

На правах рукописи

Ахметов

Ахметов Аян

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
УЧАСТКОВ ЛИТОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРСКОГО КРАТОНА**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Смолин Игорь Юрьевич

Официальные оппоненты:

Зелепугин Сергей Алексеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, научно-исследовательский отдел структурной макрокинетики, лаборатория математического моделирования физико-химических процессов в гетерогенных системах, ведущий научный сотрудник;

Немирович-Данченко Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», научно-инжиниринговый центр «Доверенные системы на основе АПК», ведущий научный сотрудник;

Пантелеев Иван Алексеевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория цифровизации горнотехнических процессов «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук», заведующий лабораторией.

Защита состоится 23 сентября 2022 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного «НИ ТГУ 01.02», созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 2 ТГУ, аудитория 428).

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: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/fa6f84b0-a347-4d0e-8753-2efb6c65e99a>

Автореферат разослан « ____ » августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Усанина Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Всестороннее исследование процессов, происходящих в литосфере Земли, важно для добычи полезных ископаемых и обеспечения требований природной и техногенной безопасности. Оно включает, в том числе, изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) участков земной коры и верхней мантии. С развитием наук о Земле в XX веке удалось изучить особенности глубинной структуры земной коры и верхней мантии на основе геофизических и геодинамических исследований, и расширить сферу понимания геотектонических процессов, таких как субдукция, коллизия, сдвиги и растяжения, которые приводят к появлению землетрясений, возникновению вулканов, и других природных явлений. Изучение подобных явлений, происходящих в литосфере, на современном этапе развития науки проводится на стыке разных научных дисциплин, и представляет собой комплексное научное исследование, требующее знание методов и подходов геофизики, геодинамики и тектоники, геомеханики, механики деформируемого твердого тела (МДТТ), вычислительной математики. Поэтому актуальной задачей МДТТ является разработка моделей и методов для расчета НДС литосферы и ее эволюции.

В настоящее время компьютерное моделирование является связующим звеном между МДТТ и смежными научными областями, которое позволяет оценить НДС различных объектов, включая литосферу Земли. Для этого, создается множество математических моделей, основанных на подходе механики сплошных сред. Необходимость учета разнообразных физических и геологических свойств элементов земной коры и верхней мантии, а также разных природных факторов приводит к тому, что модели становятся более сложными. В частности, многие исследователи используют комбинированные термо-вязко-упруго-пластические модели (Т.В. Gerya, Е.В. Burov, S. Sobolev, А. Koptev, О.Э. Мельник). Такие модели позволяют описать совместную эволюцию земной коры и верхней мантии, так как известно, что мантийный слой оказывает большое влияние на земную кору. Численное решение задач с использованием таких моделей является чрезвычайно трудоемким, так как приходится анализировать большую мощность литосферы с подробной разностной сеткой. Поэтому в случае исследования глубинных структур верхней части литосферы, где земная кора не испытывает сильного влияния мантийного слоя и нет активных геодинамических процессов, применяются упругопластические модели, в которых учитывается структурная неоднородность геосреды (Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев, А.И. Чанышев, С.Н. Коробейников и др.).

Численное моделирование НДС геологических объектов является важной задачей для понимания геомеханических процессов, происходящих в литосфере Земли, и их влияния на эволюцию земной коры и верхней мантии, а также процессов образования и метаморфизма горных пород. Особый интерес среди участков земной коры вызывает Сибирский кратон, который выделяется геологическими и геофизическими особенностями, а также является важным объектом с точки зрения экономического потенциала для Российской Федерации.

Степень разработанности темы исследования. Развитию научных представлений о процессах деформации и распределения напряжений в литосфере Земли посвящены работы В.Н. Николаевского, Ю.Л. Ребецкого, П.В. Макарова, Ю.П. Стефанова, А.И. Чанышева, А.Ф. Ревуженко, С.В. Лаврикова, О.П. Полянского, С.Н. Коробейникова, и др., в которых используются методы и подходы МДТТ с применением компьютерного моделирования и аналитических методов. В тоже время необходимо выделить зарубежные научные группы во главе с Т.В. Геря и Е.Б. Бутовым, которые для исследования эволюции литосферы Земли в рамках геодинамического моделирования используют подходы и методы не только МДТТ, но и механики вязкой жидкости. В работах научной группы П.В. Макарова развиваются подходы для описания геодинамических процессов в литосфере на основе законов МДТТ с использованием идей и подходов физической мезомеханики и нелинейной динамики, развитых в работах В.Е. Панина, И. Пригожина, Г. Хакена и др.

В данной работе модель упругопластической среды Друкера – Прагера – Николаевского была адаптирована к исследованию НДС литосферы с помощью прочностной модели «*cratonic jelly sandwich*», которая широко используется зарубежными геомеханиками.

Цель и задачи работы. Цель данной работы – выполнить анализ напряженно-деформированного состояния элементов литосферы в выбранных участках зон растяжения и коллизии на территории Сибирского кратона на основе численного моделирования.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Создание моделей структуры земной коры и верхней мантии Сибирского кратона на основе геофизических данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), представленных в виде геологических профилей «Кимберлит – 1981», «Кратон – 1980», «Шпат – 1983» и «Батолит – 1982».

2. Создание математической модели участков литосферы, позволяющей провести численное исследование НДС в них в ходе геотектонических процессов на основе уравнений упругопластической среды с параметрами, которые учитывают изменения физико-механических свойств элементов литосферы с глубиной.

3. Выполнение тестовых расчётов для выбора параметров математической модели, описывающих изменения физико-механических свойств элементов земной коры и верхней мантии.

