ранга Ω_{ij} , главные направления которого задают направления ортотропии материала, а главные значения определяют изменение эффективной площади поперечных сечений, перпендикулярных к каждой из осей ортотропии. С использованием гипотезы эквивалентности энергии поврежденного и фиктивного неповрежденного состояния вводится симметризованный тензор фиктивной деформации в виде

$$\varepsilon_{ij}^{(\Omega)} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{ik} \Omega_{kj} + \varepsilon_{jk} \Omega_{ki}). \quad (4.1)$$

Энергия упругой деформации анизотропного поврежденного материала может быть представлена в виде

$$W(\tilde{\varepsilon}, \tilde{\Omega}) = \left[\frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} \right] + \left[\lambda_1 \left(I_1^{(\Omega)} \right)^2 + \mu_1 I_2^{(\Omega)} \right] - \gamma I_1^{(\Omega)} \sqrt{I_2^{(\Omega)}}, \quad (4.2)$$

где C_{ijkl} – тензор модулей упругости исходного неповрежденного материала, λ_1, μ_1 – параметры, характеризующие деградацию упругих модулей при росте поврежденности, γ – дополнительный модуль, ответственный за нелинейность при накоплении повреждений, $I_1^{(\Omega)} = \varepsilon_{ij}^{(\Omega)} \delta_{ij}$, $I_2^{(\Omega)} = \varepsilon_{ij}^{(\Omega)} \varepsilon_{ij}^{(\Omega)}$ – инварианты тензора фиктивной деформации.

Первое слагаемое в соотношении (4.2) представляет собой энергию деформирования исходного неповрежденного материала, второе слагаемое – энергию деформации материала с анизотропией, индуцированной поврежденностью, а третье слагаемое отвечает за нелинейность и разномодульность деформационного отклика материала, зависимость его свойств от вида напряженно-деформированного состояния. В случае $\tilde{\Omega} = 0$ выражение (4.2) соответствует классическому линейно-упругому потенциалу, при $\Omega_{ij} = \Omega \delta_{ij}$ – нелинейной модели В.П. Мясникова со скалярным параметром поврежденности.

Выражение для компонент тензора напряжений Коши в общем случае имеет вид

$$\sigma_{lm} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{lm}} = [\lambda_0 I_1 \delta_{lm} + 2\mu_0 \varepsilon_{lm}] - \gamma \frac{\partial I_1^{(\Omega)}}{\partial \varepsilon_{lm}} \sqrt{I_2^{(\Omega)}} + \left(\mu_1 - \frac{\gamma}{2} \frac{I_1^{(\Omega)}}{\sqrt{I_2^{(\Omega)}}} \right) \frac{\partial I_2^{(\Omega)}}{\partial \varepsilon_{lm}}, \quad (4.3)$$

где $\frac{\partial I_1^{(\Omega)}}{\partial \varepsilon_{lm}} = \Omega_{lm}$, $\frac{\partial I_2^{(\Omega)}}{\partial \varepsilon_{lm}} = \frac{1}{2} (\Omega_{li} \varepsilon_{ik} \Omega_{km} + \Omega_{mi} \varepsilon_{ik} \Omega_{kl}) + \frac{1}{2} (\Omega_{lj} \varepsilon_{mk} \Omega_{kj} + \Omega_{mj} \varepsilon_{lk} \Omega_{kj})$.

Необходимо отметить, что приложение нагрузки к исходно изотропному материалу, сопровождающееся появлением и развитием микротрещин, приводит, согласно предложенным соотношениям, к анизотропии (в общем случае ортотропии) его упругих свойств.

На основе принципов линейной термодинамики необратимых процессов и гипотезы об отсутствии взаимного влияния поврежденности Ω_{lm} и необратимой неупругой деформации ε_{ij}^{ir} , связанной с фрикционным

скольжением берегов микротрещин и зерен, получены кинетические уравнения для этих параметров:

$$\frac{d\Omega_{lm}}{dt} = \frac{L}{\sqrt{\Omega_{kn}\Omega_{kn}}}\gamma \left[\frac{\partial I_1^{(\Omega)}}{\partial \Omega_{lm}} \sqrt{I_2^{(\Omega)}} - \left(\frac{\mu_1}{\gamma} - \frac{1}{2} \frac{I_1^{(\Omega)}}{\sqrt{I_2^{(\Omega)}}} \right) \frac{\partial I_2^{(\Omega)}}{\partial \Omega_{lm}} \right], \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial I_1^{(\Omega)}}{\partial \Omega_{lm}} = \varepsilon_{lm}; \quad \frac{\partial I_2^{(\Omega)}}{\partial \Omega_{lm}} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{li}\Omega_{ik}\varepsilon_{km} + \varepsilon_{mi}\Omega_{ik}\varepsilon_{kl}) + \frac{1}{2} (\varepsilon_{lj}\Omega_{mk}\varepsilon_{kj} + \varepsilon_{mj}\Omega_{lk}\varepsilon_{kj}),$$

