

На правах рукописи



**Надежкин Михаил Владимирович**

**МЕДЛЕННЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
ПРИ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД  
И ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН и ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент  
Баранникова Светлана Александровна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Арефьев Константин Петрович  
доктор технических наук, профессор  
Целлермаер Владимир Яковлевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Институт горного дела СО РАН  
630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54

Защита состоится 7 декабря 2011 г. в 14 ч 00 мин на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.02 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан 2 ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Коровкин М.В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Необходимость исследований поведения горных пород при нагружении продиктована широким спектром теоретических и практических задач, возникающих при геомеханическом анализе состояния подработанного массива. В геомеханике требуется знание не только механических свойств горных пород, но и особенностей их деформации, которые могут быть использованы для оценки напряженного состояния и разрушения (*Е.И. Шемякин, С.В. Гольдин, Н.А. Цытович, В.М. Жигалкин*). При этом следует признать, что закономерности деформирования и разрушения горных пород изучены далеко не в полной мере.

Определяющие эти закономерности вопросы взаимодействия дефектов кристаллической структуры с полями различной природы (силовыми, радиационными, электрическими, магнитными) являются предметом современной физики конденсированного состояния (*А.А. Воробьев, Е.К. Завадовская, И.Я. Мелик-Гайказян, А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, Л.Б. Зуев, Ю.И. Головин*). Анализ основных направлений исследований и существующих подходов к проблеме деформации твердых тел показывает, что идеи о неоднородности и локализации фактически присущи физической теории пластичности и прочности во всех ее вариантах. Локализация пластической деформации проявляется на всех масштабных и структурных уровнях процесса в виде полос и пачек скольжения, дислокационных субструктур (ячейки, полосовые структуры, фрагменты), фронтов пластической деформации, полос сброса, пространственно-временных осцилляций пластической деформации и т.п.

В ИФПМ СО РАН при использовании метода спекл-фотографии установлены главные закономерности процессов макроскопической локализации деформации твердых тел при нагружении. В большинстве случаев картины распределения зон локализации деформации упорядочены в пространстве и во времени, а тип локализации определяется законом пластического течения (деформационной диаграммой материала). В настоящее время предложена автоволновая модель формирования упорядоченных макромасштабных картин локализации в металлах (*Л.Б. Зуев*). Однако в выполненных ранее работах проблема макроскопической локализации пластической деформации изучалась главным образом на металлических ГЦК, ОЦК и ГПУ моно- и поликристаллах при растяжении. Поэтому всегда остается возможность альтернативного объяснения указанных особенностей эволюции макролокализации деформации. В связи с этим для прямого экспериментального подтверждения автоволновой природы пластического течения **актуальными** являются исследования макролокализации деформации в щелочно-галоидных кристаллах, на которых традиционно изучаются механизмы пластического течения (*Дж.Д. Гилман, В.З. Бенгус, Б.И. Смирнов*). Это обусловило интерес к иссле-

дованиям деформационного поведения пластичных щелочно-галоидных кристаллов, поскольку их механические свойства и структура подробно изучены. В то же время важна информация о характере деформирования горных пород в зависимости от действующих в массиве напряжений и от накопленных неупругих деформаций. Это обстоятельство обусловило интерес к исследованиям характера неоднородности деформации квазипластичных горных пород.

**Цель настоящей работы** состоит в развитии автоволновой модели локализации деформации для описания деформационных процессов в горных породах и щелочно-галоидных кристаллах.

Для достижения цели необходимо решить следующие **частные задачи**:

1. Исследовать картины локализации деформации и установить их количественные характеристики при сжатии образцов горных пород, в частности:

- сильвинита ( $\text{NaCl} + \text{KCl}$ ), деформирующегося дислокационным скольжением,
- мрамора ( $\text{CaCO}_3$ ), деформирующегося двойникованием,
- песчаника ( $\text{SiO}_2$ ), деформирующегося за счет зернограницных процессов, используя автоматические системы анализа спекл-фотографий и электронных спекл-изображений.

2. Исследовать пространственные распределения компонент тензора пластической дисторсии в щелочно-галоидных кристаллах ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{LiF}$ ) и установить взаимосвязь картин распределений локальных деформаций (спекл-фотография) и двулучепреломления (фотоупругость) со стадийностью их кривых упрочнения.

3. Определить параметры пространственно-временных распределений компонент тензора дисторсии в процессе нагружения сжатием исследуемых горных пород и щелочно-галоидных кристаллов.

4. Установить общность или различие автоволновых характеристик эволюции макролокализации пластического течения в щелочно-галоидных кристаллах с данными, полученными ранее для ГЦК металлических монокристаллов.

**Научная новизна результатов состоит в том, что**

– исследованы картины макроскопической локализации деформации при сжатии горных пород (песчаника, мрамора и сильвинита), а также щелочно-галоидных кристаллов ( $\text{LiF}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ), которые были главными экспериментальными объектами при создании физической теории пластичности, и определены основные типы и параметры локализации деформации горных пород и щелочно-галоидных кристаллов методом двухэкспозиционной спекл-фотографии и электронных спекл-изображений;

– установлен автоволновой характер локализации деформации при сжатии неметаллических материалов — горных пород (песчаника, мрамора и

сильвинита), а также щелочно-галоидных кристаллов. Скорости очагов локализации деформации на линейных стадиях в щелочно-галоидных кристаллах и горных породах (сильвините) удовлетворяют универсальной обратно пропорциональной зависимости скоростей движения автоволн локализованной деформации от  $\theta/G$  на стадии линейного упрочнения, которая была получена ранее для металлических ГЦК, ОЦК и ГПУ моно- и поликристаллов, для которых механизмом пластической деформации, как и для щелочно-галоидных кристаллов, является дислокационное скольжение;

- в лабораторных условиях наблюдалось распространение автоволн локализованной деформации в образцах из горных пород со скоростями, близкими к наблюдаемым в горных пластах после землетрясений и горных ударов так называемым «медленным движениям» ( $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$  м/с = 1–10 км/год);

- установлено однозначное соответствие картин локализации пластического течения и двулучепреломления при сжатии щелочно-галоидных кристаллов, доказывающее, что зоны локализованной пластической деформации представляют собой совокупность сдвигов по плоскостям скольжения кристаллов;

- установлено существование инвариантного для упругой и пластической деформаций щелочно-галоидных кристаллов произведения макроскопических параметров локализации пластического течения ( $\lambda$  — длина волны,  $V_{aw}$  — скорость распространения) и микроскопических параметров кристаллической решетки деформируемых твердых тел ( $b$  — модуль вектора Бюргера,  $V_{\perp}$  — скорость упругих поперечных волн).