4. Численное моделирование и анализ НДС участков земной коры и верхней мантии на территориях Енисейского кряжа и Мирнинско-Айхайльской седловины, находящихся в условиях горизонтального сжатия, Вилуйской и Тунгусской синеклиз, находящихся в условиях горизонтального растяжения.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые были построены модели структуры геологических объектов Сибирского кратона на основе анализа геофизических данных геологических профилей «Кимберлит – 1981», «Кратон – 1980», «Шпат – 1983» и «Батолит – 1982».

2. Упругопластическая модель Друкера – Прагера – Николаевского с неассоциированным законом течения была модифицирована для анализа НДС участков литосферы применением модели «cratonic jelly sandwich» для описания изменения прочностных свойств элементов земной коры и верхней мантии с глубиной.

3. Получены новые результаты о НДС глубинных структур земной коры и верхней мантии на территории Сибирского кратона. Проанализированы особенности локализации пластической деформации и распределений параметров напряженного состояния в регионах, где проходят выбранные геологические профили, которые сопоставлены с местоположениями полезных ископаемых на территории Сибирского кратона.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическое значение имеют построенные физико-математические модели и определения значений их параметров, которые могут быть использованы для получения новых знаний о НДС участков литосферы в разных геодинамических обстановках.

Полученные в ходе компьютерного моделирования результаты могут найти практическое применение в геологии и петрологии для оценки современной геологической картины исследуемых объектов и анализа возможности фазовых превращений в горных породах в различных участках исследуемых регионов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-31-90034 «Анализ напряженно-деформированного состояния участков Сибирской платформы и её обрамления с учётом тепловых потоков», проекта № 53 «Численное моделирование плавления в земной коре и литосфере при растяжении и коллизии (на примере Сибирской платформы и её обрамления)» Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования на 2018–2020 гг.», и проекта FWRW-2019-0035 «III.23.2.12 Многокомпонентные материалы и структуры, в том числе синтезируемые аддитивными методами: разработка связанных термо-механо-химических моделей, изучение функциональных свойств и особенностей механического поведения при интенсивных внешних воздействиях» государственного задания ИФПМ СО РАН на 2019–2021 годы.

Методология и методы исследования. Методология данного исследования основана на учете структуры объектов исследования с использованием экспериментальных данных и применении подходов МДТТ к изучению геологических объектов. В соответствии с поставленными в работе задачами основным методом исследования является численное моделирование. Расчеты НДС участков земной коры и верхней мантии выполнены с использованием конечно-разностного метода М.Л. Уилкинса. Для обработки результатов моделирования применялись следующие свободно распространяемые программы ParaView, Gnuplot и GNU Image Manipulation Program (GIMP).

Положения, выносимые на защиту:

1. Модели структуры элементов земной коры и верхней мантии, содержащие данные о структуре и физико-механических свойствах реальных геологических областей Сибирского кратона, полученные на основе данных геологических

профилей «Кимберлит – 1981», «Кратон – 1980», «Шпат – 1983» и «Батолит – 1982».

2. Математическая модель упругопластической геосреды с параметрами, которые учитывают изменения механических свойств элементов литосферы в зависимости от глубины на основе прочностной модели «cratonic jelly sandwich».

3. Новые результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния геологических областей на территории Сибирского кратона, находящихся в разных геодинамических условиях, на основе разработанных моделей, свидетельствующие о возникновении областей локализации пластических деформации в местах, где обнаружены разломы и залежи полезных ископаемых в слоях земной коры.

Степень достоверности результатов. Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректностью математической постановки решаемых задач, их физической обоснованностью, выбором подходящего численного метода решения и выполнением тестовых расчётов; непротиворечивостью полученных результатов и их соответствием в предельных случаях теоретическим результатам, известным из литературы.

Апробация результатов исследования. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях и семинарах: XVIII Всероссийском семинаре «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (Новосибирск, 2018), VIII Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2018» (Томск, 2018), XXIII Международном симпозиуме студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» имени академика М.А. Усова, посвященном 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина (Томск, 2019), XXI Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2019), Пятой международной конференции «Триггерные эффекты в геосредах» (Москва, 2019), Пятой тектонофизической школе-семинаре (Москва, 2019), IX Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2019» (Томск, 2019), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2019), Международном междисциплинарном симпозиуме «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2020), Пятой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН (Москва, 2020), X Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020» (Томск, 2020), Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2021), Всероссийском совещании с участием приглашенных исследователей из других стран «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ», посвященное памяти профессора С.И. Шермана (Иркутск, 2021), Международной конференции «Физическая мезомеханика.

Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2021), Всероссийской конференции молодых учёных-механиков YSM–2021 (Сочи, 2021).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 3 статьи в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus, 2 статьи в российском научном журнале, входящем в Scopus), 8 статей в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus, 15 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Личный вклад соискателя. Автор самостоятельно подготовил обзор литературных данных по теме диссертации, построил модели структуры участков литосферы, выполнил модификацию расчетной программы для использования прочностной модели «cratonic jelly sandwich», провел компьютерное моделирование и проанализировал полученные данные. Совместно с научным руководителем были сформулированы цель, задачи и основные положения диссертационной работы, проводилось обсуждение полученных результатов и написание статей на их основе. Все результаты, представленные в диссертации, получены самим автором.

Диссертация состоит из общей характеристики диссертационной работы (введения), четырех глав основной части, заключения, списка литературы (170 наименований), содержит 80 рисунков, 6 таблиц, всего 139 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи работы, раскрыта новизна полученных результатов, их научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, а также аргументирована обоснованность и достоверность результатов и выводов, дана краткая характеристика разделов диссертации.

