На правах рукописи

Перышкин Алексей Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Макаров Павел Васильевич

Официальные оппоненты:

Лавриков Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред, главный научный сотрудник

Радченко Павел Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра прикладной математики, заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 21 апреля 2020 года в 12 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:
http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/PeryshkinAYu21042020.html

Автореферат разослан «____» марта 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Пикущак
Елизавета Владимировна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Земная кора находится в постоянном движении. Порождаемые этими тектоническими движениями процессы деформации и разрушения в земной коре и сопутствующие им землетрясения стали серьёзным вызовом человечеству.

В связи с этим, изучение современных тектонических течений элементов земной коры как на глобальном, так и региональном уровнях приобретает особую актуальность.

На территории России наиболее сейсмоопасными регионами являются Кавказ, Байкальская рифтовая зона, Курилы, Сахалин и Камчатка. Проблемами как всего деформационного процесса земной коры, так и сейсмических событий в этих регионах занимается большое количество исследователей.

В работе внимание сосредоточено на численном изучении геодинамических процессов в Центральной и Юго-Восточной Азии, где особое внимание уделено Байкальской рифтовой зоне и Центральному Алтаю.

В настоящее время общепризнанной идеей является то, что Земная кора в целом и её элементы являются типичными нелинейными динамическими системами, напряженно-деформированное состояние которых под приложенными нагрузками эволюционирует по законам нелинейной динамики.

Математическое моделирование тектонических течений и сопутствующего разрушения с позиций нелинейной динамики представляется перспективным и актуальным подходом, способным привести к созданию прогностических моделей как всего деформационного процесса земной коры, так и сейсмических событий.

Степень разработанности темы исследования. Изучению тектонических и сейсмических процессов в Центральной и Юго-Восточной Азии посвящено очень большое число работ. Например, модельные представления, описывающие процессы деформации и разрушения нагружаемых геосред, развиты в работах М.А. Садовского, В.Н. Николаевского, Ю.Л. Ребецкого, Ю.П. Стефанова, Б.П. Сибирякова, Е.В. Шилько, О.Б. Наймарка и др. В работах П.Г. Дядькова, Л.А .Назаровой, а также в некоторых работах зарубежных исследователей численно исследовались тектонические течения в Центральной и Юго-Восточной Азии. В работах К.Ж. Семинского исследовалась иерархическая структура континентальных разломных зон. Особое место занимают исследования по развитию представлений о роли медленных деформационных возмущений в Земной коре. По этой теме написаны обзоры С.В. Гольдиным, В.Г. Быковой, Ю.О. Кузьминой, С.И. Шерманом и др. Появились работы по непосредственной регистрации медленных движений. Рядом зарубежных исследователей моделируются сейсмические события в локальных регионах. В опытах на лабораторных образцах коллективом Л.Б. Зуева, показана роль медленных деформационных возмущений в формировании очагов разрушения. Расчёты современных тектонических течений носят эпизодический характер. Не изучен вклад Аравии в современные тектонические течения. Нет адекватной модели совместной генерации и распро-

странения в среде как обычных звуковых волн напряжений, так и медленных деформационных возмущений, скорости которых на 5-7 порядков ниже скорости звука. Практически не изучена роль такой медленной динамики в сейсмическом процессе. По этой причине в диссертационной работе изучены современные тектонические течения, сопровождающий их сейсмический процесс и предложена математическая модель совместной генерации как обычных звуковых волн напряжений, так и медленных деформационных возмущений, скорости которых на 5-7 порядков ниже скорости звука.

Цели диссертационной работы:

1) Численное изучение современных тектонических течений в Центральной и Юго-Восточной Азии.

2) Изучение эволюции напряженно-деформированного состояния и сейсмического процесса как сверхбыстрой катастрофической стадии эволюции в локальных объёмах нагружаемой геосреды.

3) Изучение медленной динамики деформируемой среды и её роли в формировании очагов разрушения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Модифицировать структурную модель Центральной и Юго-Восточной Азии, предложенную К.Ж. Семинским, определив в ней физико-механические параметры для значимых структурных элементов: жестких блоков, податливых зон и областей разломов.

2. Выполнить численное моделирование глобальных современных тектонических течений в Центральной и Юго-Восточной Азии.

3. Выполнить численное моделирование распространения деформационных процессов от областей коллизии Индийской и Аравийской плит с Евразийской вглубь континента, включая Байкальскую рифтовую зону.

4. Выполнить численное моделирование сейсмического процесса как сверхбыстрого катастрофического режима эволюции напряженно-деформированного состояния в локальных областях и его распространение от областей коллизии вглубь Евразийского континента.

5. Выполнить численное моделирование современных тектонических течений и сейсмического процесса в Байкальской рифтовой зоне.

6. Численно изучить особенности генерации и распространения медленных деформационных возмущений и установить их роль в формировании критических состояний (очагов разрушения).

Методология и методы исследования. В работе методика решения поставленных целей и задач основана на идеях математической теории эволюции. Эта теория является развитием и синтезом идей и подходов, предложенных в физической мезомеханике материалов, нелинейной динамике и традиционной механике деформируемого твердого тела. Для решения поставленных задач применен явный конечно-разностный метод М.Л. Уилкинса для численного решения системы динамических уравнений механики деформируемого твердого тела.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Структурная модель Центральной и Юго-Восточной Азии, включающая прочностные параметры структурных элементов геосреды, определённые в соответствии с плотностью сейсмогенных разрывов.

2. Результаты численного моделирования современных тектонических течений в Центральной и Юго-Восточной Азии, в том числе в Байкальской рифтовой зоне.

3. Результаты численного моделирования распространения деформационных процессов от области коллизии Индийской, Аравийской и Северо-Американской плит с Евразийской вглубь континента.

4. Результаты численного моделирования сейсмического процесса в Центральной и Юго-Восточной Азии, в том числе в Байкальской рифтовой зоне и его распространения от области коллизии вглубь Евразийского континента.

5. Результаты численного моделирования особенностей формирования и распространения медленных деформационных возмущений и их вклад в формирование критических состояний (очагов разрушения).

Научная новизна работы.