**Научная ценность работы** заключается в том, что комплексное исследование локализации деформации сжатия горных пород (сильвинита, мрамора и песчаника) и щелочно-галоидных кристаллов подтвердило справедливость об обнаружении нового типа волн, связанных с процессами самоорганизации в деформируемых средах и возникающих при квазистатической деформации. Ранее такие волны уже наблюдались в металлических материалах, и с учетом новых данных автоволновой характер деформации приобретает универсальный смысл для деформационных процессов твердых тел. Полученные в работе данные о макроскопической локализации деформации показали, что динамика процессов деформации в щелочно-галоидных кристаллах и в горной породе, состоящей из кристаллов с ионной связью, не отличается принципиально от динамики таких процессов в металлических материалах. Обнаружение медленных волновых процессов пластически деформируемых соляных горных пород и ионных кристаллов должно учитываться при интерпретации геологических явлений: формировании сбросов, разломов, складок и т.п.

**Практическая значимость работы.** Результаты о развитии деформации пород и локализации деформации в них были использованы ООО «Проект-гидроуголь-Н» при выполнении расчетов горного давления для выбора оптимальных вариантов крепления горных выработок в условиях ОАО «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского» ОАО УК «Прокопьевскуголь». Закономерности локализации деформации горных пород (мрамора, песчаника и сильвинита) и щелочно-галоидных кристаллов (KCl, NaCl и LiF) реализованы в научной деятельности: при установлении механизмов пластической деформации и разрушения твердых тел в научной лаборатории «Физические основы прочности и пластичности» Тамбовского государственного университета; при исследовании поведения конструкций при сложных комплексных воздействиях различной природы (силовые, климатические, технологические) для разработки новых железобетонных и каменных конструкций зданий и сооружений в Томском государственном архитектурно-строительном университете. Экспериментальная установка, опробованная в работе, внедрена в учебный процесс Томского государственного университета и используется студентами физико-технического факультета при изучении курсов «Основы физики прочности» и «Экспериментальная механика». Результаты работы, полученные с участием автора, использованы в 2010 году для аттестации установки ALMEG-TV, разработанной и изготовленной в ИФПМ СО РАН по программе «Импортозамещение» СО РАН для Института физико-технических проблем Севера СО РАН (г. Якутск), а также могут быть применены при разработке механо-физических основ разрушения горных пород и новых конструкций высокоэффективных породоразрушающих инструментов для горнодобывающей промышленности Крайнего Севера в Институте физико-технических проблем Севера СО РАН.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Картины локализации пластической деформации при сжатии горных пород (песчаника, мрамора и сильвинита) и щелочно-галоидных кристаллов имеют автоволновой характер.
2. При одноосном сжатии образцов из горных пород в лабораторных условиях генерируются автоволны локализованной деформации, соответствующие «медленным движениям», наблюдавшимся ранее только в естественных условиях после землетрясений и горных ударов.
3. Зоны локализации пластической деформации в щелочно-галоидных кристаллах представляют собой пачки сдвигов по плоскостям скольжения кристаллов. Автоволновые картины локализованного пластического течения и их количественные характеристики определяются сменой стадий процесса деформации щелочно-галоидных кристаллов при сжатии.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается комплексным подходом к решению поставленных задач и использованием апробированных

методов и методик исследования, применением статистических методов обработки экспериментальных результатов, анализом литературных данных и согласованием полученных результатов с данными других авторов.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены на Региональной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике (Владивосток, 2006); XIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ'2007» (Томск, 2007); III–VI Всероссийских конференциях молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2007–2010); V конференции молодых ученых СО РАН, посвященной М.А. Лаврентьеву (Новосибирск, 2007); Международной школе-семинаре «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения» (Томск, 2008); 48 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Тольятти, 2009); Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Кемерово, 2009); XIX Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2010); Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010); V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011), а также на семинаре лабораторий Института горного дела СО РАН.

Работа выполнена в рамках комплексного проекта Сибирского отделения РАН № 01.2.007 04645 «Экспериментальная и теоретическая разработка автоволновой модели локализованной пластической деформации структурно-неоднородных материалов на мезо- и макромасштабных уровнях и ее приложений к определению критических состояний и оценке прочности, износостойкости и долговечности материалов и конструкций» (2007–2009 гг.) и проекта программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 11.21 «Разработка модели пластического течения тел со структурой на основе многоуровневого подхода и данных о макро- и микроскопических механизмах деформации и разрушения» (2009–2011 гг.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18-ти печатных работах, в том числе в 4-х статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Личный вклад** автора состоит в участии в постановке задач исследования, планировании и выполнении экспериментов, в анализе результатов экспериментальных исследований. Все результаты, представленные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа общим объемом 224 страницы состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов, приложения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 96 рисунков, 11 таблиц, библиографический список включает 213 наименований.

## Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность, научная новизна результатов и практическая значимость работы, определена цель исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Представлена структура диссертации.

**Первая глава** «Основные понятия о локализации деформации» имеет обзорный характер: в ней рассмотрены основные экспериментальные и теоретические работы, посвященные основным закономерностям деформирования горных пород, механизмам и кристаллографическим особенностям пластической деформации щелочно-галоидных кристаллов. Приводятся результаты исследований сотрудников лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН об эволюции картин макролокализации деформации, определяющейся стадийностью деформационных кривых. В этих условиях важно установить наличие и связь между видом картин макролокализации деформации и особенностями деформационных кривых при сжатии в неметаллических материалах. В конце первой главы на основе проведенного анализа литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** «Материалы и методики исследований» содержит описание использованных методов и обоснование выбора материалов исследования. В соответствии с поставленными задачами в работе проведены механические испытания образцов при комнатной температуре по схеме одноосного сжатия на универсальных машинах Instron-1185 и LFM-125 (фирма Walter + Bai AG). Установки были дополнены автоматизированным лазерным измерительным комплексом для анализа спекл-фотографий и электронных спекл-изображений при изучении эволюции макролокализации деформации, а также поляризационно-оптическим методом анализа напряжений.