Первая глава посвящена научному обзору. В ней представлена геологическая информация по исследуемым областям на территории Сибирского кратона. В частности, проанализированы такие геологические области, как Енисейский кряж, Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция (КИП), Мирнинско-Айхальская седловина и Тунгусская синеклиза. На основе геофизических данных профилей «Шпат – 1983», «Батолит – 1982», «Кратон – 1980», «Кимберлит – 1981», которые были выполнены в рамках работ по комплексному исследованию земных недр Сибири, были проанализированы глубинные структуры земной коры и верхней мантии. При этом, в качестве геофизических данных в этих профилях представлены скорости продольных и поперечных волн, расположения границ кристаллического фундамента, Мохо, внутренних слоёв земной коры, а также разломов. Данные по плотности горных пород в представленных областях были получены из статей научной группы во

главе с И.М. Артемьевой и других литературных данных. На основе совокупности этих данных, были вычислены упругие свойства слоёв литосферы.

Для выяснения типов геодинамической обстановки в выбранных геологических областях с целью задания граничных условий при моделировании были проанализированы результаты исследований Н.Л. Добрецова и М.М. Буслова, посвященных горным системам Центральной Азии, как результату коллизии Евразийской плиты с Индийской плитой, работы Ю.Л. Ребецкого и Л.А. Сим, в которых на основе анализа сейсмических данных и информации о плоскостях скольжения разломов получены данные о напряженном состоянии исследуемых областей, и результаты численных исследований М.О. Еремина и А.Ю. Перышкина, в которых получены данные о видах напряженного состояния и тектонических течениях в Сибирском кратоне в целом и выбранных геологических объектов в частности. В результате было выявлено, что Енисейский кряж и Мирнинско-Айхальская седловина находится в условиях сжатия, Якутско-Вилуйская КИП и Тунгусская синеклиза – в условиях растяжения вдоль выбранных геологических профилей.

Для описания прочностных свойств слоёв литосферы была проанализирована серия работ научной группы во главе с Е.Б. Буровым¹ и выбрана модель «*cratonic jelly sandwich*», которая подходит для анализа НДС континентальных участков литосферы и удовлетворяет условиям геологических обстановок на территории Сибирского кратона.

Вторая глава посвящена физической постановке задачи. В результате длительных геологических изысканий было установлено, что Сибирский кратон представляет собой огромную геологическую область с неоднородными структурами горных пород. Ввиду большой протяженности Сибирского кратона в его внутренних областях выделяется ряд геологических объектов, на территориях которых наблюдаются разные геодинамические процессы: коллизии, растяжения и сдвиги.

Конкретные данные по разным областям Сибирского кратона можно получить из имеющихся сведений по геологическим профилям. В частности, для Якутско-Вилуйской КИП, Мирнинско-Айхальской седловины и Тунгусской синеклизы можно воспользоваться двумя геологическими профилями «Кратон – 1980» и «Кимберлит – 1981», которые проходят по северным и южным частям выбранных областей соответственно. Особенность расположений этих геологических профилей состоит в том, что они проходят по территориям Лено-Вилуйской и Лено-Тунгусской нефтегазоносных провинций, которые являются одними из крупнейших месторождений нефти и газа в Сибири. Положения геологических профилей «Батолит – 1982» и «Шпат – 1983», проходящих в северной и центральной частях Енисейского кряжа, соответствуют крупным неразведанным месторождениям золота. Все упомянутые профили показаны на рисунке 1.

¹Burov E.B. Plate Rheology and Mechanics / E.B. Burov // Treatise on Geophysics. – Vol. 6. – Amsterdam: Elsevier, 2015. – P. 95–152.

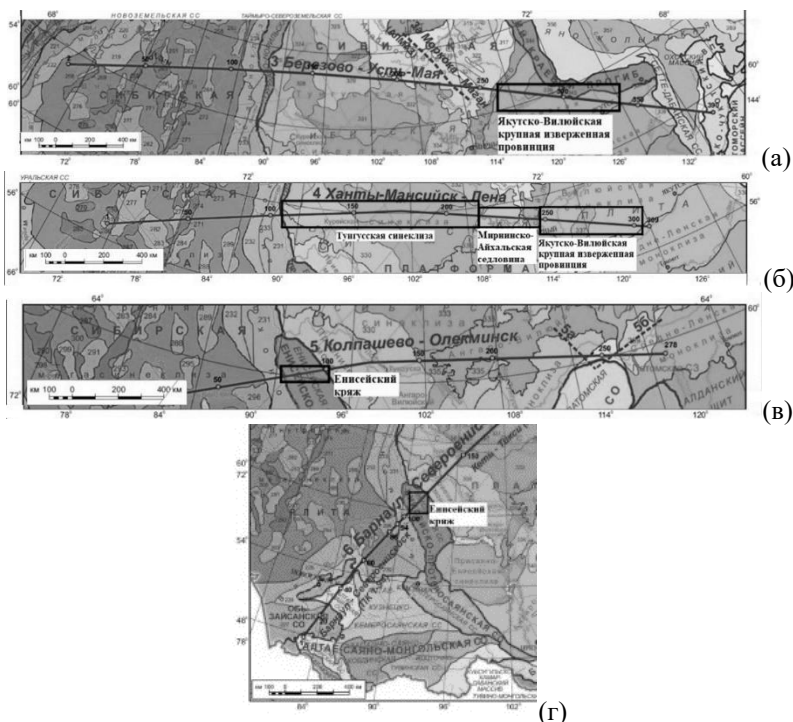


Рисунок 1 – Положения геологических профилей «Кратон – 1980» (а), «Кимберлит – 1981» (б), «Батолит – 1982» (в), «Шпат – 1983» (г)²

Пример геофизических данных для части профиля «Кимберлит–1981» представлен на рисунке 2 (а), а на рисунке 2 (б) представлена модель структуры Якутско-Вилуйской КИП, которая была построена на основе данных рисунка 2 (а). Оценивая геофизические данные на рисунке 2 (а), полученные методом ГСЗ, можно сделать вывод о том, что линии границ кристаллического фундамента (К) и Мохо (М) хорошо выделены и имеют четкие контуры, также выделяются слои земной коры, которые различаются по значениям скоростей продольных и поперечных волн. Исходя из этих данных, можно получить слоистые модели глубинной структуры земной коры и верхней мантии выбранных геологических объектов. Подобным образом были построены двумерные модели структуры Якутско-Вилуйской КИП, Тунгусской синеклизы, Мирнинско-Айхальской седловины и Енисейского кряжа, показанные на рисунках 3 и 4. Разными оттенками серого цвета на них показаны слои литосферы. Представленные геологические объекты имеют ряд особенностей. В модели структуры Якутско-

² Павленкова Н.И. Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами / Н.И. Павленкова, Г.А. Павленкова. – М. : ГЕО КАРТ: ГЕОС, 2014. – 192 с.