Выполнено численное моделирование современных глобальных тектонических течений в Центральной и Юго-Восточной Азии, вызванных коллизионными процессами Евразии с крупными литосферными плитами (Индостаном и Аравией на юге и Северо-Американской на северо-востоке).

Численно смоделирован сейсмический процесс в Центральной и Юго-Восточной Азии, в том числе в Байкальской рифтовой зоне и Центральном Алтае.

Показано, что коллизия со стороны Индостана вносит существенный вклад в тектонические течения Центральной и Юго-Восточной Азии, в т.ч. в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), в целом определяя направления векторов тектонических течений в хорошем соответствии с наблюдаемыми. Показано, что воздействие Аравийской плиты заметно влияет на развитие тектонических течений в Центральной Азии.

Однако, расчетный деформационный процесс в глубине континента, в т.ч. в Байкальской рифтовой зоне, вычисленный в предположении, что он обусловлен только коллизионными процессам на границах плит, выражен значительно слабее реального. Амплитуды расчётных полей смещений оказались существенно ниже наблюдаемых. Наблюдаемый деформационный процесс в этих областях не может быть объяснен только коллизионными процессами на границах Евразии и Индостана и Аравии.

Разработана математическая модель совместной генерации как обычных звуковых волн напряжений, так и медленных деформационных возмущений, скорости которых на 5-7 порядков ниже скорости звука. Численно изучены особенности взаимодействий медленных деформационных возмущений в твёрдых средах, выяснен их вклад в формирование очага разрушения. Численно изучены процессы генерации и распространения медленных деформационных возмущений.

Теоретическая и практическая значимость Результаты исследования вносят вклад в развитие современных представлений о характере и механизмах тектонических течений в Центральной и Юго-Восточной Азии и сейсмическом процессе в этих регионах. Численными методами механики деформируемого твердого тела была в целом подтверждена гипотеза Монлара-Добрецова-Буслова о передаче деформационного импульса в Центральной и Юго-Восточной Азии через податливые зоны и жёсткие домены от области коллизии Индостана с Евразийской плитой.

Существенное практическое значение для развития новых методов прогноза землетрясений имеет выяснение существенной роли медленной динамики в деформационных процессах в земной коре. Численно показано, что распространяющиеся в твёрдых телах и геосредах медленные деформационные возмущения вносят значительный вклад в перераспределение напряженно-деформированного состояния в элементах земной коры, активно участвуют в формировании очагов разрушения и в формировании критических состояний.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается серией проведённых тестовых расчётов и их верификации по экспериментальным данным, как с малыми образцами, нагружаемых в лабораторных условиях, так и с данными наблюдений, корректностью физической и математической постановок задачи.

Личный вклад автора заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследования, анализе результатов, формировании выводов по соответствующим задачам и формулировке положений, выносимых на защиту, написании статей по теме научных исследований, в проведении численных экспериментов и обработке экспериментальных данных. Автор принимал непосредственное участие в выполнении, обработке и анализе всех расчетов, проведенных в работе.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международной конференции «Иерархически организованные системы живой и неживой природы» (09–13 сентября 2013 г., Томск); Международной конференции «Физическая мезомеханика многоуровневых систем–2014. Моделирование, эксперимент, приложения» (03–05 сентября 2014 г., Томск); XXIV Международной научной школе им. академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках» (22–28 сентября 2014 г., Алушта, Крым); Всероссийском совещании с участием приглашенных исследователей из других стран «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ» (11–16 августа 2014 г., Иркутск); Четырнадцатом Всероссийском семинаре «Геодинамика. Геомеханика и Геофизика» (04–08 августа 2014 г., Стационар «Денисова пещера», Алтайский край, п. Солонешное); XIX Зимней школе по механике сплошных сред (24–27 февраля 2015 г., Пермь); XXV Международной научной школе

им. академика С.А. Христиановича (21–27 сентября 2015 г, Алушта, Крым); международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (21–25 сентября 2015 г., Томск); семинаре «Геодинамика. Геомеханика и Геофизика» (03–07 августа 2015 г., стационар «Денисова пещера», Алтайский край, п. Солонешное); международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (19–23 сентября 2016 г., Томск); X Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (16–20 мая 2016 г., Екатеринбург); Четвертой тектонофизической конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (03–08 октября 2016 г., Москва); XVII Всероссийском семинаре «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (24–29 июля 2017 г., Стационар «Денисова пещера», Алтайский край, п. Солонешное); XXVII Международной научной школе им. академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках» (18–24 сентября 2017 г., Алушта, Крым); XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (21–25 мая 2018 г., Екатеринбург); XVIII Всероссийском семинаре «Геодинамика, геомеханика и геофизика» (23–28 июля 2018 г. Стационар «Денисова пещера», Алтайский край, п. Солонешное); международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций» (01–05 октября 2018 г., Томск); XXI Зимней школе по механике сплошных сред (18–22 февраля 2019 г., Пермь).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 работах, в том числе в 4 статьях в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 2 статьи в российском научном журнале, переводные версии которого входит в Web of Science), 8 статьях в электронных сборниках материалов конференций, представленных в издании, входящем в Web of Science, 2 публикациях в сборниках материалов всероссийских тектонофизических конференций, школы-семинара.

Связь работы с научными программами и грантами

Работа была выполнена в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН в рамках следующих проектов:

1. Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №114 «Современная эволюция складчатых областей Центральной Азии и сейсмический процесс», 2009-2011 гг.

2. Проекта СО РАН №90 «Кайнозойское горообразование Центральной Азии и сейсмичность: термохронологическое, сейсмотомографическое и фи-

зико-математическое моделирование» на 2012-2014 года, Программы фундаментальных исследований РАН, 2013-2020 гг.

3. Проекта РНФ «Изучение механизмов формирования и развития очагов разрушения в горных массивах как в многомасштабных нелинейных динамических системах с целью прогноза опасных катастрофических разрушений» №14-17-00198, 2014-2016 гг.