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^{ir}}{dt} = \begin{cases} C_\Omega \left(\frac{d\Omega_{in}\Omega_{jm}}{dt} \right) \tau_{nm}, & \frac{d\Omega_{ik}\Omega_{jk}}{dt} > 0 \\ 0, & \frac{d\Omega_{ik}\Omega_{jk}}{dt} \leq 0 \end{cases}, \quad (4.5)$$

где L , C_Ω – кинетические коэффициенты, τ_{nm} – компоненты девиатора напряжения. Обратная к $C_\Omega \left(\frac{d\Omega_{ik}\Omega_{jk}}{dt} \right)$ величина имеет смысл «трещинной» вязкости, на несколько порядков меньшей, чем динамическая вязкость материала.

В общем случае скорость изменения компонент тензора поврежденностей определяется коротационной производной Зарембы-Яуманна.

Устойчивость материала в процессе деформирования определяется двумя типами условий: условиями выпуклости упругого потенциала, условиями эллиптичности уравнения движения. Условия выпуклости являются более сильными.

П. 4.3 посвящен определению необходимых и достаточных условий локальной выпуклости потенциала (4.2). В отличие от линейных моделей континуальной механики поврежденности максимально допустимые значения поврежденности в данной модели определяются величиной параметра вида напряженно-деформированного состояния $\xi = \frac{I_1}{\sqrt{I_2}}$. Определены условия локальной выпуклости потенциала (4.2) в случае изотропной $\Omega_{ij} = \Omega\delta_{ij}$ и анизотропной поврежденности. Рассмотрены частные случаи трансверсально-изотропной трещиноватой среды. Установлены интервалы изменения параметра ξ , для которых условия строгой локальной выпуклости для изотропного случая дают минорантную оценку максимально допустимого уровня поврежденности в анизотропном случае.

П. 4.4 посвящен описанию процедуры и результатов идентификации и верификации модели. В **п. 4.4.1** приведено описание выбранного песчаника Darley Dale и условий проведения экспериментов по его трехосному традиционному и истинному сжатию. Выбранный песчаник имеет напластования и является в исходном состоянии трансверсально-изотропным материалом, что было учтено при формулировке определяющих соотношений. Используемые для идентификации экспериментальные данные включают кривые «напряжение-деформация» для продольной и поперечной деформации, зависимость суммарного сдвига от времени, временные вариации скоростей продольных волн параллельно и перпендикулярно напластованию.

В п. 4.4.2 приведены результаты идентификации параметров модели по данным традиционного трехосного сжатия песчаника Darley Dale. Процедура идентификации параметров модели проводилась в три этапа. На первом этапе методом прямого поиска (метод Хука-Дживса) решалась задача минимизации невязки численных и экспериментальных данных для упругого участка кривых деформирования. На втором этапе решалась аналогичная задача минимизации уже для всего интервала активного нагружения. В результате были определены зависимости главных поврежденностей от времени и величина коэффициента C_{Ω} . Дифференцирование найденных временных зависимостей главных поврежденностей на третьем этапе позволило оценить характер изменения кинетического коэффициента L с ростом (по модулю) среднего напряжения и предложить соответствующую аппроксимацию.

Найденные в результате реализации процедуры идентификации материальные параметры и начальные поврежденности представлены в таблице 4.1. Модель с тензорной поврежденностью, определяемая соотношениями (4.3)-(4.5), позволила качественно и количественно описать экспериментальные кривые традиционного трехосного сжатия песчаника Darley Dale (погрешность не превышает 7.5%). Полученный в результате второго этапа идентификации модели рост главных поврежденностей Ω_2, Ω_3 с течением времени хорошо согласуется с наблюдаемым в эксперименте ростом суммарного счета акустической эмиссии.

Таблица 4.1 Параметры, найденные в результате идентификации модели по данным традиционного трехосного сжатия песчаника Darley Dale

λ_{\parallel} , ГПа	λ_{\perp} , ГПа	λ_M , ГПа	μ_{\parallel} , ГПа	μ_{\perp} , ГПа	γ , ГПа	ξ_0
1.2	1.6	1.58	3.1	4.13	4.36	-0.94
C_{Ω} , МПа ⁻¹	Ω_1^0 , %	Ω_2^0 , %	Ω_3^0 , %			
$0.33 \cdot 10^{-4}$	0.1	0.9	0.9			

В результате реализации третьего этапа идентификации параметров модели была предложена экспоненциальная зависимость кинетического коэффициента от среднего напряжения.