Вилуйской КИП наблюдается сильная деформация кристаллического фундамента, который оседает на глубину от 3 до 10 км, при этом земную кору пробивают разломы, которые, начинаясь от уровня кристаллического фундамента, доходят до границы Мохо. Данные разломы образуют блочную структуру земной коры.

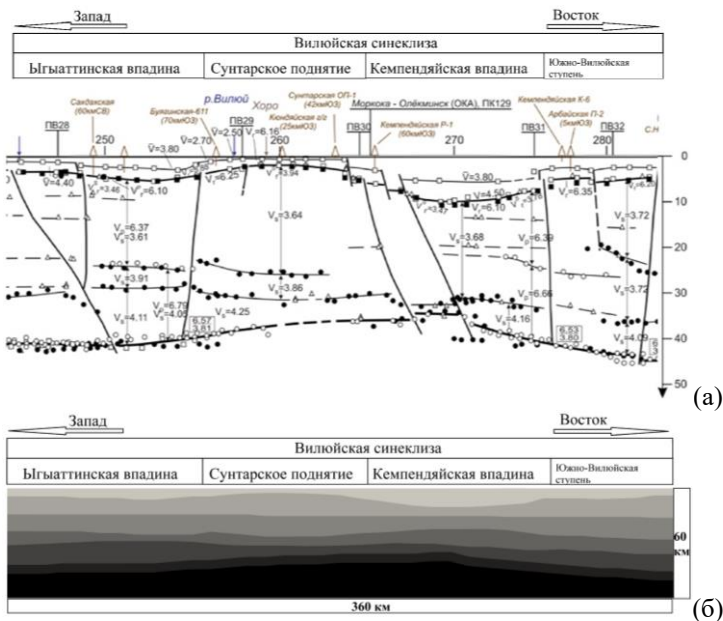


Рисунок 2 – Геофизические данные геологического профиля «Кимберлит–1981» на территории Якутско-Вилуйской КИП (а) и модель структуры соответствующего участка литосферы (б)

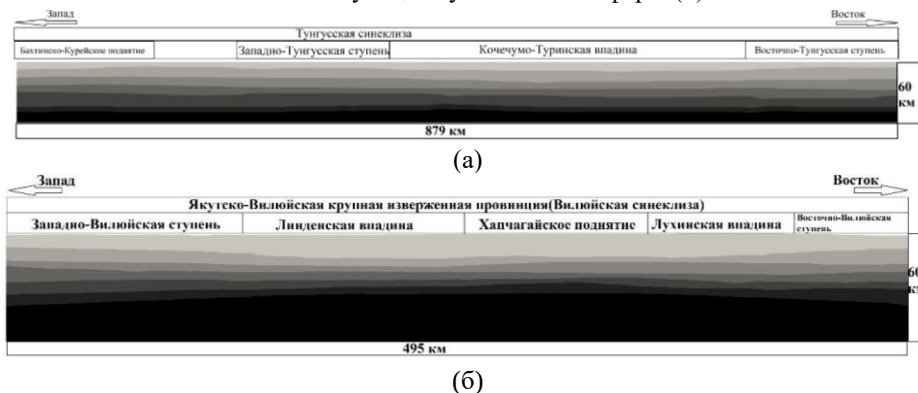


Рисунок 3 – Модели структуры Тунгусской синеклизы вдоль профиля «Кимберлит – 1981» (а), Якутско-Вилуйской КИП вдоль профиля «Кратон – 1980» (б)

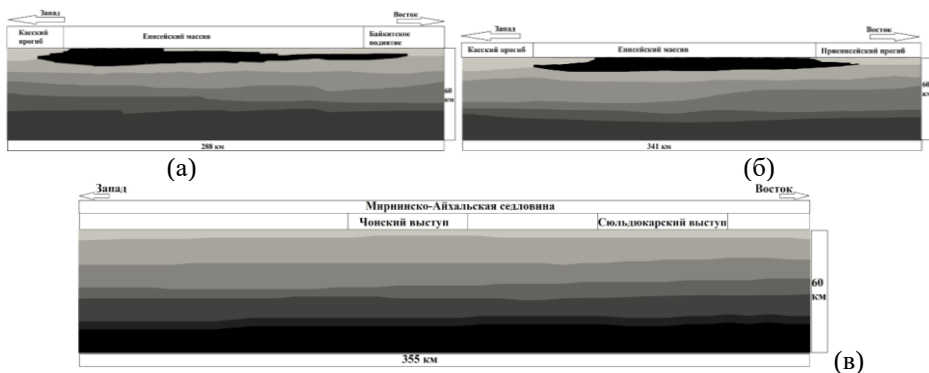


Рисунок 4 – Модели структуры Енисейского кряжа вдоль профилей «Шпат–1983» (а) и «Батолит–1982» (б), Мирнинско–Айхальской седловины вдоль профиля «Кимберлит – 1981» (в)

На территории Мирнинско–Айхальской седловины, ввиду географического расположения между Вилюйской и Тунгусской синеклизами, наблюдается меньшее количество разломов. Осаждение кристаллического фундамента произошло достаточно равномерно, так как глубина его залегания находится в диапазоне 2–3 км, граница Мохо также деформирована не сильно и находится на глубине 40 км. Поэтому здесь наблюдается равномерное распределение структур земной коры и верхней мантии. Глубинная структура Тунгусской синеклизы имеет большое количество разломов, которые начинают свой рост из кристаллического фундамента и доходят до границы Мохо. При этом наблюдается осаждение кристаллического фундамента на глубину от 4 до 13 км, а граница Мохо расположена на глубине от 45 до 51 км.