4. Проекта РНФ «Механизмы генерации и распространения медленных волн деформации. Их роль в формировании очагов катастрофических разрушений, включая сейсмические активизации», № 19-17-00122, 2019-2021 гг.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 124 страницы, включая 52 рисунка и 8 таблиц. В списке использованной литературы представлено 135 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность и степень разработанности выбранной темы исследования, приведены цель и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, показана теоретическая и практическая значимость полученных выводов и обоснована их достоверность, приведены сведения о личном вкладе и публикациях автора, апробации работы, ее связи с научными направлениями и краткое содержание работы.

В первой главе приведен литературный обзор по тематике диссертационной работы. Выполнен подробный анализ работ, касающихся проблематики медленных деформационных возмущений, распространяющихся как от границ литосферных плит, а также вдоль разломов. Также выполнен обзор работ по исследованию деформационной активности в складчатых областях исследуемого региона и их связи с глобальными тектоническими процессами.

Вторая глава посвящена математической постановке задачи и особенностям численной реализации. Обоснован выбор математической модели для данных задач, приведена общая система уравнений механики сплошных сред, включающая в себя законы сохранения, соотношения для деформаций и определяющие уравнения, которые совместно с механизмами деградации прочности описывают среду как типичную нелинейную динамическую систему, в которой возможны сверхбыстрые этапы эволюции напряженно-деформированного состояния, приводящие к локальным катастрофическим разрушениям геосреды (землетрясениям).

В работе рассмотрена современная модель геосреды, демонстрирующая, в том числе и хрупкие свойства, учитывающая различие значений её предельной прочности на растяжение и на сжатие. Модель также учитывает внутреннее трение и дилатансионные процессы. В настоящей работе используется комбинированная модель клеточных автоматов и уравнений механики деформируемого твёрдого тела для описания распространения медленных де-

формационных возмущений. Один из вариантов такой модели подробно описан в работах.

Численно решалась полная система уравнений механики деформируемого твёрдого тела, включающая законы сохранения массы, импульса и энергии

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho div(\bar{v}) = 0,\ \ \rho\frac{\partial v_i}{\partial t} = \rho F_i + \nabla_k \sigma_{ik},\ \ \rho\dot{E} = \sigma_{ik}\dot{\varepsilon}_{ik} \quad (1)$$

эволюционные определяющие уравнения первой группы

$$\dot{\sigma}_{ik} = \lambda\left(\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P\right)\delta_{ik} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ik}^T - \dot{\varepsilon}_{ik}^P) \quad (2)$$

В расчетах среда считается баротропной, а релаксация – мгновенной. Кроме того, модель хрупкой среды учитывает её чувствительность к давлению – предельная поверхность в пространстве напряжений включает первый инвариант напряжений

$$f(\sigma) = \frac{\alpha}{3}I_1 + I_2^{1/2} - Y. \quad (3)$$

Эволюционные уравнения второй группы

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^P = \left(S_{ij} + \frac{2}{3}\Lambda\left(Y - \frac{\alpha}{3}I_1\right)\delta_{ij}\right)\dot{\lambda}, \quad (4)$$

Функцию деградации прочности D (накопления повреждений во времени t) в нагружаемой среде предлагается взять в зависимости от накопленной средой деформации $\varepsilon_{тек}$ с учётом вида напряженного состояния в виде

$$D = \int_{t_0}^{t}\frac{\left[(\varepsilon_{тек}-\varepsilon_0)^2 + K\left(\varepsilon_{тек}-\varepsilon_0'\right)^2\right]}{\varepsilon_*^2 t_*}dt,\ \ \varepsilon_* = \varepsilon_{0*}(1+\gamma)^n,\ \ Y = Y_0(1-D), D \le 1. \quad (5)$$

Третья глава посвящена численному исследованию особенностей эволюции напряженно-деформированного состояния в складчатых областях Центральной и Юго-Восточной Азии в результате коллизионных процессов. Проведены численные эксперименты по определению и уточнению физико-механических параметров модельной геосреды. Проведены численные эксперименты в двумерной и трёхмерной постановках, в которых получены результаты, качественно согласующиеся с данными наблюдений течений среды по GPS и оценками напряжённого состояния. Изучен вклад подвижных инденторов в тектонические течения в Центральной и Юго-Восточной Азии (Индийской и Аравийской плит) и влияние коллизии Северо-Американской плиты на эволюцию деформационной активности в исследуемом регионе. Показано, что учёт коллизии со стороны Аравийской плиты существенно влияет на особенности тектонических течений в Центральной Азии, включая горный Алтай и Байкальскую рифтовую зону.

Согласно последним современным представлениям в земной коре, помимо жёстких блоков-плит также существуют более податливые зоны, которые характеризуются высокой концентрацией разломов и, соответственно, пониженными прочностными и упругими характеристиками. Эти области оказывают существенное влияние на локализацию деформационных процессов в земной коре и наблюдаемые тектонические течения. Разработаны достаточно продвинутые методики спецкартирования участков земной коры с выделением разноранговых деструктивных зон и других значимых элементов типа разломов и линеаментов.

В настоящей работе для решения поставленных задач за исходную структурную модель исследуемого региона была взята подобная схема зонно-блоковой делимости верхней части земной коры Центральной и Юго-Восточной Азии, составленная К.Ж. Семинским (рисунок 1).