В п. 4.4.3 найденные параметры модели были использованы для верификации модели по данным истинного трехосного сжатия песчаника Darley Dale. Модель предсказывает рост только поврежденности Ω_3 (синяя линия, рис. 4.2), с неизменными поврежденностями Ω_1 и Ω_2 , что согласуется с изменением суммарного счета АЭ. Расчетные кривые «напряжение-деформация» для всех трех компонент имеют хорошее соответствие с экспериментальными кривыми (рис. 4.1) (погрешность не превышает 5%).

Рост поврежденности только в одном из трех ортогональных направлений, совпадающих с направлением действия главных напряжений, отражается на характере изменений скоростей продольных волн в этих направлениях. Модель предсказывает неизменность скоростей V_{p11} и V_{p22} в направлениях активного сжатия и уменьшение скорости V_{p33} на 3% из-за роста поврежденности Ω_3 (рис.

4.3), что качественно и количественно согласуется с экспериментальными данными.

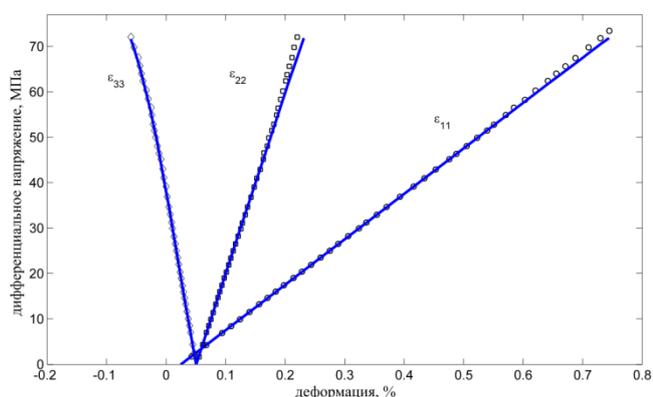


Рисунок 4.1 – Сравнение экспериментальных (символы) и расчетных кривых (линии) «напряжение-деформация»

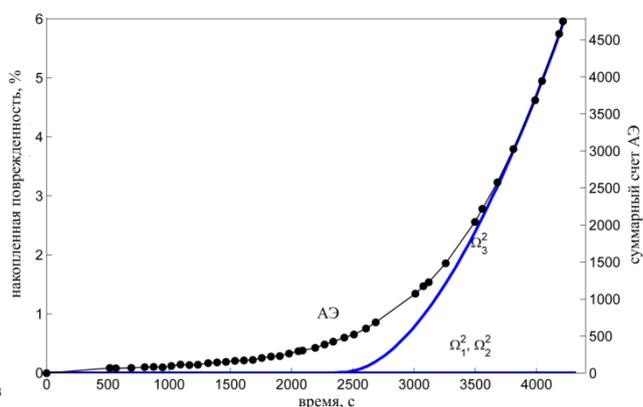


Рисунок 4.2 – Совмещенные временные зависимости накопленной поврежденности и суммарного счета акустической эмиссии

В п. 4.5 приведены результаты использования разработанной модели для

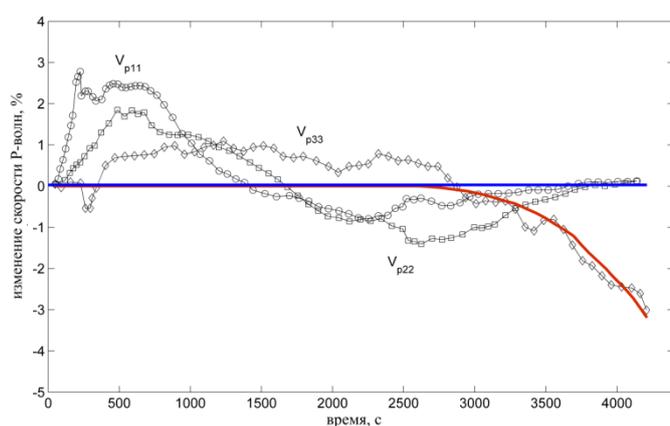


Рисунок 4.3 – Экспериментальное (символы) и расчетное (линии) изменение скоростей продольных волн в трех ортогональных направлениях с течением времени

решения двух задач об ориентации микротрещиноватости в хрупком твердом теле при его традиционном трехосном сжатии. Первая задача посвящена оценке степени разориентировки исходной трещиноватости и скорости роста вторичной трещиноватости. Показано, что в случае исходной горизонтальной ориентированной (рис. 4.4а) и вертикально ориентированной (рис. 4.4б) микротрещиноватости при одноосном сжатии с боковым подпором, в материале будут формироваться микротрещины отрыва, ориентированные параллельно направлению действия максимального сжимающего напряжения.