Комплексные исследования характера неоднородности деформации выполнены на образцах песчаника ( $\text{SiO}_2$ ), мрамора ( $\text{CaCO}_3$ ) и пестрого сильвинита (агломерат ГЦК-кристаллов  $\text{NaCl} + \text{KCl}$  с размером кристаллитов 1–4 мм). В работе также использованы щелочно-галоидные кристаллы  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  и  $\text{LiF}$ , выращенные методом Киропулоса, с пределом текучести при сжатии  $\sigma_T = 1.7 \pm 0.6$  МПа и деформацией при разрушении  $\delta = 9 \pm 0.8$  % для  $\text{NaCl}$ , для кристаллов  $\text{KCl}$   $\sigma_T = 7.4 \pm 0.6$  МПа,  $\delta = 18 \pm 0.7$  % и соответственно для  $\text{LiF}$   $\sigma_T = 4.5 \pm 1.3$  МПа,  $\delta = 22.7 \pm 0.4$  %. Образцы песчаника, мрамора и сильвинита размерами  $25 \times 12 \times 10$  мм сжимались вдоль длинной оси образца (ось  $x$ ) на испытательной машине при скорости перемещения подвижного захвата  $1.7 \cdot 10^{-6}$  м/с. Образцы щелочно-галоидных кристаллов размерами  $30 \times 20 \times 15$  мм ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  и  $\text{LiF}$ ) выкалывались из монокристаллических буль по плоскостям спайности  $\{100\}$  и деформировались сжатием вдоль направления  $[001]$  со скоростью  $3.3 \cdot 10^{-6}$  м/с.



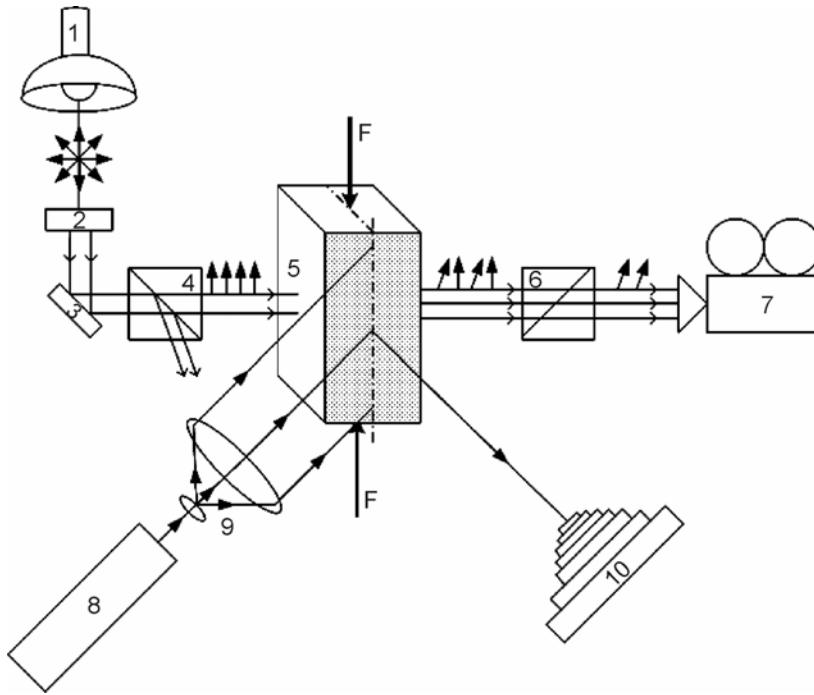


Рис. 1. Схема совместной регистрации картин двулучепреломления методом фотоупругости и картин локализации деформации методом двухэкспозиционной спекл-фотографии в деформируемом образце: 1 — источник света; 2 — матовое стекло; 3 — зеркало; 4 — поляризатор; 5 — образец; 6 — анализатор; 7 — видеокамера; 8 — лазер; 9 — коллиматор; 10 — фотокамера

Одновременно с записью диаграммы сжатия с начала нагружения и до полного разрушения образца методом двухэкспозиционной спекл-фотографии последовательно регистрировались картины локализации деформации и методом фотоупругости — картины двулучепреломления, характеризующие изменение действующих систем скольжения на грани (100) (рис. 1).

В третьей главе «Закономерности макролокализации деформации горных пород при сжатии» изложены экспериментальные данные об эволюции макроскопической локализации деформации при сжатии образцов горных пород, песчаника, мрамора и сильвинита. На кривых нагружения  $\sigma(\varepsilon)$  наблюдаются участки с резким падением напряжений, соответствующие появлению микротрещин в образцах. Деформирование завершается хрупким разрушением при общей деформации  $\delta = 1.5\text{--}3\%$ . Пример картины локализации деформации в образцах песчаника и мрамора с использованием автоматизированного комплекса ALMEC-TV представлен на рис. 2, где пунктирными линиями и цифрами обозначены границы фронтов деформации по мере их появления при сжатии образцов. С целью выяснения влияния скорости нагружения  $V_n$  на скорости движения фронтов локализованной деформации  $V_\phi$  в экспериментах на образцах мрамора и песчаника скорости  $V_n$  изменялись на два порядка. Установлено, что скорости движения  $V_\phi$  в образцах пластично-хрупких горных пород оказались на порядок (в 20 раз) выше скорости  $V_n$ .

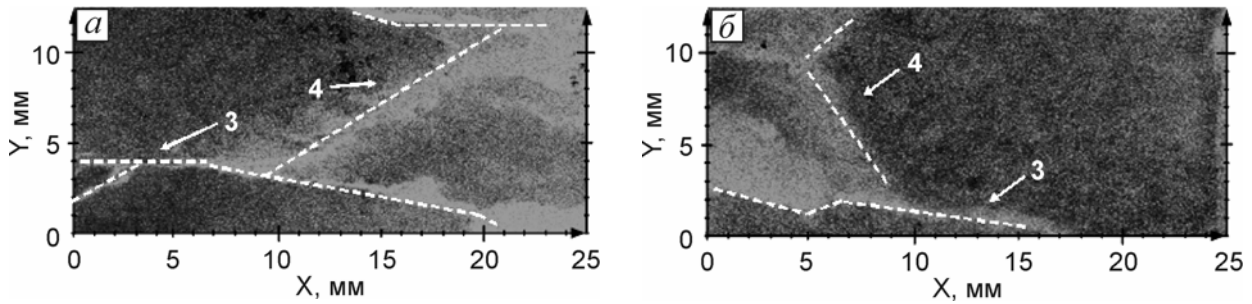


Рис. 2. Картина локализации деформации в образце песчаника (а) и мрамора (б) при  $\varepsilon_{\text{tot}} = 1.7\%$  (частота съемки — 387 мс, разрешение — 30.2 мкм/пикс.)