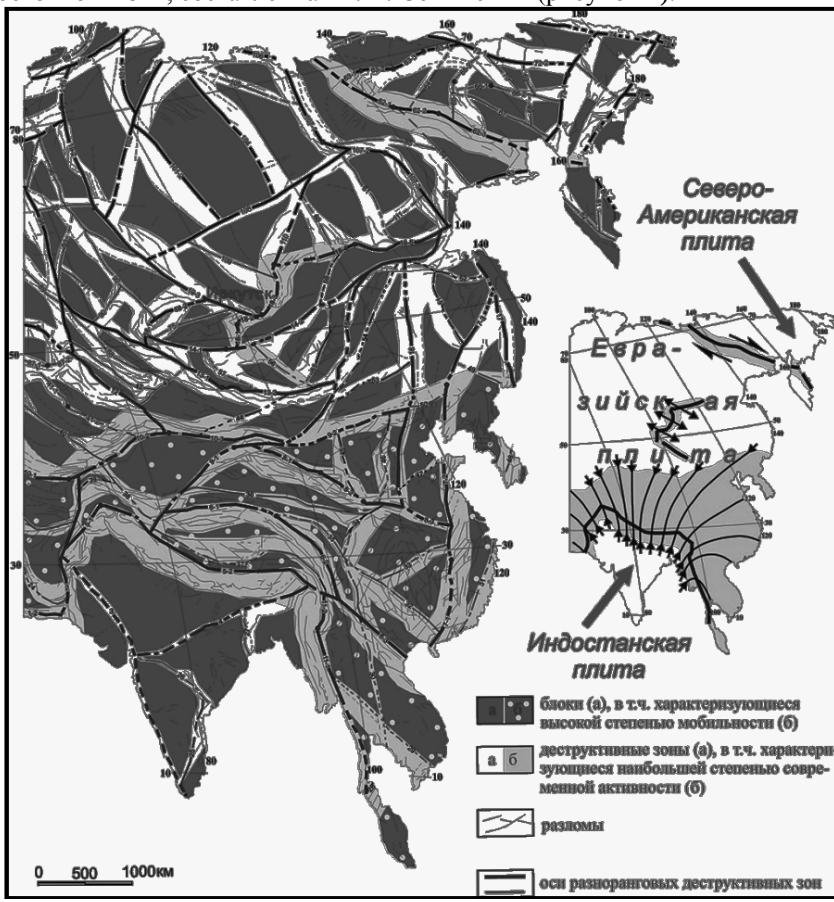


Рисунок 1 – Схема зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии по К.Ж. Семинскому

Такая структурная модель в сочетании с подобранными физико-механическими параметрами позволила численно изучить эволюцию напряженно-деформированного состояния и тектонические течения в геосреде, качественно соответствующие наблюдаемым скоростям горизонтальных смещений по данным GPS (рисунок 2).

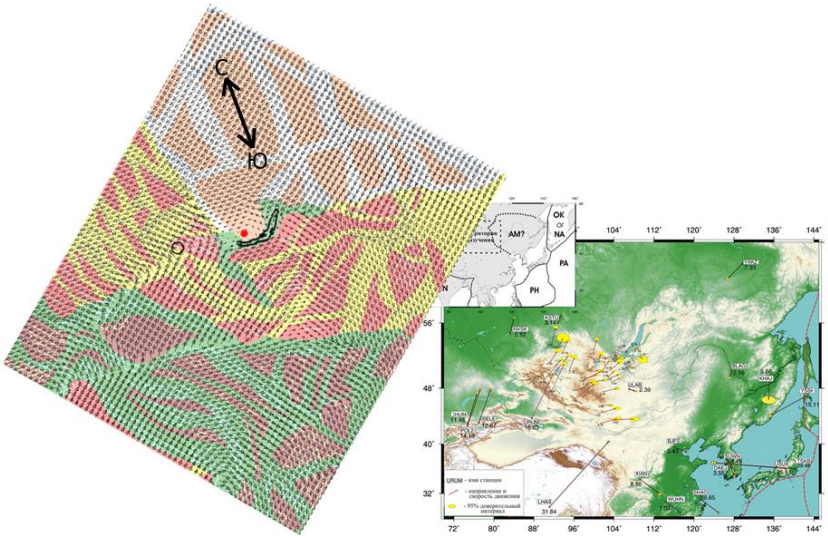


Рисунок 2 – Характер современных тектонических течений
с данными GPS наблюдений

Для расчетных полей смещений в областях от Казахстанского до Иранского щитов наблюдается заметное несоответствие расчётов с данными наблюдений. Это свидетельствует о необходимости учёта воздействия Аравийской плиты (в модели Молнара рассматривается только коллизия Индостана с Евразией).

Анализ результатов численного моделирования деформирования элементов земной коры Центральной и Юго-Восточной Азии выявил особенности распространения деформационной активности от области коллизии Индийской плиты на север и северо-восток Азии. Этот процесс развивается неоднородно во времени. В моделируемой системе, в соответствии с общим фундаментальным свойством эволюции нелинейных динамических систем, существует фаза локализации процесса во времени (режим обострения по Курдюмову), следующая после длительной квазистационарной фазы.

В моделируемой среде наблюдаются фазы локализации деформационного процесса во времени в объёмах от одной до нескольких расчётных ячеек, в которых скорость неупругой деформации существенно выше средней. Такие интенсивные деформационные процессы трактуются как крупные землетрясения.

На рисунке 3 представлено сравнение картин деформационной активности в численном моделировании (белые точки) и данных наблюдений за сейсмической активностью за последние 1904-2000 годы. Для удобства сравнения эти карты совмещены друг с другом. Расчётные сейсмические события очень хорошо совпадают с наблюдаемыми. Это свидетельствует об адекватности как структурной карты региона, так и математической модели.

