

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФПМ СО РАН)

Академический просп., д. 2/4, г. Томск, 634055  
Тел.: (3822) 49-18-81; факс: (3822) 49-25-76  
E-mail: root@ispms.tomsk.ru; http://www.ispms.ru  
ОКПО 01538612; ОГРН 1027000868971  
ИНН/ КПП 7021000822/ 701701001

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФПМ СО РАН  
д-р техн. наук, профессор РАН

Е.А. Колубаев

«26» сентября 2022 г.

26.09.2022 № 15329-17/1/708

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Пантелеева Ивана Алексеевича  
«Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной  
поврежденности и локализации деформации»,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Пантелеева И.А. посвящена актуальной теме – разработке нового физически обоснованного подхода к описанию неупругого деформирования (включая разрушение) природных и технических хрупких материалов и деградации их механических свойств по мере деформирования, учитывающего направленный (то есть зависящий от вида нагружения) характер формирования поврежденности. Высокая актуальность данной тематики обусловлена целым рядом факторов, связанных с преобразующей деятельностью человеческого общества, в числе которых: активная горнодобывающая деятельность, создание массивных инфраструктурных объектов (включая экологически опасные), использование отработанных шахтных полей, быстрый рост человеческой популяции в зонах высокой сейсмической активности и т.д. Современные подходы к повышению безопасности создаваемой инфраструктуры базируются на кратко- и среднесрочном прогнозировании механического поведения и эволюции свойств геотехнических и крупномасштабных инженерных объектов, в том числе с использованием так называемых «цифровых двойников». В основе таких виртуальных копий лежат макроскопические механические модели используемых природных и строительных искусственных материалов, большинство из которых, можно охарактеризовать как «микроскопически хрупкие». Данный термин подразумевает, что наблюдаемая макроскопическая неупругая (называемая также пластической) деформация которых связана, главным или исключительным образом, с формированием и развитием системы микроповреждений (не сплошностей). В настоящее время подавляющее большинство развитых макроскопических моделей пластичности хрупких материалов являются феноменологическими, то есть не рассматривают физические носители

неупругой деформации (несплошности) и создаваемые ими искажения упругих полей. Феноменологические модели различной степени сложности и нелинейности повсеместно применяются в инженерной практике, поскольку обладают достаточной простотой и высокой эффективностью при реализации в рамках численных методов статического анализа и динамического моделирования. Однако такие модели, хотя и способны воспроизводить с хорошей точностью неупругую реакцию хрупкого материала в большинстве «штатных» условий нагружения, но не способны давать ответ на вопрос о механизмах релаксации напряжений и параметрах формирующейся дефектной структуры, а следовательно, не способны прогнозировать характер и особенности изменения упругих механических характеристик. Более того, поскольку формирующиеся несплошности являются дефектами плоскостного типа и обуславливают неизотропное искажение упругих полей, поведение изначально изотропного хрупкого материала по мере деформирования становится неизотропным, поэтому даже на макроуровне упругие и неупругие свойства материала, претерпевшего значительные нагрузки, должны описываться не скалярными, но тензорными материальными параметрами (тензором жесткости, тензором упрочнения и т.д.). Развитые к настоящему времени физические континуальные модели «пластичности» хрупких материалов, как правило, характеризуют поврежденность скалярными параметрами. Область применения таких скалярных моделей, однако, также ограничена условиями, в которых формирующаяся поврежденность не приводит к существенному нарушению изотропности свойств материала. В этой связи настоящая работа, посвященная развитию обобщенной физической континуальной модели «пластичности» хрупких материалов, способной учитывать интегральный анизотропный эффект формирующихся дефектов (микротрещин и коллапсирующих исходных пор), является, безусловно актуальной, а ее результат – создание такой модели – научным достижением.

Научная новизна результатов заключается в том, что на основе анализа оптических изображений поверхности установлены и обобщены закономерности локализации деформации в квазихрупких материалах при различных видах нагружения (простой сдвиг и растяжение), показаны отличия форм локализации от имеющих место при сжатии. Предложены и впервые реализованы оригинальные экспериментальные исследования для однозначного определения условий проявления хорошо известного эффекта Кайзера в хрупких материалах. Предложен, верифицирован и валидирован новый алгоритм выделения устойчивых решений для тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. Создание такого алгоритма позволяет однозначно интерпретировать данные регистрации акустической эмиссии и, в частности, анализировать количественные вклады различных механизмов формирования несплошностей в материале. Развита, в том числе верифицирована новая физическая макроскопическая модель неупругого поведения хрупких материалов, базирующаяся на описании эволюции тензора поврежденности и тензора, характеризующего деформационные проявления уплотнения. Возможности такой обобщенной модели обеспечивают принципиально новое качество анализа механических свойств материала, в частности, оценку ориентационных зависимостей макроскопических упругих свойств и динамики релаксационных процессов (включая ориентационную зависимость кривой неупругого деформирования или ползучести). С использованием развитой физической