Из распределений компонент локальных деформаций  $\varepsilon_{xx}$  на регистрируемой поверхности образцов, полученных с помощью метода спекл-фотографии, при сжатии песчаника, мрамора и сильвинита следует, что в горных породах деформация с самого начала нагружения распределена по объему неоднородно, т.е. локализована в зонах макроскопического масштаба, в то время как другие объемы при этом же приросте деформации практически не деформируются.

В образцах песчаника и мрамора расстояние между зонами локализации деформации составило  $\sim 4 \pm 1$  мм. Особенностью поведения зон локализованной деформации в виде распределений  $\varepsilon_{xx}$  явилось их перемещение по образцу на линейных участках ( $\sigma \sim \varepsilon$ ) с ростом общей деформации. Поскольку при сжатии с постоянной скоростью  $\varepsilon \sim t$ , то, определяя положение очага локализации  $X$  по длине образца в ходе деформации, по наклону графика  $X-t$  можно оценить скорость перемещения зон локализации, которая составила  $\sim 3.0 \cdot 10^{-5}$  м/с в песчанике, и  $\sim 4.2 \cdot 10^{-5}$  м/с — в мраморе. Исследование локализации пластической деформации песчаника и мрамора на «пилообразных» участках кривых сжатия было невозможно из-за растрескивания образцов.

Процесс деформирования образцов квазипластичного сильвинита завершается хрупким разрушением при общей деформации  $\varepsilon \approx 3\%$ . Анализ картин локализации деформации (распределений компонент  $\varepsilon_{xx}$  тензора пластической дисторсии) в этом случае показал, что с самого начала сжатия деформация локализована в одной зоне, распределенной по всей ширине образца (рис. 3). Особенностью поведения этой зоны локализованной деформации в виде распределений локальных деформаций  $\varepsilon_{xx}$  явилось ее перемещение по образцу на стадии линейного деформационного упрочнения с ростом общей деформации от 0.2 до 0.95 % с постоянной скоростью  $\sim 2.8 \cdot 10^{-5}$  м/с. Дальнейшее исследование характера локализации пластической деформации в сильвините оказалось невозможным из-за растрескивания образцов.

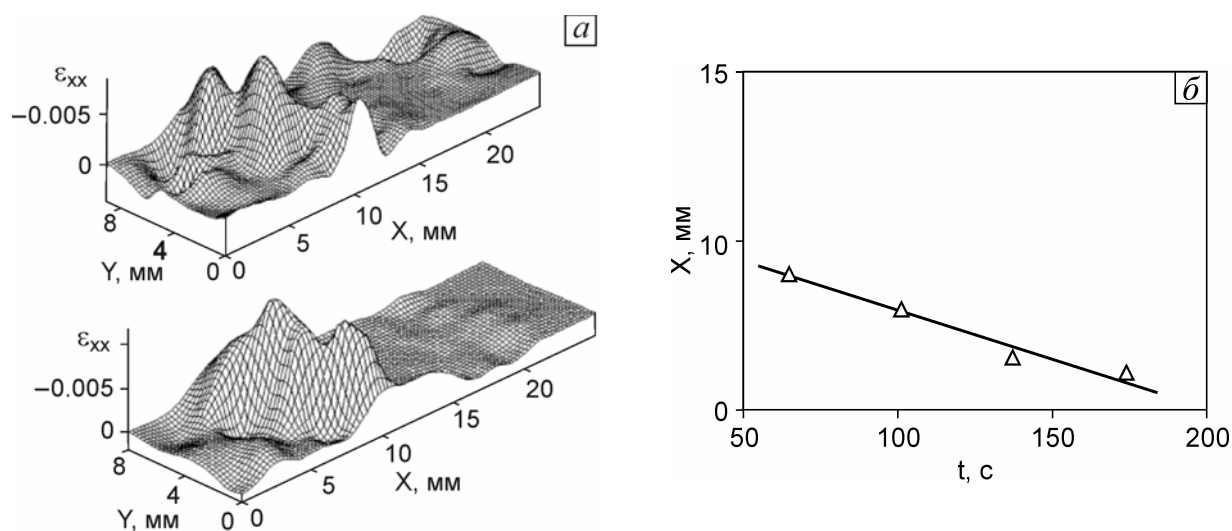


Рис. 3. Очаги макролокализации деформации в виде распределений локальных деформаций  $\varepsilon_{xx}(x, y)$  в образце сильвинита при  $\varepsilon_{tot} = 0.5$  и  $0.7\%$  (а), и положение максимумов  $X$  локальных деформаций  $\varepsilon_{xx}$  для средней линии образца в зависимости от времени деформирования  $t$  (б)

Установлено, что скорости движения фронтов локализованной деформации в образцах горных пород песчаника и мрамора, определенные с использованием автоматизированного комплекса ALMEC-TV, по порядку величины совпадают со скоростями зон локализации деформации, определенными с использованием методики двухэкспозиционной спекл-фотографии.

В научной литературе обсуждается вопрос о «медленных волнах» деформации (С.В. Гольдин), которые имеют определенное теоретическое обоснование и косвенно выявляются в геофизических полях. Прямые экспериментальные доказательства существования этих волн пока очень немногочисленны или даже уникальны. Физическая основа концепции деформационных волн земли состоит в фундаментальном свойстве геосреды, слоистости и блочности ее структуры. Поскольку скорости экспериментальных наблюдений «медленных движений» ( $\sim 1-10$  км/год) весьма близки к скоростям волн локализованной деформации ( $\sim 10^{-5}-10^{-4}$  м/с), наблюдавшимся в песчанике, мраморе и сильвините, то можно утверждать, что впервые в лабораторных условиях при одноосном сжатии наблюдалось распространение автоволн локализованной деформации в образцах из горных пород со скоростями, близкими к наблюдаемым в горных пластах после землетрясений и горных ударов так называемым «медленным движениям». Учитывая, что волновые параметры (длина волны и скорость ее распространения) слабо зависят от сорта деформируемого вещества, такое сопоставление может оказаться оправданным.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что динамика деформационных процессов при сжатии горных пород, состоящих из кристаллов с ионной связью, не должна отличаться принципиально от динамики таких процессов в щелочно-галлоидных кристаллах.