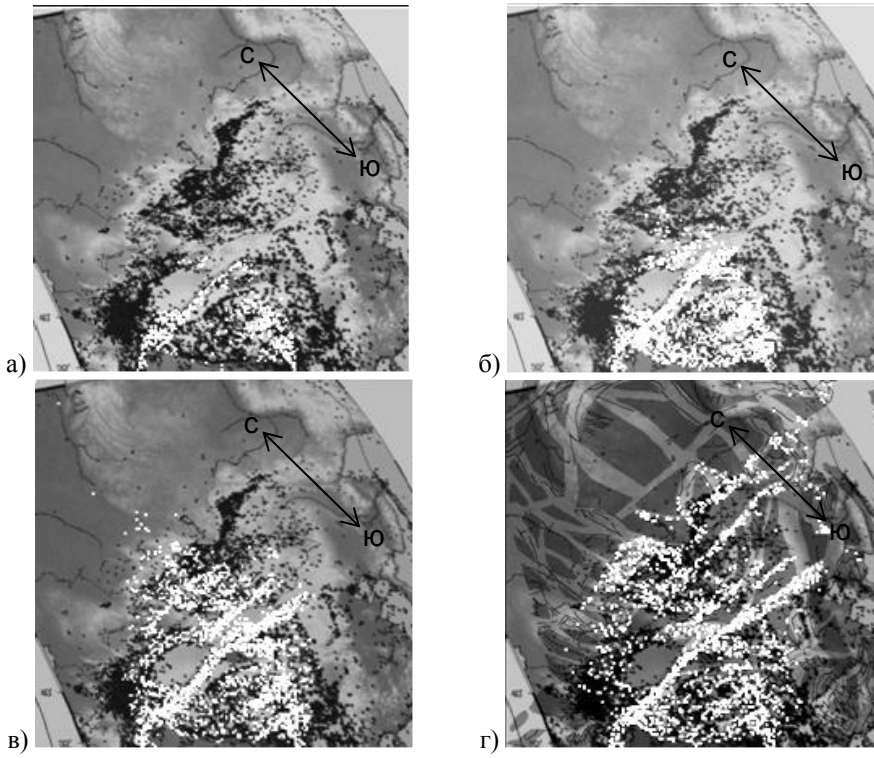


Рисунок 3 – Совмещённые карты: зонно-блоковой структуры Центральной Азии с разломами, карты региона с эпицентрами землетрясений (чёрные точки) и расчёт сейсмических событий (белые точки)

На рисунке 4 показан расчётный график повторяемости сейсмических событий.

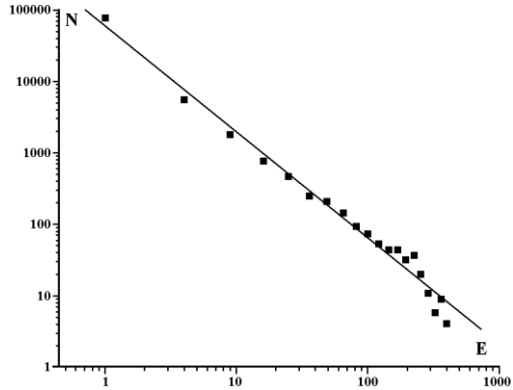


Рисунок 4 – Расчётный график повторяемости сейсмических событий

Характер графиков зависимости выделенной энергии на сверхбыстрых катастрофических этапах эволюции от количества событий в двойной логарифмической шкале является линейным. Эти результаты свидетельствуют о степенном характере распределения сейсмических событий и их соответствии фундаментальному закону повторяемости землетрясений Гуттенберга-Рихтера.

Последнее означает, что нагружаемая среда, как нелинейная динамическая система на данном этапе эволюции обладает свойством самоорганизованной критичности.

Вероятность высокоэнергетических расчётных сейсмических событий низкая (график повторяемости отклоняется от линейного вниз). Это полностью соответствует наблюдениям – Великое Японское землетрясение Тохоку было 9,0 баллов по шкале Рихтера, более мощные землетрясения в настоящее время не наблюдались.

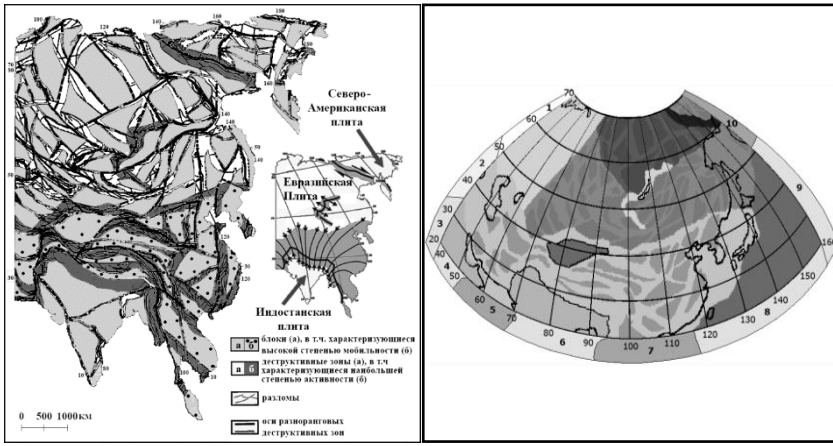
При численном моделировании тектонического и сейсмического процессов в сферических координатах существенно учесть коллизионный процесс со стороны Аравийской плиты. Расчёты показали, что она оказывает заметное влияние на напряженно-деформированное состояние и тектонические течения вплоть до Байкальской рифтовой зоны.

На рисунке 5а показана схема зонно-блоковой делимости верхней части литосферы по данным работы, также как и в плоских координатах, подразделенных на два типа неотектонических единиц – жёсткие домены (тёмный цвет) и податливые зоны (белый и серый тона).

На рисунке 5б приведена схематическая карта расчётной области с тремя группами зонно-блоковых областей, отвечающих различным плотностям сейсмогенных разрывов, и десятью упругими граничными блоками различной жёсткости, моделирующими коллизионные процессы со стороны Индийской и Аравийской плит на юге (жесткие инденторы 4 и 6 показаны стрелками на рисунке 5б), субдукцию Тихоокеанской плиты на востоке и сжатие со сдвигом на севере в районе хребта Черского со стороны Северо-Американской плиты. Физико-механические параметры в каждой группе зонно-блоковых областей задавались на основе результатов, полученных при решении задачи в двухмерной постановке.

Были проведены две группы численных экспериментов по выяснению вклада воздействия со стороны Аравийской плиты на тектонические течения в исследуемом регионе. В первом случае индентирование происходит со стороны Аравийской, Индийской и Северо-Американской плит, во втором-же Аравийская плита считалась неподвижной, т.е. её вклад не учитывался. В качестве сравниваемых величин было выбрано среднее отклонение полученных векторов смещений от данных наблюдений после стадии установившегося течения среды (10 % от времени расчёта). Углы между векторами, полученными из численного эксперимента и данными наблюдений для каждой станции занесены в таблицу 1. Вначале идут отклонения с учётом движения Аравийской плиты, затем без её учёта. Как видно, учёт коллизии со стороны

Аравийской плиты оказывает влияние (до десятков процентов) на характер течения геосреды практически во всём регионе.