Плотности слоев в выбранных областях были получены из статьи Черепановой Ю., Артемьевой И.М.³, а упругие свойства слоёв – по данным о скоростях продольных и поперечных волн геологических профилей.

В третьей главе представлена математическая постановка задачи. В основе общей математической постановки задачи о расчете НДС лежат фундаментальные уравнения МДТТ и определяющие соотношения. К фундаментальным уравнениям относятся законы сохранения массы и импульса (уравнение сохранения энергии не является необходимым в силу принятой баротропной модели среды):

$$\rho_0 V_0 = \rho V, \quad \rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} + \rho g_i. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 , ρ – начальное и текущее значение плотности среды, V_0 , V – начальное и текущее значение объема некоторой малой области среды, u_i – компоненты вектора перемещения, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, g_i – компоненты ускорения свободного падения. Точка над символом обозначает материальную

³ Cherepanova Y. Density heterogeneity of the cratonic lithosphere: A case study of the Siberian Craton / Y. Cherepanova, I.M. Artemieva // Gondwana Research. – 2015. – Vol. 28. – P.1344–1360. – DOI:10.1016/j.gr.2014.10.002.

производную по времени, запятая в нижнем индексе – частную производную по соответствующей пространственной координате, $i, j = 1, 2$.

Для описания упругопластического деформирования среды принимается гипотеза аддитивного разложения полного тензора скоростей деформаций на упругую и пластическую составляющие, откуда скорости упругих деформаций равны $\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p$. Определяющие соотношения первой группы задают связь между упругими деформациями и напряжениями и ниже записаны в скоростной форме (2), в которых скорость напряжений пропорциональна скорости упругой деформации:

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^e - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk}^e \delta_{ij} \right), \quad \dot{P} = -K \dot{\varepsilon}_{kk}^e, \quad (2)$$

где

$$\sigma_{ij} = (-P\delta_{ij} + s_{ij}), \quad \frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik}\dot{\omega}_{kj} - s_{jk}\dot{\omega}_{ki}, \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}), \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i}), \quad (4)$$

s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений, P – давление, δ_{ij} – символ Кронеккера, D/Dt – означает вращательную производную по времени (производную Яуманна), μ – модуль сдвига, K – модуль всестороннего сжатия, $\dot{\omega}_{ij}$ – компоненты псевдотензора скорости вращения.

Определение скорости пластической деформации является целью определяющих уравнений второй группы. Предельная поверхность напряжений $f(\sigma_{ij})$ записана в виде условия Друкера – Прагера, а пластический потенциал $g(\sigma_{ij})$ – в соответствии с теорией Николаевского:

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{\alpha}{3} J_1 + J_2^{1/2} - Y = 0, \quad g(\sigma_{ij}) = J_2 + \frac{\Lambda}{3} J_1 \left(2Y - \frac{\alpha}{3} J_1 \right) + const, \quad (5)$$

где J_1 – первый инвариант тензора напряжений, J_2 – второй инвариант девиатора тензора напряжений, Y – когезия, α – коэффициент внутреннего трения, Λ – коэффициент дилатансии. В случае неассоциированного закона течения пластический потенциал не совпадает с функцией пластичности. Компоненты тензора скоростей неупругой деформации определяются законом пластического течения и имеют вид, определяемый уравнениями (6):

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \left(s_{ij} + \frac{2}{3} \Lambda \left(Y - \frac{\alpha}{3} J_1 \right) \delta_{ij} \right) \dot{\lambda}. \quad (6)$$

где $\dot{\lambda}$ – скалярный множитель в теории пластичности.

Для моделирования геотектонического процесса в глубинных структурах литосферы необходимо определить значения параметров модели пластичности

для слоев земной коры и верхней мантии, т.е. провести адаптацию математической модели для решения поставленных задач. Для этого установим связь между параметрами прочности в модели Друкера – Прагера и дифференциальными напряжениями (разность максимального и минимального главных нормальных напряжений), которые часто используют в оценках предельного напряженного состояния в геодинамике. В случае сложного напряженного состояния уровень сдвиговых напряжений характеризует второй инвариант девиатора тензора напряжений J_2 , который в рамках модели Друкера – Прагера задается следующим выражением:

$$J_2^{1/2} = Y + \alpha \cdot P. \quad (7)$$

С другой стороны, второй инвариант девиатора тензора напряжений можно записать через параметр Лоде – Надаи μ_σ и максимальное главное касательное напряжение τ :

$$J_2 = (1 + \mu_\sigma^2 / 3) \tau^2. \quad (8)$$

При этом главное касательное напряжение определяется через половину разности между наибольшим (σ_1) и наименьшим (σ_3) главными напряжениями или дифференциальными напряжениями $\Delta\sigma$:

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = \Delta\sigma / 2. \quad (9)$$

В конечном итоге из уравнений (7), (8), (9) получаем связь дифференциальных напряжений с когезией и коэффициентом внутреннего трения, используемыми в модели Друкера – Прагера:

$$\Delta\sigma = 2(Y + \alpha \cdot P) \cdot \left(1 + \frac{\mu_\sigma^2}{3}\right)^{-0.5}. \quad (10)$$

Литосфера является сильно неоднородной (рисунок 5(а)) и дифференциальные напряжения в ее разных местах (рисунок 5(б)) зависят от внешних и внутренних факторов. К внутренним факторам принято относить особенности её структуры и состава, которые обуславливают реологические свойства среды. К внешним факторам относят тепловые потоки, давление и т.д. В работе для задания неоднородных прочностных свойств литосферы была выбрана модель «cratonic jelly sandwich», в которой учитываются изменения физических свойств геосреды с учётом неявного влияния тепла и давления, при этом особенностью модели является наличие упрочнённого слоя верхней мантии ниже уровня Мохо. Это связано с тем, что представленные геологические области находятся на континентальной плите, которая является малоактивным геодинамическим объектом.