Решения при различном наклоне исходной микротрещиноватости (серый цвет – исходные микротрещины, красный цвет – вновь образующиеся микротрещины)

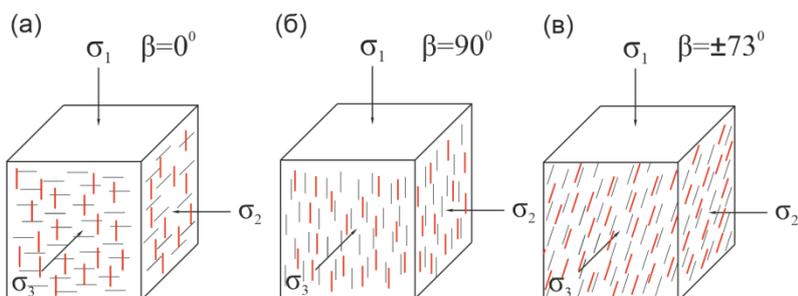


Рисунок 4.4 – Геометрическая интерпретация найденных решений при различном наклоне исходной микротрещиноватости (серый цвет – исходные микротрещины, красный цвет – вновь образующиеся микротрещины)

В случае исходной трещиноватости, ориентированной под углом $\pm 73^\circ$ к направлению активного сжатия, вновь образующиеся микротрещины будут иметь наибольший угол отклонения от направления действия максимального сжимающего напряжения σ_1 равный 20° (рис. 4.4в).

Вторая задача посвящена определению оптимального с точки зрения максимума диссипации энергии угла наклона зоны локализованной поврежденности и ориентации трещиноватости внутри нее. Согласно критерию Кулона-Мора при одноосном сжатии с боковым подпором разрушение происходит по площадке, ориентированной под углом $\pm \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$ (угол Кулона-Мора) к оси активного сжатия. В результате решения задачи установлено, что оптимальным углом наклона зоны локализованной поврежденности является угол, близкий к углу Кулона-Мора. Степень близости определяется уровнем анизотропии исходной поврежденности. Внутри зоны локализации поврежденности микротрещины, ориентированные параллельно (A1) или перпендикулярно (A2) к направлению зоны, закрываются и залечиваются, не приводя к изменению объема материала (рис. 4.5). Внутри зоны оптимальными являются две ориентации микротрещин: вертикальная ориентация трещиноватости B1, которая не зависит от степени анизотропии исходной поврежденности, ориентация B2 относительно направления зоны локализованной поврежденности под углом, близким к углу Кулона-Мора (рис. 4.5).

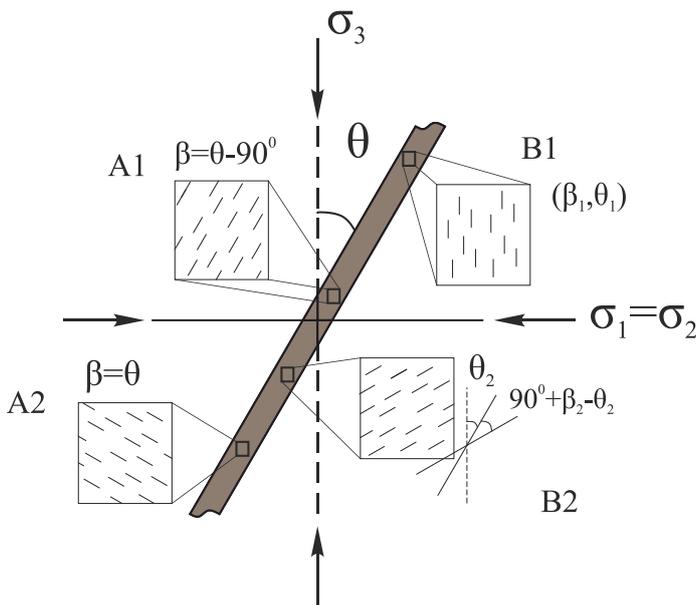


Рисунок 4.5 – Оптимальные (B1, B2) и нежелательные (A1, A2) ориентации микротрещиноватости внутри зоны локализованного разрушения с точки зрения скорости роста средней поврежденности при традиционном трехосном сжатии

Ориентация B1 соответствует механизму образования магистральных трещин в горных породах при традиционном трехосном сжатии⁸, предложенному по результатам обобщения большего количества экспериментальных наблюдений. Оптимальная ориентация B2 описывает возможность появления вторичных микротрещин, аналогичных R-сколам в модели Риделя⁹.

В пятой главе представлено обобщение нелинейной реологической модели деформирования хрупкого материала с тензорным параметром поврежденности на случай учета направленного уплотнения пористого пространства. Результаты пятой главы представлены в работах [2,4,13].