а б

Рисунок 5 – Схема зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии по К.Ж. Семинскому: карта расчётной области с тремя группами зонно-блоковых областей – (а) и с граничными упругими блоками – (б)

Таблица 1 – Учёт вклада идентирования Аравийской плиты на тектонические течения в Центральной и Юго-Восточной Азии

Обозначение станции	Ближайший крупный город	Отклонение расчётных векторов полей смещений от данных GPS с учётом коллизии Аравии, град	Отклонение расчётных векторов полей смещений от данных GPS без учёта коллизии Аравии, град
NVSK	Новосибирск	20,69016	29,34711
KSTU	Красноярск	3,747853	8,255235
URUM	Урумчи	8,639541	12,49491
LHAS	Лхаса	10,80831	7,783826

В четвёртой главе представлена математическая модель совместной генерации как обычных звуковых волн напряжений, так и медленных деформационных возмущений, скорости которых на 5-7 порядков ниже скорости звука. Проведён численный анализ процессов пространственно-временной локализации неупругой деформации и особенностей формирования медленных деформационных возмущений. Модель описания особенностей формирования медленных деформационных фронтов и особенностей их распространения отработана на моделировании экспериментально хорошо изученных деформационных фронтов в металлических образцах при их растяжении и при

сжатии образцов горных пород. Также проведён численный эксперимент с моделью геосреды, включающей два жёстких блока и разлом, вдоль которого распространяется деформационный фронт. На примере моделирования деформационных волн в металлах показана существенная роль этих деформационных процессов в образовании очагов макроскопического разрушения. Примеры расчетов для геосред показали возможность будущего использования разрабатываемой методики для изучения медленных деформационных возмущений в геосредах и прогнозирования сейсмических событий в регионах, обладающих обширной разломной сетью. Ретроспективный анализ сейсмического процесса, сопровождавшего великое Японское землетрясение Тохоку (11.03.2011), показал, что за 5 дней до землетрясения в формирующийся очаг землетрясения по разломам мигрировали сейсмические активизации со скоростями 5-10 км/день.

Реальные скорости медленных деформационных процессов на 5-7 порядков ниже скорости звука. Для того, чтобы одновременно можно было вести расчёт эволюции напряженно-деформированного состояния и медленных деформационных возмущений, применён метод сжатия времени. Так как скорости деформационных возмущений пропорциональны скорости их генерации (в опытах Л.Б. Зуева скорость деформационной волны приблизительно в двадцать раз выше скорости движения подвижного захвата испытательной машины), то в численных экспериментах скорость нагружения на 4-5 порядков выше, чем в натурных экспериментах. Таким образом, масштаб отношения реального времени нагружения к расчётному обычно разнится на эти 4-5 порядков в расчётах для сеток порядка 400×40×20 ячеек. В расчётах также соблюдено выполнение условия «медленных процессов», т.е. скорость расчётного деформационного процесса является существенно более низкой, чем скорость информационного обмена в среде. Действительно, скорость упругих волн напряжений составляет несколько км/сек. При расчётной скорости нагружения порядка 1 м/с и общей деформации, например, в 1% волны напряжений успеют пройти через образец 10^2-10^3 раз и более, что обеспечит информационный обмен в среде. Таким образом, модельная среда в вычислительном эксперименте, как и в реальности, оказывается способной к самосогласованному кооперативному отклику на нагружение, т.е. к самоорганизации.

На рисунке 6а представлена X-t диаграмма распространения расчётных фронтов пластической деформации при скорости движения захвата 1 м/с в сравнении с экспериментами работы (рисунок 6б). В численном эксперименте положение фронта определялось по средней линии образца при скорости движения захвата 1 м/с.

Как и в экспериментах, в расчётах фронты локализованной пластической деформации формируются вблизи захватов и распространяются по образцу со скоростями, пропорциональными скорости движения захватов. Они стекаются в область формирования будущей шейки.

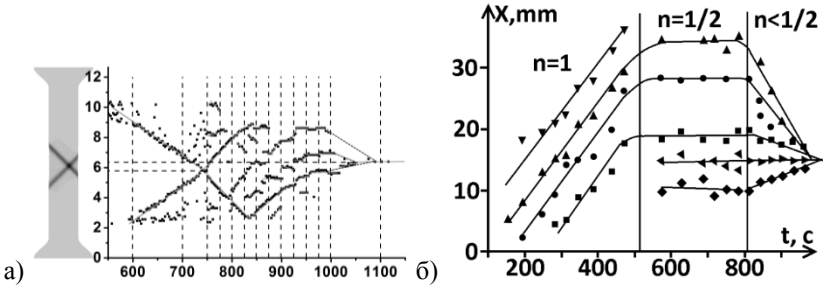


Рисунок 6 – Пространственно-временное распределение фронтов локализованной пластической деформации, слева показан образец на стадии активного формирования шейки (а), движение доменов локализованной пластичности в ванадиевом сплаве на стадиях линейного деформационного упрочнения (n=1), параболической (n=1/2) и предразрушения (n<1/2) в экспериментах (б)

Проведены тестовые расчёты, моделирующие процесс активизации разлома медленными деформационными фронтами. На рисунке 7 показана схема, состоящей из двух блоков (1,2) квазихрупкой геосреды, по физико-механическим параметрам отвечающим параметрам осадочного чехла, и разлома 3, прочностные характеристики которого в 5 раз ниже чем в блоках 1, 2.

Такая модельная среда нагружалась сжатием. Скорость сжатия составляла 0,2 м/сек, при размерах всего геоблока 1500×1000 м. Такое нагружение обеспечило среднюю деформацию геоблока в 1% за расчётное время 60 с. За это время сформировавшаяся на границе разлома А деформационная волна распространилась через весь разлом. Таким образом, расчётная скорость деформационной волны в разломе приблизительно равна V=1200 м/60 с=20 м/с. Согласно данным работ, в которых были оценены скорости деформационных волн в разломах по наблюдениям быстрой миграции сейсмической активности, эти скорости оценены в 1-10 км/сут ≈ $1{,}16\times10^{-2}$ - $11{,}6\times10^{-2}$ м/с.