**Четвертая глава** «Исследование локализации пластической деформации при сжатии щелочно-галлоидных кристаллов» посвящена исследованию эволюции картин макроскопической локализации пластического течения при сжатии щелочно-галлоидных кристаллов, на которых традиционно изучаются механизмы пластического течения в физике прочности и пластичности. При сжатии вдоль  $[001]$  в кристаллах NaCl, KCl и LiF действуют четыре равнонагруженные системы скольжения  $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ , а степень деформации щелочно-галлоидных кристаллов может достигать нескольких десятков процентов.

Наблюдавшиеся стадии деформационного упрочнения и соответствующие им интервалы деформаций экспериментальной кривых сжатия образцов NaCl, KCl и LiF (рис. 4, *a*, *в*, *д*) представлены в табл. 1.

Анализ картин локализации деформации показал, что при сжатии кристаллов NaCl на стадии I пластическая деформация сосредоточена в двух зонах (рис. 4, *б*), наклоненных к продольной оси образца под углом  $\varphi = \pi/2$  на грани (010). По-видимому, данный факт обусловлен действием первой пары систем скольжения  $(0\bar{1}1)[011]$ ,  $(011)[0\bar{1}1]$ , следы скольжения от которой на грани (010) наклонены к направлению оси  $[001]$  под углами  $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi/2$  (рис. 5, *a*). Это подтверждается рис. 5, *б*, *в*, на которых показаны примеры совмещения последовательных картин оптического двулучепреломления на грани (100) и картин локализации деформации на грани (010) на стадии I при общей деформации сжатия  $\varepsilon_{\text{tot}} = 2.3$  и  $2.7\%$ . На протяжении линейной стадии I (аналог стадии легкого скольжения в металлических ГЦК-монокристаллах) наблюдалось движение двух зон локализации деформации со скоростью  $V_{\text{aw}} = 6.1 \cdot 10^{-5}$  м/с, значение которой определялось по наклону зависимости  $X(t)$  на рис. 4, *a*. Картины распределений локальных деформаций на линейной стадии II представляют собой 4-5 очагов локализации деформации, расположенные на расстоянии  $\lambda \approx 4 \pm 1$  мм друг от друга (рис. 4, *б*) и движущиеся с постоянной скоростью  $V_{\text{aw}} = 7.7 \cdot 10^{-5}$  м/с (рис. 4, *a*). Зоны локализованной деформации наклонены к продольной оси образца под углом  $\varphi = \pi/2$ . При переходе к стадии III характер распределения локальных деформаций изменился. Картина распределений деформаций  $\varepsilon_{xx}$  сначала представляла собой подвижные очаги, зародившиеся на стадии II, которые затем остановились в средней части образца. Далее на стадии III сформировалась система трех неподвижных очагов локализации деформации (рис. 4, *a*).