⁸ Reches Z. Nucleation and growth of faults in brittle rocks / Z. Reches, D. Lockner // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 1994. – V.99, N.B9. – P. 18159-18173.

⁹ Hills E.S. Elements of Structural Geology / E.S. Hills. – London: Methuen, 1972. – 502 p.

В п.5.1 приведен краткий обзор особенностей деформирования хрупких пористых материалов. Акцентировано внимание на снижении эффективной прочности таких материалов при высоких уровнях среднего напряжения, приводящем к замыканию предельной поверхности в области больших давлений.

В п.5.2 для описания направленного уплотнения пористого материала предложено обобщение закона Ати на случай учета компонент девиатора эффективных напряжений. Введено понятие тензора уплотнения, след которого отражает текущую пористость материала. Предложено кинетическое уравнение для компонент тензора уплотнения, описывающее экспоненциальную релаксацию деформации уплотнения до равновесного значения при неизменном приложенном напряжении. На основе экспериментальных данных по циклическому сжатию песчаника, представленных в третьей главе, проведена идентификация и верификация модели тензорного уплотнения.

В п. 5.3 представлены основные этапы построения модели деформирования хрупкого пористого материала, являющейся обобщением пороупругой нелинейной модели¹⁰ со скалярными параметрами поврежденности и пористости. Свободная энергия Гельмгольца деформированного поврежденного пористого материала может быть записана как

$$F = \left[\frac{\lambda_0}{2} I_1^2 + \mu_0 I_2 \right] + \gamma \left[\xi_0 I_2^{(\Omega)} - I_1^{(\Omega)} \sqrt{I_2^{(\Omega)}} \right] + \quad (5.1)$$

$$+ \frac{1}{2} M [\beta I_1 - \zeta + \Phi_{ij} \delta_{ij}]^2 + Ch \frac{\gamma}{2} \Omega_{ij} \Omega_{ij}$$

где M, β – модуль и коэффициент Био, соответственно, ζ – степень насыщенности флюидом, Φ_{ij} – тензор уплотнения, Ch – коэффициент когезии.

Первые два слагаемых соответствует потенциалу ранее предложенной модели (4.2), третье слагаемое – пороупругое слагаемое Био, четвертое – описывает когезионную силу, препятствующую сдвигу при низком уровне среднего напряжения. Выражение для компонент тензора напряжений Коши в этом случае имеет вид

$$\sigma_{ij} = [\lambda_0 I_1 \delta_{ij} + 2\mu_0 \varepsilon_{ij}] - \gamma \frac{\partial I_1^{(\Omega)}}{\partial \varepsilon_{ij}} \sqrt{I_2^{(\Omega)}} + \gamma \left(\xi_0 - \frac{1}{2} \frac{I_1^{(\Omega)}}{\sqrt{I_2^{(\Omega)}}} \right) \frac{\partial I_2^{(\Omega)}}{\partial \varepsilon_{ij}} + \quad (5.2)$$

$$+ \beta M (\beta I_1 - \zeta + \Phi_{lm} \delta_{lm}) \delta_{ij}.$$

В предположении аддитивности упругой деформации, необратимой деформации, связанной с микросдвигами, и деформации уплотнения, а также отсутствия взаимного влияния поврежденности Ω_{ij} , уплотнения и необратимой деформации получены кинетические уравнения для каждого из физических механизмов деформирования:

¹⁰ Hamiel Y. Coupled evolution of damage and porosity in poroelastic media: theory and applications to deformation of porous rocks / Y. Hamiel, V. Lyakhovsky, A. Agnon // Geophysical Journal International. – 2004. – V.156, N.3. – P. 701-713.

$$\frac{d\Omega_{ij}}{dt} = KD_1 \exp[-D_2 \Omega_{ij}] (-I_1)^{N+1} \sqrt{I_2} + \frac{L\gamma}{\sqrt{\Omega_{kn}\Omega_{kn}}} \left[\varepsilon_{ij} \sqrt{I_2^{(\Omega)}} - \left(\xi_0 - \frac{I_1^{(\Omega)}}{2\sqrt{I_2^{(\Omega)}}} \right) \frac{\partial I_2^{(\Omega)}}{\partial \Omega_{ij}} - Ch\Omega_{ij} \right], \quad (5.3)$$

$$\frac{d\Phi_{ij}^{in}}{dt} = D_1 \gamma \exp[-D_2 \Omega_{ij}] (-I_1)^N \sqrt{I_2} \left[\varepsilon_{ij} \sqrt{I_2^{(\Omega)}} - \left(\xi_0 - \frac{I_1^{(\Omega)}}{2\sqrt{I_2^{(\Omega)}}} \right) \frac{\partial I_2^{(\Omega)}}{\partial \Omega_{ij}} - Ch\Omega_{ij} \right] + A \left(\Phi_{ij}^{(eq)} - \Phi_{ij} \right) P^{eff} + C_V \left(\frac{d\Omega_{in}\Omega_{jm}}{dt} \right) \tau_{nm}^{eff}, \quad (5.4)$$

$$\Phi_{ij}^{(eq)} = \Phi_{ij}^{(0)} - B_0 \left[\delta_{ij} - \exp \left(-\frac{P^{eff}}{B_1} \delta_{ij} + \frac{\tau_{ij}^{eff}}{B_2} \right) \right], \quad (5.5)$$