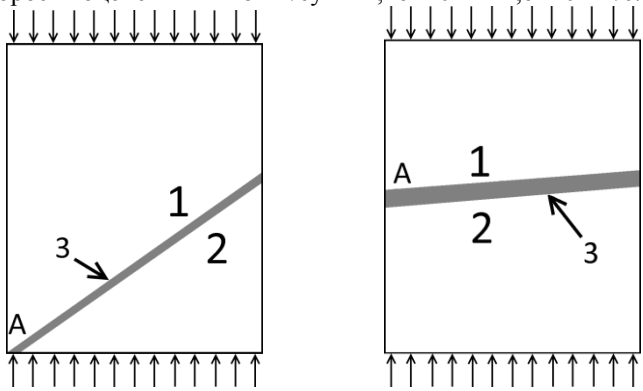


Рисунок 7 – Схемы нагружаемой геосреды

Подобные наблюдения были сделаны на различных обширных территориях как перед сильными землетрясениями, так и после, на основе фиксации радоновых, электрокинетических и гидрогеодинамических сигналов. К подобным оценкам приводят натурные эксперименты по возбуждению волн деформаций и напряжений при вибрационном и взрывном инициировании подвижек в зоне разлома. Если принять коэффициент сжатия расчётного времени по отношению к реальному равным ≈ 500 для данного пространственно-временного масштаба, то получим оценку скорости в реальном процессе равной 4×10^{-2} м/с. Эта оценка очень хорошо коррелирует с данными наблюдений. Динамика для двух случаев ориентации разлома по отношению к направлению сжатия показана на рисунке 8 и рисунке 9.

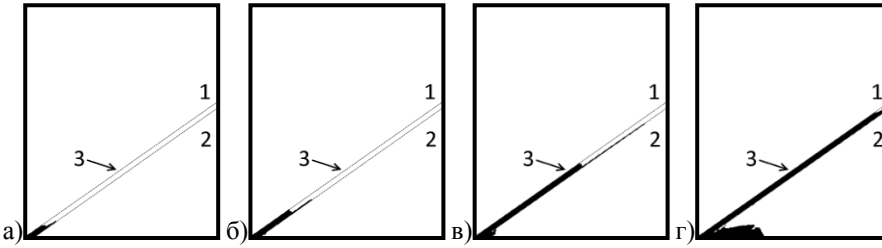


Рисунок 8 – Динамика фронта неупругой деформации в разломе при сжатии геосреды

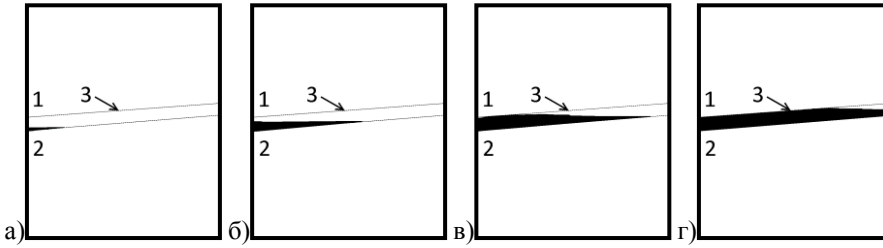


Рисунок 9 – Динамика фронта неупругой деформации в пологом разломе при сжатии геосреды

Таким образом, во всех расчётах, как и в наблюдениях, мы получаем целый спектр медленных деформационных фронтов разных масштабов, которые движутся с различными скоростями в зависимости от условий их генерации.

В заключении содержатся основные результаты и выводы.

В диссертационной работе численно исследована эволюция напряжённо-деформированного состояния в складчатых областях в Центральной и Юго-Восточной Азии в двухмерной (плоской и сферической постановке). Численно смоделировано распространение сейсмических активизаций от области

коллизии Индостана и Аравии в изучаемом регионе в целом, а также в Байкальской рифтовой зоне.

Представлен литературный обзор по проблематике медленных деформационных фронтов, а также проведено численное исследование процессов их распространения на примере металлов и геосред. Выявлена существенная роль процессов релаксации напряжений на характер распространения деформационного фронта.

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Показано, что модифицированная структурная схема зонно-блоковой делимости совместно с определёнными физико-механическими параметрами позволяет получить тектонические течения и смоделировать тектонический процесс, хорошо согласующиеся с данными наблюдений.

2. Проведена проверка гипотезы Монлара-Добрецова-Буслова об определяющей роли Индостана в развитии тектонических течений в Центральной и Юго-Восточной Азии. Подтвержден определяющий вклад Индостана в тектонические течения. Показано, что также необходимо учитывать влияние Аравийской плиты на тектнические и сейсмические процессы в Центральной Азии. Для некоторых регионов (Казахстан, Новосибирск, Урумчи) это влияние существенно.

3. Показано, что хотя коллизия со стороны Индостана и вносит существенный вклад в тектонические течения Центральной и Юго-Восточной Азии, однако, расчетный деформационный процесс в глубине континента, в т.ч. в Байкальской рифтовой зоне, вычисленный в предположении, что он обусловлен только коллизионными процессам на границах плит, выражен значительно слабее реального. Амплитуды расчётных полей смещений оказались существенно ниже наблюдаемых. Наблюдаемый деформационный процесс в этих областях не может быть объяснен только коллизионными процессами на границах Евразии и Индостана и Аравии.

4. Характер графиков зависимости выделенной энергии на сверхбыстрых катастрофических этапах эволюции от количества событий в двойной логарифмической шкале является линейным. Эти результаты свидетельствуют о степенном характере распределения расчетных сейсмических событий и их соответствии фундаментальному закону повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера.

5. Показано, что от области коллизии Индийской плиты наблюдается два потока течения, в восточном и северо-восточном направлении, что совпадает с наблюдениями. При этом отчётливо проявляются противотоки, двигающиеся в западном и южном направлениях.

6. Расчётами подтверждено, что воздействие Северо-Американской плиты на тектонические течения в Центральной и Юго-Восточной Азии мало и ограничивается влиянием не более 200-500 км.

7. Разработан и обоснован вариант физико-математической модели совместной генерации и распространения в упругопластической среде, как

обычных звуковых волн напряжений, так и медленных автосолитонных возмущений, скорости которых на 5-7 порядков ниже скорости звука.