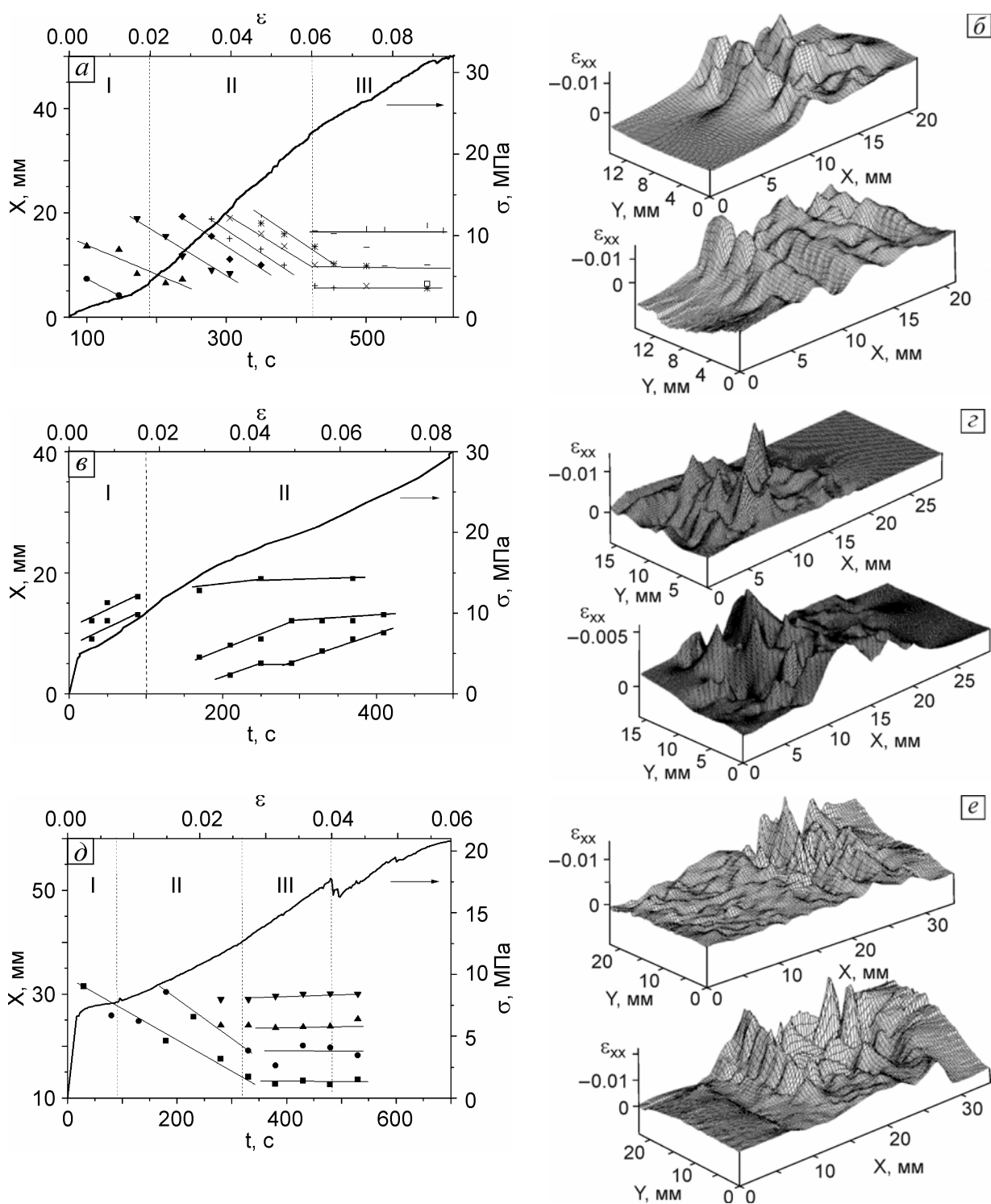


Рис. 4. Экспериментальные кривые пластического сжатия  $\sigma(\epsilon)$  с соответствующими диаграммами положений координат очагов локализации деформации  $\epsilon_{xx}$  вдоль оси образца с течением времени  $X(t)$ : *a* — NaCl; *б* — KCl; *д* — LiF, и распределения локальных деформаций макролокализации  $\epsilon_{xx}(x, y)$  в образце: *б* — NaCl на стадии I при  $\epsilon_{tot} = 1\%$  и на стадии II при  $\epsilon_{tot} = 3.7\%$ ; *з* — KCl на стадии I при  $\epsilon_{tot} = 1\%$  и на стадии II при  $\epsilon_{tot} = 5\%$ ; *e* — LiF на стадии II при  $\epsilon_{tot} = 1.4\%$  и на стадии III при  $\epsilon_{tot} = 3.2\%$

Основные данные о деформационном упрочнении и локализации деформации при сжатии щелочно-галогидных кристаллов

Кристалл	$\sigma_T$ , МПа	Интервалы деформации	Наблюдавшиеся стадии деформационного упрочнения	Наблюдавшиеся картины локализации деформации
NaCl	1	0.002– 0.02	Линейная стадия I ( $\theta_I \approx 120$ МПа)	Движение двух зон локализации деформации ( $V_{aw} \approx 6.1 \cdot 10^{-5}$ м/с)
		до 0.055	Линейная стадия II ( $\theta_{II} \approx 490$ МПа)	Движение четырех зон локализации деформации ( $V_{aw} \approx 7.7 \cdot 10^{-5}$ м/с)
		до 0.09	Линейная стадия III ( $\theta_{III} \approx 300$ МПа)	Стационарная система из трех зон локализации деформации ( $\lambda \approx 4 \pm 1$ мм)
KCl	5	0.002– 0.01	Линейная стадия I ( $\theta_I \approx 178$ МПа)	Движение двух зон локализации деформации ( $V_{aw} \approx 6 \cdot 10^{-5}$ м/с)
		0.05 – 0.085	Линейная стадия II ( $\theta_{II} \approx 137$ МПа)	Движение двух зон локализации деформации ( $V_{aw} \approx 4.5 \cdot 10^{-5}$ м/с), одна из которых остановилась
LiF	6.5	0.002– 0.008	Линейная стадия I ( $\theta_I \approx 115$ МПа)	Движение одной зоны локализации деформации ( $V_{aw} \approx 8.5 \cdot 10^{-5}$ м/с)
		до 0.026	Линейная стадия II ( $\theta_{II} \approx 285$ МПа)	Движение двух зон локализации деформации ( $V_{aw} \approx 8.5 \cdot 10^{-5}$ м/с)
		до 0.04	Линейная стадия III ( $\theta_{III} \approx 365$ МПа)	Стационарная система из четырех зон локализации деформации ( $\lambda \approx 5 \pm 1$ мм)

Анализ распределений локальных деформаций  $\epsilon_{xx}$  при сжатии образцов KCl показал, что на стадии I две зоны локализованной деформации (рис. 4, з) перемещаются с постоянной скоростью  $V_{aw} = 6 \cdot 10^{-5}$  м/с (рис. 5, в). На стадии II из трех зон локализации пластической деформации (рис. 4, з) отмечено движение двух зон локализованной деформации со скоростью  $V_{aw} = 4.5 \cdot 10^{-5}$  м/с, одна из которых затем остановилась (рис. 4, в).

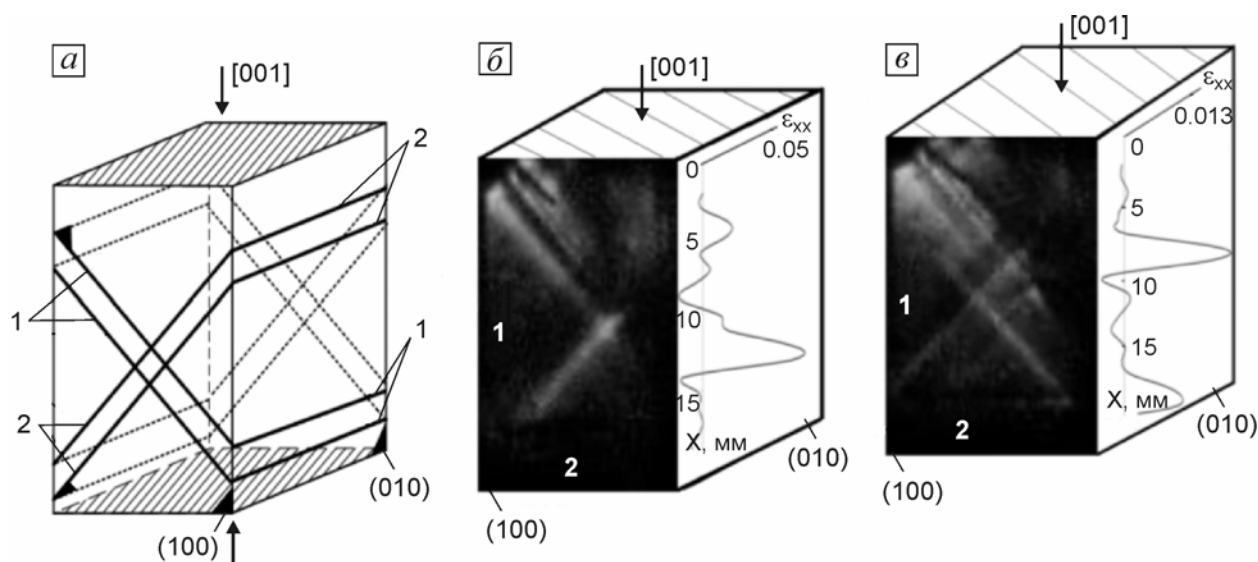


Рис. 5. Кристаллографическая схема ориентации нагруженных плоскостей скольжения в щелочно-галогидных кристаллах (а) и совмещенные картины двулучепреломления и локализации пластической деформации на разных гранях кристалла NaCl при двух последовательных значениях общей деформации сжатия  $\varepsilon_{tot} = 2.3$  (б) и  $2.7\%$  (в): 1 — система скольжения  $(011)[0\bar{1}1]$ ; 2 — система скольжения  $(0\bar{1}1)[011]$