модели впервые обоснованы ориентация зоны локализации неупругой деформации при сжатии с боковым подпором и преимущественные ориентации микротрещин в такой зоне.

Научная значимость диссертации заключается в создании обобщенной физической макроскопической модели «пластичности» хрупких материалов, явным образом учитывающей изменение анизотропии упругих свойств материала по мере деформирования. Полученные результаты экспериментального изучения форм макролокализации деформации при различных видах нагружения являются важными для понимания и прогнозирования закономерностей миграции деформационной и сейсмической активности в сейсмоопасных районах. Выявленные закономерности и условия проявления эффекта Кайзера в горных породах позволяют с новых позиций оценивать влияние данного эффекта и более достоверно прогнозировать реакцию участков горного массива и элементов крупномасштабных инфраструктурных объектов, находящихся в условиях стесненного нагружения, при переменных («вращающихся» в пространстве) природных и искусственных штатных и нештатных воздействиях.

Практическая ценность результатов диссертационного исследования определяется возможностью реализации развитой обобщенной физической макроскопической модели «пластичности» (неупругого поведения) хрупких материалов в рамках численных методов механики деформируемого твердого тела и 3D моделирования процессов сложного (в том числе переменного) нагружения хрупких материалов, обуславливающих вызванную поврежденностью и компакцией анизотропию механических свойств. Получение оценок анизотропной деградации механических характеристик материала в рамках традиционных (в том числе скалярных физических) моделей является крайне затруднительным или невозможным. Высокую практическую значимость имеет и разработанная методика определения микромеханизмов разрушения хрупких материалов на основе вычисления компонент тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. Данная методика может быть применена для анализа развития поврежденности на отдельных участках шахтных полей, сейсмоопасных участках разломных зон, в элементах крупномасштабных инженерных объектов, находящихся в сложных стесненных условиях нагружения.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключение, списка литературы, включающего 564 цитируемых источника. Работа содержит 365 страниц текста, в том числе 144 рисунка и 5 таблиц и 186 формул.

Во Введении определена актуальность диссертационной работы, дан широкий анализ состояния исследований в предметной области, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, перечислены новые результаты, показана их научная (теоретическая) значимость и практическая ценность, указаны достоверность и обоснованность полученных результатов, описаны методология и методы исследования, представлены апробация работы, публикации и личный вклад автора, структура и объем диссертации.

Первая глава посвящена обширному анализу литературных данных и описанию результатов собственного исследования форм макролокализации неупругой деформации в хрупких материалах и областях геосреды при различных видах нагружения. В частности,

классифицированы и проанализированы различные пространственно-временные формы локализации в твердых телах с различными типами межатомной связи. Описаны три основных класса феноменологических моделей, применяемых для описания «медленных» деформационных волн: упруговязкие модели, модели на основе уравнения  $\sin$ -Гордона, автоволновые модели. Приведены результаты собственного экспериментального изучения закономерностей формирования и развития зон локализованной неупругой деформации в сильвините при растяжении. Показано, что в отличие от сжатия, формирующиеся полосы локализованной деформации являются стационарными. Дана интерпретация полученных результатов наблюдения в рамках развиваемой в ИМСС УрО РАН концепции структурного скейлинга с использованием скалярного параметра скейлинга. Экспериментально исследованы закономерности развития сдвиговой зоны в земной коре на физической модели (водной пасте монтмориллонитовой глины). Выявлены и классифицированы этапы ее развития, связанные с фрагментацией и вызванным ей изменением характера динамики зарождения и движения «медленных» деформационных волн. Показано, что по мере развития сдвиговой зоны происходит трансформация «межразломных» деформационных волн во «внутриразломные». Даны оценки характерных скоростей таких волн на различных стадиях формирования сдвиговой зоны, качественно согласующиеся с оценками скоростей «медленных» волн в земной коре.