Показано, что эти медленные деформационные возмущения активно участвуют в формировании очагов разрушения, являясь эффективным механизмом переноса и перераспределения энергии в нагружаемой среде.

Также показано, что механизмом образования и эволюции разломных зон является медленная динамика.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Макаров П. В. Модель землетрясения как сверхбыстрый катастрофический этап эволюции нагружаемой геосреды / П. В. Макаров, И. Ю. Смолин, Е. П. Евтушенко, **А. Ю. Перышкин** // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – Специальный выпуск. – С. 29–35. – 0,44 / 0,11 а.л.

2. Макаров П. В. Численное моделирование разрушение хрупких и квазихрупких материалов и сред / П. В. Макаров, М. О. Еремин, **А. Ю. Перышкин** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 74–76. – 0,19 / 0,06 а.л.

3. Макаров П. В. Моделирование «медленных движений» – автоволн неупругой деформации в пластичных и хрупких материалах и средах / П. В. Макаров, **А. Ю. Перышкин** // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 32–46. – 1,06 / 0,53 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Makarov P. V. Slow motions as inelastic strain autowaves in ductile and brittle media / P. V. Makarov, **A. Yu. Peryshkin** // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 20, is 2. – P. 209–221. – DOI: 10.1134/S1029959917020114.

4. Макаров П. В. Медленные деформационные фронты. Модель и особенности распространения / П. В. Макаров, Ю. А. Хон, **А. Ю. Перышкин** // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 755–769. – DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0370. – 0,94 / 0,31 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Makarov P. V. Slow deformation fronts: Model and features of distribution / P. V. Makarov, A. Yu. Khon, **A. Yu. Peryshkin** // Geodynamics & Tectonophysics. – 2018. – Vol. 9, № 3. – P. 755–769.

Статьи в электронных сборниках материалов конференций, представленных в издании, входящем в Web of Science:

5. Cherepov A. A. A possibilities of dangerous dynamic phenomena prediction in a rock mass surrounding the excavations [Electronic resource] / A. A. Cherepov, M. O. Eremin, **A. Yu. Peryshkin**, P. V. Makarov // AIP conference proceedings. – 2014. – Vol. 1623 : International Conference on Physical Mesomechanics of Multilevel Systems 2014. Tomsk, Russia, September 03–05, 2014. – P. 87–90. – URL:

https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4898889 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.4898998. – 0,25 / 0,06 а.л.

6. **Peryshkin A. Yu.** Numerical simulation of tectonic plates motion and seismic process in Central Asia [Electronic resource] / A. Yu. Peryshkin, P. V. Makarov, M. O. Eremin // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623 : International Conference on Physical Mesomechanics of Multilevel Systems 2014. Tomsk, Russia, September 03–05, 2014. – P. 487–490. – URL: https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4898988 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.4898988. – 0,25 / 0,08 а.л.

7. Eremin M. O. Modelling of processes of damage accumulation and multiscale fracture in rock mass with excavations at mining [Electronic resource] / M. O. Eremin, P. V. Makarov, **A.Yu. Peryshkin**, E. P. Evtushenko, S. A. Orlov // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. Tomsk, Russia, September 21–25, 2015. – Article number 020048. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4932738 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.4932738. – 0,25 / 0,05 а.л.

8. Makarov P. V. Modeling «slow movements»–Auto waves of non-elastic deformation in ductile and brittle materials and media [Electronic resource] / P. V. Makarov, **A. Yu. Peryshkin** // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. Tomsk, Russia, September 21–25, 2015. – Article number 020136. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4932826 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.4932826. – 0,25 / 0,13 а.л.

9. Makarov P. V. Fundamental basics for prognosis methods of dangerous dynamic phenomena in rock mass with excavations [Electronic resource] / P. V. Makarov, M. O. Eremin, **A. Yu. Peryshkin** // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. Tomsk, Russia, September 21–25, 2015. – Article number 020135. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4932825 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.4932825. – 0,25 / 0,08 а.л.

10. Makarov P. V. Mathematical model and numerical simulation of slow deformation waves in the earth's crust structural elements [Electronic resource] / P. V. Makarov, **A. Yu. Peryshkin** // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1783 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structure. Tomsk, Russia, September 19–23, 2016. – Article number 020146. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4966439 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.4966439. – 0,25 / 0,13 а.л.

11. Makarov P. V. The role of slow deformation waves in the formation of fracture foci [Electronic resource] / P. V. Makarov, **A. Yu. Peryshkin** // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785 : 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. Ekaterinburg, Russia, May 16–20, 2016. – Article number 030013. – 5 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4967034 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.4967034. – 0,25 / 0,12 а.л.

12. Makarov P. V. Numerical study of the process of generation and propagation of slow deformation waves in elastic-plastic media [Electronic resource] / P. V. Makarov, **A. Yu. Peryshkin** // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053 : 12th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2018. Ekaterinburg, Russia, May 21–25, 2018. – Article number 040056. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5084494 (access date: 12.09.2019). – DOI: 10.1063/1.5084494. – 0,25 / 0,13 а.л.

Публикации в прочих научных изданиях:

13. Еремин М. О. Моделирование современной эволюции складчатых областей центральной Азии и геодинамической обстановки в Байкальской рифтовой зоне и в Алтае-Саянской складчатой области / М. О. Еремин, П. В. Макаров, **А. Ю. Перышкин** // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле : материалы докладов Третьей тектонофизической конференции в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, 08–12 октября 2012 г. – Москва, 2012. – Т 1. – С. 280–284. – 0,31 / 0,1 а.л.

14. Еремин М. О. Численное моделирование тектонических течений и сейсмического процесса в Центральной Азии / М. О. Еремин, **А. Ю. Перышкин**, П. В. Макаров // Современная тектонофизика. Методы и результаты : материалы Третьей молодежной тектонофизической школы-семинара. Москва, 14–18 октября 2013 г. – Москва, 2013. – Т 1. – С. 94–104. – 0,25 / 0,08 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета
Заказ № 6077 от «18» февраля 2020 г. Тираж 100 экз.
г. Томск Московский тр.8, тел. 53-15-28