Анализ картин локализации деформации показал, что при сжатии кристаллов LiF на стадии I пластическая деформация сосредоточена в одной зоне, наклоненной на грани (010) к продольной оси образца под углом  $\varphi = \pi/2$ . По-видимому, это обусловлено действием первичной системы скольжения  $(0\bar{1}1)[011]$ , следы скольжения от которой наклонены на этой грани к оси [001] на  $\varphi_1 = \pi/2$ . Это подтверждается совмещением картин оптического двулучепреломления, свидетельствующих о действии системы скольжения  $(0\bar{1}1)[011]$ , следы скольжения которой на грани (100) составляют с осью образца угол  $\varphi_1 = \pi/4$ , и картин локализации деформации в виде одиночного максимума распределения компоненты локальных деформаций  $\varepsilon_{xx}$  на грани (010). Далее на линейной стадии II, наряду с первой зоной локализации деформации, зарождается еще одна зона (рис. 4, е). Ее появление может быть связано с включением второй системы скольжения  $(011)[0\bar{1}1]$ , следы скольжения которой на грани (100) составляют с осью образца угол  $\varphi_2 = 3/4\pi$ . Две зоны локализованной деформации на грани (010) наклонены к продольной оси образца на  $\varphi = \pi/2$  и движутся со скоростью  $V_{aw} = 8.5 \cdot 10^{-5}$  м/с, определенной по наклону зависимости  $X(t)$  положений координат очагов локализации деформации  $\varepsilon_{xx}$  вдоль оси образца с течением времени (рис. 4, д). К концу стадии II произошла остановка двух очагов локализации  $\varepsilon_{xx}$ . При переходе к стадии III характер локальных деформаций изменился. Картины их распределений на линейной стадии III состоят из четырех неподвижных зон локализации деформации, расположенных на расстоянии  $\lambda \approx 5 \pm 1$  мм друг от друга (рис. 4, е). Зоны локализованной деформации на грани (010) также наклонены к продольной оси образца под углом  $\varphi = \pi/2$ .

Согласно полученным данным, при сжатии щелочно-галоидных кристаллов пластическое течение локализовано в активных зонах образца, закономерно расположенных по его длине. В зонах между такими очагами деформация практически не развивается, а активные зоны на стадиях I и II, движутся вдоль оси образца. Значения скоростей движения зон локализации деформации близки к ранее зафиксированным на стадиях легкого скольжения ряда металлических монокристаллов, для которых механизмом пластической деформации, как и для щелочно-галоидных кристаллов, является дислокационное скольжение. В настоящей работе представляется важным тот факт, что, как и в случае металлических монокристаллов, в щелочно-галоидных кристаллах зоны локализации пластической деформации представляют собой совокупность сдвигов по плоскостям скольжения кристаллов, движение же двух зон локализации на стадии I может быть связано с расширением следов скольжения от соответствующих систем скольжения по образцу, что наглядно видно из сравнения двух последовательных картин локализации деформации и оптического двулучепреломления (рис. 5, б, в).

Ранее для всех исследованных металлических материалов было установлено, что скорость движения деформационных очагов  $V_{aw}$  на стадии линейного деформационного упрочнения обратно пропорциональна коэффициенту деформационного упрочнения  $\theta = G^{-1} d\sigma/d\varepsilon$  ( $G$  — модуль сдвига), т.е.  $V_{aw}(\theta) = V_0 + \Xi/\theta$ . Установлено, что данные настоящей работы о скоростях очагов пластического течения в LiF, KCl, NaCl и сильвините удовлетворяют зависимости  $V_{aw}(\theta)$  с коэффициентом корреляции  $\sim 0.9$ . Полученные результаты, обобщенные в табл. 1, прежде всего, подтверждают единую природу волновых процессов на линейных стадиях деформационного упрочнения щелочно-галоидных кристаллов.

Анализ количественных характеристик локализации пластического течения в щелочно-галоидных кристаллах позволил обнаружить фундаментальную закономерность, состоящую в том, что произведения макропараметров процессов локализации  $\lambda V_{aw}$  оказались коррелированными с произведениями микропараметров соответствующих кристаллов  $bV_{\perp}$  ( $b$  — модуль вектора Бюргерса,  $V_{\perp}$  — скорость упругих поперечных волн):  $\lambda V_{aw} \approx 1/3 bV_{\perp}$ . Данное соотношение указывает на количественную связь характеристик разного масштаба. Можно полагать, что волны локализации пластического течения с их макроскопическим линейным масштабом  $\sim \lambda$  возникают как результат взаимодействия дислокаций, имеющих типично микроскопический масштаб  $\sim b \ll \lambda$ .

Далее приведено описание реализации результатов диссертационного исследования и направления их возможного практического применения. В частности, данные о распределениях локализации деформации в горных породах в рамках блочной модели деформирования, были использованы ООО «Проектгидроуголь-Н» при выполнении расчетов горного давления для выбора оптимальных вариантов крепления горных выработок со слоистой



структурой в условиях ОАО «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского» ОАО УК «Прокопьевскуголь».

В приложении приведены справки об использовании результатов работы в производственной, научной и учебной деятельности.

### Основные выводы

1. Экспериментально установлен автоволновой характер процесса локализации деформации при сжатии горных пород (песчаник, мрамор и сильвинит) и щелочно-галоидных кристаллов (NaCl, KCl, LiF). Это утверждение основано на экспериментально установленных характеристиках этих процессов, позволяющих отличить их от других, ранее изученных типов волн, также связанных с деформацией:

– скорость распространения волн локализации деформации лежит в пределах  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  м/с;

– области неоднородности деформации имеют макроскопический масштаб, составляющий 3–5 мм и соизмеримый с размерами образцов, используемых для механических испытаний.

2. Экспериментально установлено, что в лабораторных условиях при одноосном сжатии горных пород генерируются автоволны локализованной деформации, соответствующие «медленным движениям», наблюдавшимся ранее только в естественных условиях после землетрясений и горных ударов, поскольку скорости экспериментальных наблюдений «медленных движений» ( $\sim 1$ – $10$  км/год) весьма близки к скоростям автоволн локализованной деформации ( $\sim 10^{-5}$ – $10^{-4}$  м/с). Зарождение и распространение трещин происходит по границам зон локализации деформации.