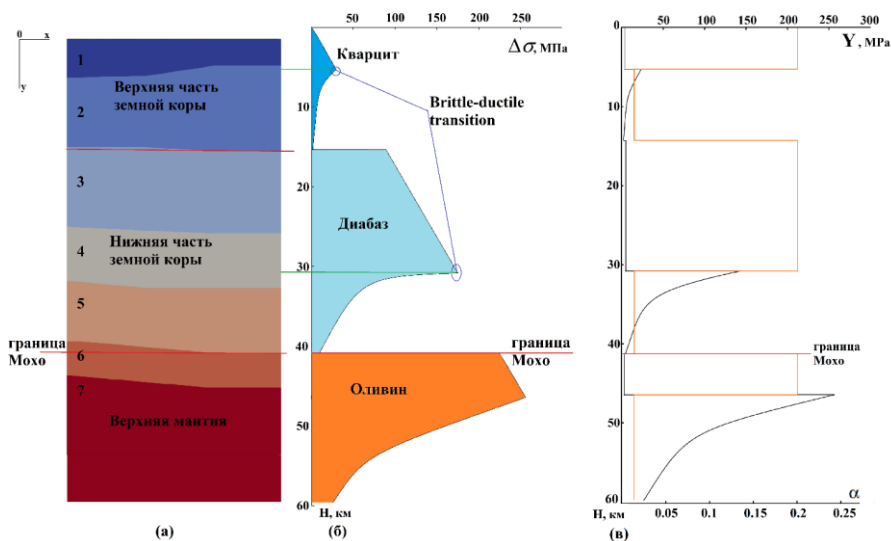


Рисунок 5 – Модель структуры литосферы (а), соответствующее ей распределение дифференциальных напряжений с глубиной в модели «cratonic jelly sandwich» (б) и параметров модели Друкера – Прагера (Y – черным цветом, α – оранжевым цветом) (в)

Прочностная модель «cratonic jelly sandwich» разделена на три части, соответствующие группам горных пород – кварциты, диабазы и оливины, которые являются основой глубинной структуры литосферы. Наличие прочного слоя верхней мантии обусловлено присутствием прочных слоев континентальной земной коры. Модель «cratonic jelly sandwich» является частным случаем моделей YSE (Yield Stress Envelope – огибающая предела прочности), в которых геологические структуры разделяются на жесткие и мягкие слои, обеспечивая равновесное состояние литосферы.

На рисунке 5 (б) отмечены границы между жесткими и мягкими слоями земной коры, которые обусловлены хрупко-пластическими переходами (brittle-ductile transitions) в горных породах, вызванными фазовыми превращениями. В случае жесткого слоя нижней части земной коры отмечаются следующие особенности переходного состояния между земной корой и верхней мантией. Если граница Мохо расположена на глубине порядка 42–45 км, то протяженность жесткого слоя нижней части земной коры составляет примерно 15–16 км, а если граница Мохо лежит на глубине больше 45 км, протяженность данного слоя увеличивается на 3–6 км. Это является результатом влияния тепловых потоков из мантийного слоя на земную кору, в которой горные породы под действием давления и тепла претерпевают фазовые переходы, которые влекут за собой изменения реологических свойств слоев литосферы и приводят к формированию флюидов в мягких слоях земной коры. Поэтому если толщина земной коры

является большой, то протяженность жесткого слоя нижней части земной коры будет всегда больше, чем при меньшей толщине земной коры.

В соответствии с формулой (10) изменение дифференциальных напряжений в модели «cratonic jelly sandwich» необходимо обеспечить за счет изменения когезии и коэффициента внутреннего трения. При этом необходимо учитывать, что давление линейно увеличивается с глубиной. Так были определены зависимости изменения когезии и коэффициента внутреннего трения с глубиной, показанные на рисунке 5 (в).

Напряженное состояние в литосфере обусловлено действием силы тяжести и тектонических напряжений, определяемых геодинамическими состояниями горизонтального растяжения или сжатия. Поэтому для расчета НДС в каждом конкретном регионе необходимо задать соответствующие начальные и граничные условия.

В качестве начальных условий принято отсутствие начальных напряжений и деформаций. Численное моделирование производилось в два этапа, граничные условия на которых различались:

1. Этап установления НДС за счет действия силы тяжести в геологической области с закрепленной нижней границей, свободной от напряжений верхней границей и условиями скольжения вдоль вертикальных боковых границ.

2. Этап нагружения горизонтальными компонентами скоростей перемещений по вертикальным боковым границам в зависимости от геодинамической обстановки (растяжение или сжатие).

Этапы расчета и задания граничных условий представлены на рисунках 6 и 7.



Рисунок 6 – Схема нагружения геологической модели внешними воздействиями во времени: ускорения свободного падения g и горизонтальной скорости V_x

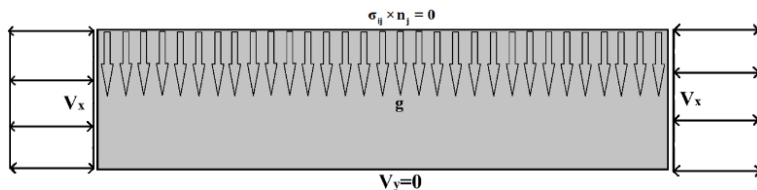


Рисунок 7 – Схема задания граничных условий, описывающая процессы горизонтального сжатия и растяжения

Граничные условия на внутренних границах раздела соответствовали жесткому сцеплению слоев литосферы.