где D_1, N – параметры, определяющие форму предельной поверхности в пространстве деформаций, D_2 – параметр, определяющий степень упрочнения материала при росте поврежденности, $\Phi_{ij}^{in} = (\Phi_{ij} - \Phi_{ij}^{(0)}) + \varepsilon_{ij}^{ir}$ – необратимая неупругая деформация, складывающаяся из деформации ε_{ij}^{ir} , связанной с микросдвигами, и деформации уплотнения $(\Phi_{ij} - \Phi_{ij}^{(0)})$, $\Phi_{ij}^{(0)}$ – исходное уплотнение материала $(\frac{1}{3} tr(\Phi_{ij}^{(0)}))$ – исходная пористость материала), $A = A_1 - A_2 H(\Phi_{ij}^{(eq)} - \Phi_{ij})$ – параметр, определяющий скорость уплотнения/разуплотнения материала, P^{eff} – эффективное давление, τ_{nm}^{eff} – девиатор эффективных напряжений, B_0, B_1, B_2 – параметры обобщенного закона Ати.

Соотношения (5.2)-(5.5) вместе с аддитивным законом для деформации представляют собой замкнутую систему уравнений, описывающую процесс деградации свойств и дефектной структуры хрупкого пористого материала при его деформировании.

В п. 5.4 представлены результаты идентификации и верификации модели деформирования хрупкого пористого материала по экспериментальным данным циклического традиционного сжатия песчаника Darley Dale с вращением эллипсоида приложенных напряжений. В приближении исходного изотропного состояния ($\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \sqrt{\alpha_0}$) песчаника определены параметры модели (Таблица 5.1). Показано, что нелинейная пороупругая модель с тензорными поврежденностью и уплотнением позволяет удовлетворительно описать не только ветви нагрузки в каждом цикле, но и ветви разгрузки.

Найденные параметры были использованы для моделирования 6-циклового программы непропорционального сжатия песчаника Darley Dale (рис. 5.1a) в трех ортогональных направлениях. Программа нагружения состояла из трех пар циклов. В каждой паре активное нагружение осуществлялось в выбранном направлении с удержанием напряжения, постоянного по двух другим

ортогональным направлениям с увеличением максимального дифференциального напряжения во втором цикле блока.

Таблица 5.1 Параметры, найденные в результате идентификации модели по данным циклического трехосного сжатия песчаника Darley Dale

λ , ГПа	μ , ГПа	γ , ГПа	ξ_0	α_0 , %	B_0 , %	B_1 , МПа
5.0	7.0	10	-0.1	1.5	0.5	20
B_2 , МПа	C_Ω , (МПа с) ⁻¹	A_1 , (МПа с) ⁻¹	A_2 , (МПа с) ⁻¹	$K \cdot D_1$, с ⁻¹	D_2	L , (МПа с) ⁻¹
15	0.1	10^{-5}	$7.5 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^3$	30	7

Полученная кривая изменения накопленной средней поврежденности от времени качественно повторяет кривую суммарного счета акустической эмиссии (рис. 5.1б). В первой паре циклов наблюдается рост поперечных компонент тензора поврежденности с одинаковой скоростью (рис. 5.1в). В двух следующих парах циклов рост поперечных компонент происходит с различными скоростями ввиду направленного упрочнения материала и анизотропного поврежденного состояния материала. Разработанная математическая модель деформирования хрупкого пористого материала позволяет описать направленную природу эффекта Кайзера: его проявление во