Вторая глава посвящена анализу современных подходов к определению типов источников акустической эмиссии нагружаемых материалов и развитию методов анализа данных акустической эмиссии для однозначного определения микромеханизмов разрушения хрупких материалов при нагружении. В рамках решения этой задачи решены важные подзадачи точного определения времен прихода Р-волн к датчикам акустической эмиссии с использованием наиболее эффективного классического критерия Акайке, проанализированы и экспериментально исследованы методы калибровки датчиков (метод калибровки по теоретически вычисленному сигналу и метод сравнения с эталонным сигналом). Освоена методика вычисления компонентов тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии и предложен оригинальный трехэтапный алгоритм уточнения найденных решений и выделения устойчивых. Разработанные методики применены для экспериментального исследования закономерностей эволюции акустической эмиссии образцов гранта при трехточечном изгибе. Показано, что процесс изгиба сопровождается на начальной стадии развитием трещин нормального отрыва со сдвиговой составляющей. Непосредственно перед разрушением начинают преобладать сдвиговые трещины различного типа с преобладанием сбросов. Установлено, что моментные магнитуды событий подчиняются хорошо известному закону Гуттенберга-Рихтера, что дополнительно подтверждает адекватность полученных результатов. Результаты, описанные в данной главе, вносят значимый вклад в развитие метода акустической эмиссии в части обоснования возможности его более широкого применения для идентификации типов локального разрушения, ориентации локальных разрывов, характера локальной подвижки.

Третья глава посвящена исследованию эффекта Кайзера в квазихрупких материалах. Проведен анализ накопленных экспериментальных данных и модельных представлений о причинах и механизмах проявления данного эффекта, включая модели дискообразной и крылатой трещины, модель закрывающихся исходных трещин в материале. На

уникальной испытательной установке в ИПМ РАН им. А.Ю. Ишлинского проведены серии специально поставленных экспериментов на образцах песчаника для выявления условий проявлений эффекта Кайзера при сложном непропорциональном нагружении (сжатии) предварительно сжатых образцов. Исходя из имеющихся гипотез о видах напряженно-деформированного состояния, при которых проявляется данный эффект, рассмотрены два вида циклических испытаний: последовательное изменение формы и ориентации эллипсоида Ламе; последовательное изменение размеров эллипсоида Ламе (изменяющийся уровень девиаторных напряжений). Показано, что проявление эффекта Кайзера определяется характером анизотропии поврежденности (системы различным образом ориентированных несплошностей), формирующейся при нагружении. Сделан вывод о том, что модель крылатой трещины является наиболее адекватной микромеханической моделью для качественного описания механизма проявления эффекта Кайзера. Полученные результаты убедительно обосновывают необходимость построения обобщенной физической макроскопической модели неупругого поведения хрупких материалов, эффективно учитывающей ориентации возникающих несплошностей и создаваемую ими анизотропию механических свойств.

Четвертая глава посвящена построению математического формализма обобщенной макроскопической механической модели хрупких материалов, учитывающей влияние ориентационных характеристик напряженного состояния на ориентацию формирующихся повреждений и, соответственно, анизотропный характер влияния формирующейся поврежденности на эффективные (интегральные) упругие характеристики материала. Проведен анализ существующих феноменологических (устанавливающих связь напряжений с упругими и остаточными деформациями) и физических (базирующихся на эффективном учете дефектной структуры) макроскопических моделей нелинейного/неупругого механического поведения хрупких материалов. Показана необходимость развития формализма неклассических нелинейных реологических моделей, оперирующих скалярным параметром поврежденности, и построения обобщенной модели хрупких материалов, базирующейся на рассмотрении поврежденности как тензора второго ранга. Введены определения симметризованного тензора поврежденности, а также тензора остаточной деформации, обусловленного фрикционными процессами на микротрещинах. Получены определяющие соотношения новой модели, включая кинетические уравнения для компонент данных тензоров. Определены условия выпуклости потенциала (в частности, предельные значения поврежденности в зависимости от степени обусловленной поврежденностью анизотропии) в развитой модели. Проведена валидация развитой модели на примере традиционного (одноосное сжатие с боковым подпором) сжатия песчаника. Показано влияние исходной анизотропии несплошностей в хрупком материале на преимущественную ориентацию новых микротрещин. Решена актуальная задача об оптимальной (предпочтительной) ориентации полосы локализации неупругой деформации по отношению к оси активного сжатия. Впервые теоретически обоснованы преимущественные углы ориентации микротрещин в полосе локализации, что, в частности, позволяет лучше понять и однозначно интерпретировать данные о преимущественных ориентациях несплошностей в сдвиговых зонах Риделя. Обсуждаются преимущества развитой «тензорной» модели поврежденности для прогнозирования механического поведения и изменения механических свойств (включая ориентационную

зависимость упругих модулей) хрупких материалов при сложных криволинейных траекториях нагружения.