В четвертой главе представлены результаты компьютерного моделирования НДС выбранных участков Сибирского кратона.

Как показано на рисунке 8, Якутско-Вилуйскую КИП можно разделить на северную и южную части, вдоль которых проходят профили «Кратон – 1980» и «Кимберлит – 1981» соответственно. По геологическим данным, на территории Якутско-Вилуйской КИП имеются огромные месторождения нефти и газа, выделяемые в Лено-Вилуйскую нефтегазоносную провинцию, которая показана на рисунке 8. В данной области выделяются Хапчагайский и Логлорский валы, как основные нефтегазовые районы Лено-Вилуйской нефтегазоносной провинции, которые относятся к классу трудноизвлекаемых ресурсов углеводородов. Данные районы находятся на территории Хапчагайского поднятия и на границе между Линденской впадиной и Западно-Вилуйской ступенью. На рисунке 8 также показаны местоположения и других неразведанных залежей нефти и газа Лено-Вилуйской нефтегазоносной провинции.

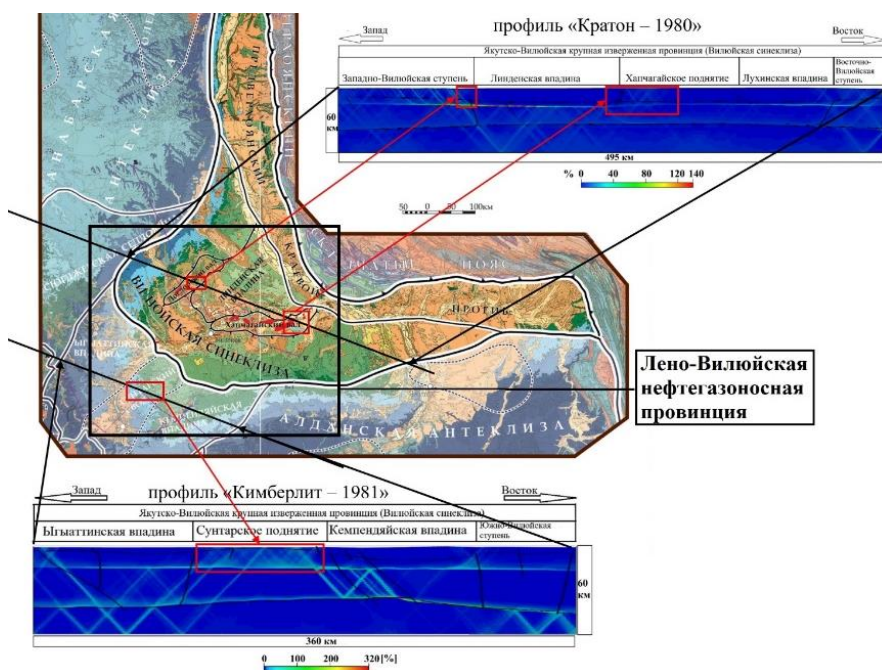


Рисунок 8 – Структурно-геологическая карта Якутско-Вилуйской КИП с расположением геологических профилей «Кратон – 1980» и «Кимберлит – 1981» и распределения интенсивностей пластических деформаций, рассчитанные в указанных областях

Как видно из рассчитанных распределений интенсивности пластических деформаций, показанных на рисунке 8, в части Якутско-Вилуйской КИП, где проходит геологический профиль «Кратон – 1980», на территориях Хапчагайского и Логлорского валов отмечается локализация пластической деформации в земной

коре. Кроме этого, локализация пластической деформации хорошо проявляется в земной коре и верхней мантии в Восточно-Вилуйской и Западно-Вилуйской ступенях, где по данным геологов присутствуют разломы в нижней части земной коры. В результате процесса растяжения на границе между Хапчагайским поднятием и Линденской впадиной наблюдается возникновение впадины, вызванное высокой локализацией пластической деформации в верхних и нижних слоях земной коры.

В южной части Якутско-Вилуйской КИП локализация пластической деформации отмечается на территории Сунтарского поднятия, где, по предварительным оценкам геологов, сосредоточены залежи нефти и газа. Также в расчетах наблюдается возникновение впадины в районе Кемпендяйской впадины рядом с Сунтарским поднятием, как результат высокой локализации пластической деформации в слоях земной коры. В целом, оценивая рисунок 8, можно заключить, что месторасположения основных залежей нефти и газа на территории Якутско-Вилуйской КИП совпадают с областями локализации пластической деформации. Некоторые области локализованной деформации совпадают с имеющимися разломами в земной коре и приводят к образованию впадин.

На примере модели структуры Якутско-Вилуйской КИП был исследован механизм распространения пластической деформации по мере увеличения горизонтальной деформации, который проиллюстрирован на рисунке 9. На рисунке 9(а) в момент установления НДС под действием силы тяжести пластическая деформация локализовалась в верхней мантии и в мягких слоях земной коры. С началом процесса растяжения значения пластической деформации в мягких слоях земной коры повышаются. Далее, с развитием процесса растяжения наблюдается возникновение полос локализованной пластической деформации в осадочных слоях (полосы прорастают из глубины по направлению к поверхности) и в прочных слоях нижней части земной коры. В дальнейшем происходит рост локализации пластической деформации в отмеченных ранее областях и зарождение полос локализованной пластической деформации в верхней мантии. Данный механизм распространения пластической деформации в земной коре наблюдается во всех объектах исследования.