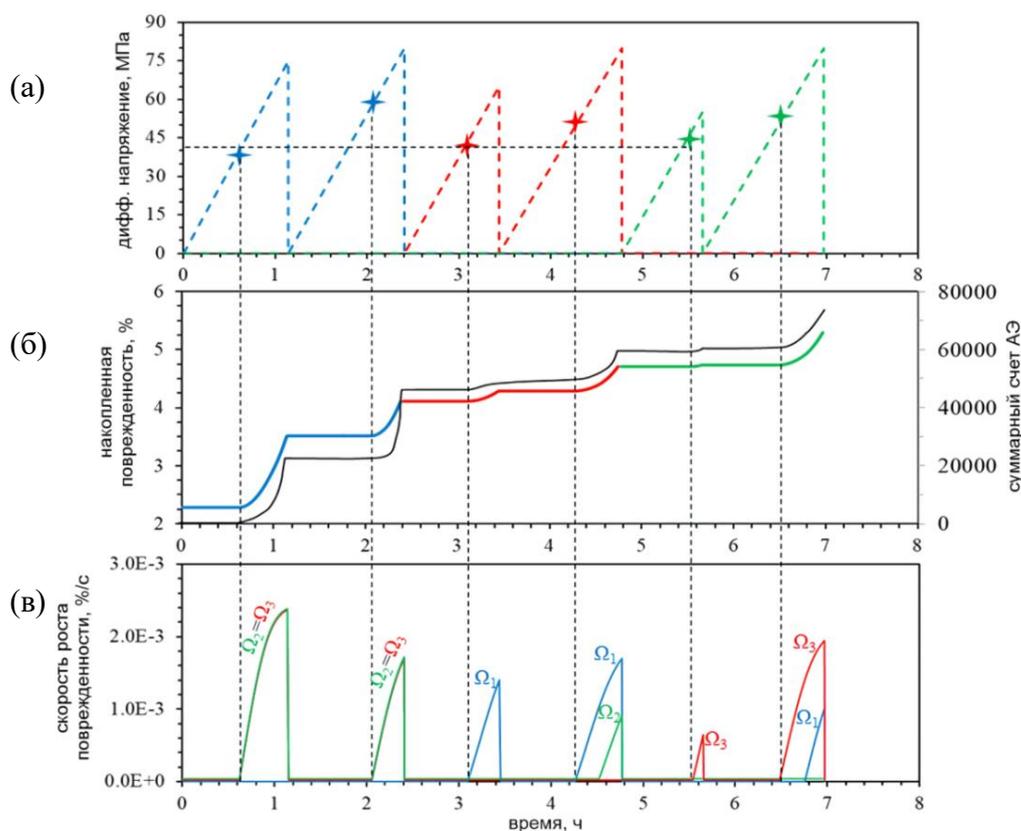


Рисунок 5.1 – Сопоставление экспериментальных данных и расчетных результатов: (а) траектории нагружения (маркер – момент появления АЭ); (б) накопленная средняя поврежденность (цветная кривая) и суммарный счет АЭ (черная кривая); (в) скорость роста компонент тензора поврежденности

втором цикле каждой из трех пар циклов при неизменности направления максимального главного напряжения, его отсутствие при вращении эллипсоида приложенных напряжений.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Экспериментально исследованы формы локализации деформации при одноосном прямом растяжении сильвинита. Установлено, что процесс деформирования реализуется в виде двух последовательных форм пространственно-временной макролокализации: системы эквидистантных стационарных очагов локализованной деформации и одиночной стационарной диссипативной локализованной структуры.

2. Экспериментально исследована пространственно-временная динамика деформаций в процессе формирования сдвиговой зоны в слое водной пасты монтмориллонитовой глины. Установлено, что деформационный процесс обусловлен двумя составляющими – общим перемещением активного штампа и периодической миграцией по зоне локализованных фронтов деформации – «медленных» деформационных волн. Показано, что процесс формирования сдвиговой зоны сопровождается генерацией и распространением по зоне сдвига межразломных «медленных» деформационных волн, их последующей трансформацией во внутриразломные волны при развитии разрывных нарушений.

3. Проведена программная реализация алгоритма восстановления компонент тензора сейсмического момента и предложен оригинальный 3-ступенчатый алгоритм уточнения механизмов источников АЭ. Проведена апробация алгоритмов на данных АЭ, зарегистрированных при трехточечном изгибе гранита. В результате показано, что при изгибе гранита преобладают сдвиговые трещины и трещины нормального отрыва.

4. Экспериментально исследованы особенности проявления эффекта Кайзера при трехосном непропорциональном сжатии песчаника. Показано выполнение эффекта Кайзера при циклическом всестороннем сжатии песчаника. Установлено, что активизация акустической эмиссии при уровне приложенного напряжения, соответствующего максимальному напряжению предыдущего цикла, наблюдается в том случае, когда повторное нагружение осуществляется без изменения ориентации и формы эллипсоида заданных напряжений. Установлено, что в случае изменения формы эллипсоида напряжений Ламе проявление эффекта памяти зависит от величины и соотношения накопленных деформаций относительного растяжения в трех ортогональных направлениях. Показано, что на проявление эффекта Кайзера не влияет уровень интенсивности касательных напряжений при неизменном уровне средних напряжений в образце.