3. Показано, что картины локализации пластического течения, полученные методом спекл-фотографии, соответствуют картинам двулучепреломления при сжатии щелочно-галоидных кристаллов, а именно: зоны локализации пластической деформации представляют собой совокупность сдвигов по плоскостям скольжения кристаллов. Получены качественные данные о типах распределений локальных деформаций и их количественные характеристики для пластической деформации сжатием щелочно-галоидных кристаллов:

– в соответствии со сменой стадий деформационной кривой происходит эволюция типов картин распределений локальных деформаций в процессе нагружения: в NaCl, KCl на линейной стадии I наблюдается пара движущихся с постоянной скоростью зон локализации деформации. В LiF на данной стадии картина локализации деформации представляет собой единичные очаги, также движущиеся с постоянной скоростью. В KCl, LiF на линейной стадии II пара очагов локализации деформации, и в NaCl — четыре эквидистантно расположенных очага локализации деформации равномерно движутся с постоянными скоростями. Однако образец проходит упомянутыми очагами локализации деформации один раз. В NaCl, LiF на линейной стадии III обнаружена стационарная система очагов пластической деформации;

– полученные значения скоростей движения очагов локализации деформации NaCl, KCl, LiF и сильвинита хорошо удовлетворяют универсальной

обратно пропорциональной зависимости скоростей движения автоволн локализованной деформации от  $\theta/G$  на стадии линейного упрочнения;

– произведение макроскопических параметров локализации пластического течения щелочно-галоидных кристаллов ( $\lambda$  — длина волны,  $V_{aw}$  — скорость распространения) и произведение микроскопических параметров кристаллической решетки деформируемых твердых тел ( $b$  — модуль вектора Бюргерса,  $V_{\perp}$  — скорость упругих поперечных волн) — инварианты упругих и пластических деформационных процессов в твердых телах.

4. Параметры распределений локальных деформаций горных пород использованы ООО «Проектгидроуголь-Н» при выполнении расчетов горного давления для выбора оптимальных вариантов крепления горных выработок в условиях ОАО «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского» ОАО УК «Прокопьевскуголь».

### Список публикаций по теме диссертации

1. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. О локализации пластического течения при сжатии кристаллов NaCl и KCl // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 1081–1086.
2. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. О локализации пластической деформации при сжатии кристаллов LiF // ФТТ. – 2010. – Т. 52 – № 7. – С. 1291–1294.
3. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. О взаимосвязи векторов Бюргерса дислокаций и картин локализации пластической деформации при сжатии щелочно-галоидных кристаллов // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 16. – С. 15–21.
4. Баранникова С.А., Надежкин М.В. О локализации пластической деформации при сжатии щелочно-галоидных кристаллов // Вестник Тамбовского государственного университета. Естественные и технические науки. – 2010. – Т. 15. – Вып. 3. – С. 1143–1147.
5. Баранникова С.А., Надежкин М.В. Локализация деформации в ионных кристаллах при сжатии // Сб. тезисов докладов XII Региональной конференции студентов и молодых ученых по физике, Владивосток, 15–17 ноября 2006. – С. 17–18.
6. Надежкин М.В., Баранникова С.А. Макроскопическая локализация деформации в неметаллических кристаллах при сжатии // Труды XIII Межд. научно-практической конф. студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ'2007», Томск, 26–30 марта 2007. – Т. 2. – С. 168–170.
7. Баранникова С.А., Бочкарева А.В., Зариковская Н.В., Лунев А.Г., Надежкин М.В. Картины макроскопической локализации деформации в металлических и неметаллических кристаллах // Материалы V конф. молодых ученых СО РАН, посвященной М.А. Лаврентьеву, Новосибирск, 20–22 ноября 2007 г. – Ч. I. – С. 52–55.
8. Надежкин М.В., Баранникова С.А. Локализация деформации при сжатии щелочно-галоидных кристаллов // Сб. материалов IV Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск, 22–25 апреля 2008. – С. 102–104.

9. Баранникова С.А., Зуев Л.Б., Надежкин М.В. Влияние кристаллографических аспектов и микроскопических параметров твердых тел на локализацию пластического течения в металлических и щелочно-галоидных кристаллах // Тезисы докладов Межд. школы-семинара «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения», Томск, 9–12 сентября 2008. – С. 130–131.
10. Надежкин М.В., Баранникова С.А. Сравнение картин двулучепреломления и локализации пластического течения в NaCl, KCl // Сб. материалов V Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск, 22–25 апреля 2009. – С. 147–150.
11. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. Картины локализации пластического течения в щелочно-галоидных кристаллах при сжатии / Сб. трудов 48 Межд. конф. «Актуальные проблемы прочности», Тольятти, 15–18 сентября 2009 г. – Тольятти: ТГУ, 2009. – С. 208–209.
12. Баранникова С.А., Надежкин М.В. О локализации пластического течения при сжатии щелочно-галоидных кристаллов / Сб. трудов Межд. научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин», Кемерово, 9–11 декабря 2009 г. – С. 19–33.
13. Баранникова С.А., Надежкин М.В. О неоднородности деформации при сжатии щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // Сб. материалов XIX Петербургских чтений по проблемам прочности, Санкт-Петербург, 13–15 апреля 2010 г. – Ч. 2. – С. 123–125.
14. Надежкин М.В., Баранникова С.А. О локализации пластической деформации при сжатии кристаллов LiF / Сб. материалов VI Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск, 14–17 апреля 2010 г. – С. 97–100.
15. Баранникова С.А., Надежкин М.В. О неоднородности деформации при сжатии щелочно-галоидных кристаллов и горных пород / Материалы VI Рос. научно-технической конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение». – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2010 (*электрон. ресурс*).
16. Баранникова С.А., Надежкин М.В. О неоднородности деформации при сжатии щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // Тезисы докл. VI Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение», Екатеринбург, 24–28 мая 2010 г. – С. 57.
17. Надежкин М.В., Баранникова С.А. О локализации деформации при сжатии щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // Тезисы докладов Рос. школы-конференции молодых ученых «Механика деформаций и разрушение материалов», Екатеринбург, 24–28 мая 2010 г. – С. 3.
18. Баранникова С.А., Надежкин М.В. О неоднородности деформации при сжатии горных пород / Сб. материалов V Рос. научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 26–28 апреля 2011 г. – С. 123.

Подписано в печать 14.10.2011 г.  
Формат 60×84/16. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,19. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в ИФПМ СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4