В Пятой главе представлено обобщение развитой механической модели хрупких материалов с тензорной поврежденностью на пористые материалы. Проведен анализ литературных данных об особенностях неупругого поведения (компрессии) пористых материалов в условиях сжатия и существующих моделей, применяемых для феноменологического описания таких особенностей. В качестве математической основы для обобщения развитой диссертантом модели тензорной трещиноватости выбрана модель нелинейной пороупругости со скалярным параметром, характеризующим изменение пористости. Введено понятие тензора уплотнения, являющегося обобщением скалярного параметра и учитывающего анизотропию эффективных свойств вследствие направленного уплотнения/разуплотнения материала при нагружении. Предложено кинетическое уравнение для компонент тензора уплотнения. Построена замкнутая система определяющих соотношений, описывающих механическое поведение пористых материалов с учетом анизотропии дефектной структуры (несплошностей плоскостного типа и пористости) и определяемое этой структурой анизотропное изменение эффективных механических характеристик материала. На примере непропорционального сжатия образцов песчаника с изменением формы и ориентации эллипсоида Ламе построена методика идентификации материальных параметров в развитой модели и проведена валидация модели. Показаны преимущества развитого обобщения тензорной модели хрупких пористых материалов при изучении особенностей проявления эффекта Кайзера. Обсуждаются перспективы применения модели для решения практически важных задач, связанных, в частности, с извлечением углеводородов и прогнозированием состояния углеводородных коллекторов (в том числе изменения трещиноватости, пористости и проницаемости вследствие падения порового давления флюида).

В Заключении приведены выводы, сделанные по результатам диссертационного исследования.

Систематический подход в постановке и организации исследований и разносторонний анализ полученных результатов обусловили научную ценность и новизну результатов работы. Диссертация обладает внутренним единством и строгой последовательностью в изложении. Автор демонстрирует близкое к энциклопедическому владение историей и текущего состояния методов и результатов исследований в тематической области. Использованы современные, актуальные методы исследования, выбор объектов исследования хорошо обоснован в контексте цели и задач работы. Полученные результаты являются новыми, имеют фундаментальную важность и хорошо просматриваемую практическую значимость, в частности, для решения актуальных проблем геотехнического районирования, прогноза землетрясений и сейсмического районирования. Содержание автореферата диссертации полностью соответствует тексту диссертации и опубликованным работам.

Достоверность результатов исследований, обоснованность выводов и выносимых на защиту положений обеспечивается применением современных методов и аппаратуры при проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации результатов, воспроизводимостью и согласованностью этих результатов, а также хорошим

качественным и (в значительной мере) количественным соответствием результатов применения развитой теоретической модели результатам специально спроектированных экспериментов и литературным данным.

По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, в том числе – 16 статей в ведущих научных журналах из перечня ВАК, 13 статей в журналах библиографических баз данных цитирования Web of Science и Scopus. Качественный и количественный уровень апробации результатов работы соответствует требованиям ВАК. Текст автореферата и публикаций в достаточной мере полноты отражают содержание диссертационной работы.

#### Вопросы и замечания к работе:

1. В Главе 1 приведен подробный анализ современных феноменологических представлений процессов макролокализации неупругой деформации и приведены оригинальные данные о закономерностях макролокализации при растяжении и сдвиге некоторых природных материалов. В то же время за кадром остался ключевой вопрос о физических причинах и механизмах макролокализации деформации в макроскопически (и мезоскопически) однородном материале. В частности, каковы особенности напряженного состояния упругодеформированных областей между полосами локализованной деформации, определяющие их преимущественно упругое поведение?

2. В главе 1 рассмотрены закономерности формирования зоны тектонического разлома на физической модели – слое водной пасты монтмориллонитовой глины. В качестве критериев подобия, обосновывающих адекватность использования данного материала для изучения крайне медленных процессов в литосфере, использованы коэффициенты подобия вязкости, плотности, гравитации, линейных размеров и времени процесса. В то же время не приведены данные о подобии ключевых механических характеристик: упругих параметров (в том числе соотношения модулей сдвига и объемного сжатия) и таких важных параметров неупругого поведения как коэффициент внутреннего трения и коэффициент дилатансии. Последние два, будучи безразмерными, сами могут выступать как критерии подобия. Их значения, как показано в различных работах, определяют вклады различных механизмов формирования несплошностей в макроскопическую неупругую деформацию и особенности эволюции полос локализации.