5. Разработана нелинейная реологическая модель деформирования хрупкого тела с тензорным параметром поврежденности. В общем виде получены условия локальной выпуклости упругого потенциала, обеспечивающие единственность решения статической задачи теории упругости. На основе экспериментальных данных по традиционному и трехосному сжатию песчаника Darley

Dale проведена успешная идентификация и верификация разработанной модели. Показано, что оптимальным углом наклона зоны локализованной поврежденности является угол, близкий к углу Кулона-Мора. Установлено, что внутри зоны оптимальными являются две ориентации микротрещин: вертикальная ориентация трещиноватости, которая не зависит от степени анизотропии исходной поврежденности, а также ориентация относительно направления зоны локализованной поврежденности под углом, близким к углу Кулона-Мора.

6. Предложена модель тензорного уплотнения, являющаяся обобщением закона Ати. Проведена ее идентификация и верификация на данных по циклическому трехосному сжатию песчаника.

7. Разработана нелинейная пороупругая модель деформирования хрупкого пористого материала с тензорными параметрами поврежденности и уплотнения. Особенностью разработанной модели является сегрегированное описание эволюции предельной поверхности отдельно для каждого из главных направлений тензора деформации. На основе экспериментальных данных по циклическому трехосному сжатию песчаника Darley Dale проведена идентификация и верификация предложенной модели.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Pantelev I.**, Lyakhovsky V., Browning J., Meredith P.G., Healy D., Mitchell T.M. Non-linear anisotropic damage rheology model: Theory and experimental verification // **European Journal of Mechanics – A/Solids**. – 2021. – Vol.85. – P. 104085. (Q1)
2. Lyakhovsky V., **Pantelev 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 rock // **Geophysical Journal International**. – 2022. – Vo. 230. – P. 179-201. (Q1)
3. **Pantelev I.**, Plekhov O., Pankov I., Evseev A., Naimark O., Asanov V. Experimental investigation of the spatio-temporal localization of deformation and damage in sylvinitic specimens under uniaxial tension // **Engineering Fracture Mechanics**. – 2014. – Vol. 129. – P. 38-44. (Q1)
4. Lyakhovsky V., Shalev E., **Pantelev I.**, Mubassarova V. Compaction, strain, and stress anisotropy in porous rocks // **Geomechanics and Geophysics for Geoenvironment and Geo-Resources**. – 2022. – Vo. 8. – 8.
5. **Pantelev I.**, Saveleva N., Prokhorov A., Vshivkov A. A comparison of two methods for absolute calibration of acoustic emission sensors // **AIP Conference Proceedings**. – 2018. – С. 040071.
6. **Пантелеев И.А.**, Ляховский В.А. Ориентация трещиноватости в хрупком твердом теле при традиционном трехосном сжатии // **Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела**. – 2022. – № 5. – С. 70-92.
7. **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 // **Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки**. – 2020. – Т. 495. – С. 63-67.

8. Борняков С.А., **Пантелеев И.А.**, Тарасова А.А. Динамика внутриразломных деформационных волн (по результатам физического моделирования) // **Доклады Академии наук.** – 2016. – Т. 471, № 6. – С. 722-724.
9. Борняков С.А., **Пантелеев И.А.** Сегментационный механизм периодической активизации разлома (по результатам физического моделирования) // **Доклады академии наук.** – 2018. – Т. 482, №1. – Р. 1178-1181.
10. **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 неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // **Физическая мезомеханика.** – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 56-63.
11. **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 // **Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.** – 2020. – № 3. – С. 47-55.
12. **Пантелеев И.А.** Анализ тензора сейсмического момента акустической эмиссии: микромеханизмы разрушения гранита при трехточечном изгибе // **Акустический журнал.** – 2020. – Т. 66, № 6. – С. 654-668.
13. **Пантелеев И.А.**, Ляховский В., Мубассарова В.А., Карев В.И., Шевцов Н.И., Шалев Э. Тензорная компакция пористых пород: теория и экспериментальная верификация // **Записки Горного института.** – 2022. – Т. 254. – С. 1-11.
14. Борняков С.А., **Пантелеев И.А.**, Тарасова А.А. Дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне: результаты физического моделирования // **Геодинамика и тектонофизика.** – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 289-302.
15. **Пантелеев И.А.**, Ляховский В. О выпуклости потенциала модели нелинейной упругой среды с тензорным параметром поврежденности // **Вестник ПНИПУ. Механика.** – 2022. – № 1. – С. 89-101.
16. **Пантелеев И.А.**, Плехов О.А., Наймарк О.Б., Евсеев А.В., Паньков И.Л., Асанов В.А. Особенности локализации деформации при растяжении силвинита // **Вестник ПНИПУ. Механика.** – 2015. – № 2. – С. 127–138.