3. Глава 2 посвящена развитию подхода к анализу и интерпретации данных акустической эмиссии в процессе деформирования микроскопически хрупких природных материалов. При этом «за кадром» остался важный вопрос о том, возможно ли по данным акустической эмиссии не только идентифицировать механизм трещинообразования, но и оценить скорость роста трещины (то есть, скорость роста свободной поверхности в гипоцентре события акустической эмиссии)? Данный вопрос актуален, в частности, для выявления условий реализации сверхсдвигового режима формирования трещин сдвига в земной коре, поскольку в процессе сверхсдвигового роста трещины доля выделяющейся сейсмической энергии, скорости и амплитуда колебаний, частотное распределение сейсмической энергии существенно отличаются от наблюдаемых в случае классического «дорэлеевского» роста трещин сдвига.

4. В физической теории пластичности металлических и полимерных материалов (также называемой континуальной теорией дефектов) понятия деформации применяются только к полным и упругим деформациям. Неупругие деформационные проявления характеризуются дисторсиями: несовместные пластические дисторсии, связанные с создаваемыми дефектами полями внутренних напряжений, а также совместные пластические дисторсии, характеризующие необратимую пластическую деформацию и несвязанные с напряжениями. В развитой же диссертантом реологической модели хрупких материалов с тензорной поврежденностью фигурируют неупругие деформации: симметризованный тензор фиктивной деформации, характеризующий интегральный эффект поврежденности, а также тензор необратимой деформации, характеризующий интегральный эффект необратимых сдвигов берегов трещин. Можно ли провести аналогию между указанными деформационными характеристиками дефектной структуры в двух макроскопических моделях пластичности? Не будет ли более общим и корректным оперировать в развитой модели не симметризованными тензорами деформаций, но дисторсиями?

5. В развитой диссертантом реологической модели хрупких материалов с тензорной поврежденностью тензор необратимой деформации не связан с внутренними напряжениями. В то же время, исходя из его интерпретации (интегральный эффект необратимых сдвигов берегов трещин) он может быть связан с внутренними напряжениями, поскольку одной из возможных причин необратимости сдвига берегов является зацепление шероховатостей и, как следствие, локальные сдвиговые напряжения.

6. В Главе 5 описано обобщение развитой реологической модели на пористые материалы, учитывающее направленное уплотнение порового пространства. Заданный линеаризованный характер учета уплотнения вызывает ряд вопросов к модели.

6.1. Каков, по оценкам диссертанта, интервал пористостей, в котором применима данная модель консолидации? В частности, при малой величине пористости возможно отсутствие консолидации даже при крайне высоких нагрузках (при этом очевидно ожидать формирования микротрещин, стартующих от стенок пор). При большой пористости консолидация может иметь более сложный характер и описываться моделям более высокого порядка.

6.2. Непосредственно связанным с предыдущим является вопрос о влиянии размера пор. В частности, компакция в нанопористых материалах не наблюдается даже при гигапаскальных давлениях (примерами являются субдуцирующие океанические плиты, в которых по косвенным данным сохраняется нанопористость, по крайней мере, на глубинах до нескольких сотен км). Возможно, развитая модель может быть далее обобщена введением размерного фактора – характерного/эффективного размера пор. Не менее важную роль может играть и морфология пористого пространства, связанность пор.

7. Насколько корректным является использование упрощенной модели Био (в приближении равенства двух объемных модулей  $K_s'$  и  $K_s''$ , характеризующих материал твердофазного скелета) для рассматриваемой трещиноватой породы с порами? Возможно, в данном случае необходимо использовать обобщенную модель в предположении неравенства этих модулей?



8. Диссертант утверждает, что «медленные» деформационные волны являются причиной пространственно-временной миграции геодинамических процессов. Данное утверждение представляется физически неверным. «Медленные» волны скорее являются способом эффективного представления (качественного и количественного описания) миграции локализованных в пространстве релаксационных процессов, связанных с развитием ансамбля несплошностей.

9. В обзоре современного состояния исследований «медленных» деформационных волн не упомянута концепция так называемых маятниковых волн в геосреде, развиваемая с 1980-х годов научной школой ИГД СО РАН. Кроме того, хотя в обзорной части Главы 1 подробно разбираются работы Макарова П.В., но ничего не сказано о работах представителя той же научной школы Стефанова Ю.П. В работах Стефанова Ю.П. развиты оригинальные модели макроскопического неупругого поведения геосред с учетом внутреннего трения, дилатансии, компакции на поздних стадиях сдвига. С использованием развитых моделей Стефановым Ю.П. с соавторами систематически показано, как закономерности формирования и эволюции полос макролокализации неупругой деформации зависят от значений механических параметров геоматериалов.

10. В Главе 3 приведены результаты экспериментов по циклическому непропорциональному трехосному сжатию образцов песчаника с изменением формы и ориентации эллипсоида Ламе, а также с изменяющимся уровнем девиаторных напряжений. При этом в первом случае уровень «исходного» гидростатического сжатия составлял 10 МПа, а во втором – 50 МПа, что сопоставимо с величиной максимальных осевых напряжений при двухосных сжатиях в первом случае. Желательно представить обоснование столь существенного (многократного) различия в величине исходного давления.

11. В тексте диссертации местами встречаются описки, орфографические ошибки, неточности в формулировках, используются переменные, определения которых не приведены или приведены позже, подписи к отдельным графикам недостаточно информативны при отсутствии соответствующих разъяснений в тексте работы.

### **Заключение**

Указанные замечания в целом носят характер уточнений и пожеланий не влияют на общую положительную оценку данной работы, выполненной на мировом научном уровне.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки) в части:

Пункт 1) Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых

Пункт 2) Теория определяющих соотношений деформируемых тел с простой и сложной структурой.

Пункт 3) Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости.

Пункт 10) Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твёрдых тел.

Пункт 11) Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях.

Пункт 12) Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

Таким образом, диссертационная работа Пантелеева Ивана Алексеевича является законченным научным исследованием по актуальной теме. Работа выполнена на мировом научном уровне, содержит решение актуальных задач и вносит важный вклад в развитие современных представлений о макроскопических закономерностях и микромасштабных механизмах процессов накопления неупругой деформации и деградации механических свойств хрупких и квазихрупких материалов (включая горные породы и фрагменты горных массивов) в сложных, в том числе немонотонных условиях нагружения. Главным результатом работы является разработка математического формализма новой физической (учитывающей физические носители неупругой деформации) модели макроскопической пластичности микроскопически хрупких материалов (в том числе пористых), неупругое поведение которых определяется эволюцией ансамблей несплошностей различного типа. Создание такой модели, способной давать количественный прогноз изменения свойств широкого круга технических (в том числе композитов) и природных хрупких материалов в различных условиях и режимах нагружения, в том числе прогнозировать анизотропию свойств, можно квалифицировать как научное достижение, имеющее непосредственные перспективы использования при разработке цифровых двойников природных и крупномасштабных искусственных инженерных объектов.

По уровню решаемых задач, научной новизне и практической значимости, объему полученных результатов диссертационная работа «Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации» соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021) и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям (п. II.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней), а ее автор, Пантелеев Иван Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв подготовлен д.ф.-м.н. (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), главным научным сотрудником, заведующим лабораторией компьютерного конструирования материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) Шилько Евгением Викторовичем (634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4; тел.: +7(3822)286971; [shilko@ispms.ru](mailto:shilko@ispms.ru)).

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании объединенного научного семинара лаборатории компьютерного конструирования материалов, лаборатории механики структурно-неоднородных сред и лаборатории нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН).

Присутствовали на заседании 24 человека.

Результаты голосования: «за» – 24 человека, «против» – 0, «воздержались» – 0 (протокол №14 от 12.09.2022 г.).

Заведующий лабораторией компьютерного конструирования материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

Доктор физико-математических наук



Шилько Евгений Викторович

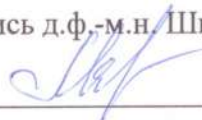
Шилько Е.В.: [shilko@ispms.ru](mailto:shilko@ispms.ru)

634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

тел.: +7(3822)286971

Я, Шилько Евгений Викторович, даю согласие на обработку своих персональных данных.

Подпись д.ф.-м.н. Шилько Е.В. заверяю



Ученый секретарь ИФПМ СО РАН к.ф.-м.н. Матольгина Н.Ю.

**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Телефон: +7(3822)491881

Факс: +7(3822)492576