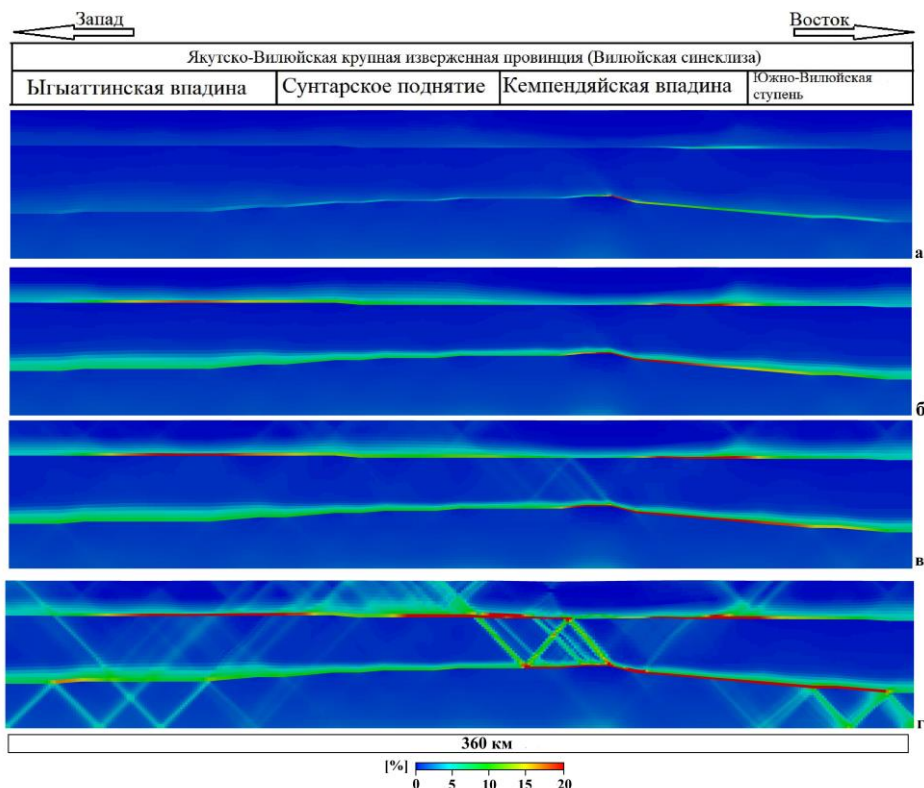


Рисунок 9 – Механизм распространения пластической деформации в земной коре и верхней мантии при горизонтальной деформации: 0% (а); 0,025% (б); 0,208% (в); 0,761% (г)

На рисунке 10 представлено распределение горизонтальных напряжений на территории Якутско-Вилуйской КИП. Видно, что при тектоническом растяжении в этой области положительные напряжения возникают только в самых верхних поверхностных слоях в районах Сунтарского поднятия, Ыгыаттинской впадины, Хапчагайского поднятия и Южно-Вилуйской, Западно-Вилуйской и Восточно-Вилуйской ступенях. Особенности распределений горизонтальных напряжений по глубине определяются используемой прочностной зависимостью литосферы, проиллюстрированной на рисунке 5, где наблюдается чередование зон упрочнения и разупрочнения слоев земной коры.

Далее рассмотрим анализ НДС Тунгусской синеклизы. По полезным ископаемым, на данной территории находится Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция.

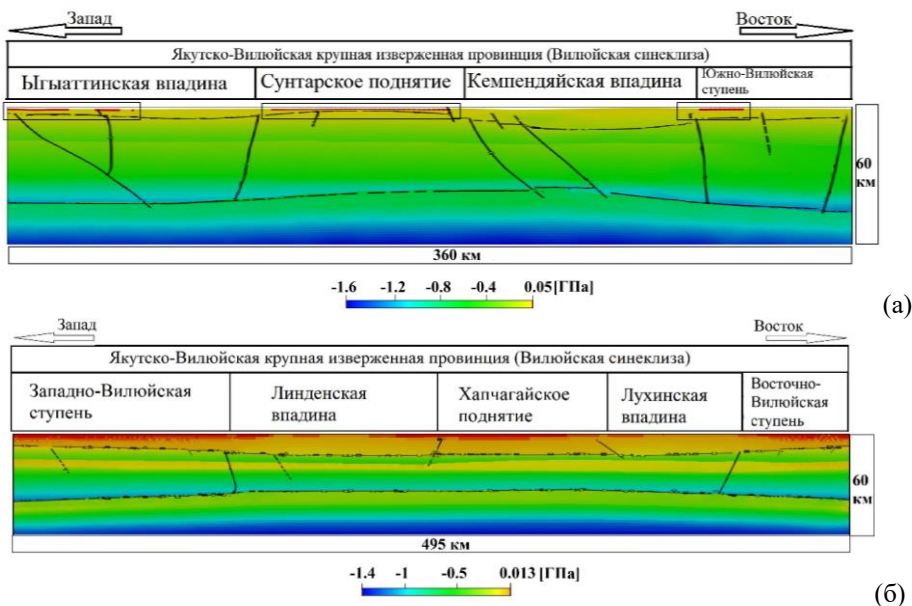


Рисунок 10 – Распределение горизонтальных напряжений, рассчитанное вдоль профилей «Кимберлит – 1981» (а), «Кратон – 1980» (б) на территории Якутско-Вилуйской КИП

На протяжении почти всего профиля «Кимберлит – 1981» на территории Тунгусской синеклизы выявлены перспективные области нефтегазонакопления, выделенные штриховкой зеленого цвета, и газовые месторождения, отмеченные красными треугольниками на рисунке 11 (а), и сформировавшиеся месторождения нефти и газа, показанные замкнутыми кривыми сиреневого цвета на рисунке 11 (б). Анализируя полученное в результате моделирования распределение интенсивности пластических деформаций, показанное на рисунке 11(в), можно сказать, что локализация пластической деформации в верхних слоях земной коры отмечается в районе Бахтинско-Курейского поднятия, где расположены газовые месторождения и зоны нефтегазонакопления, а также в области Кочечумо-Туринской впадины, в которой расположены перспективные области нефтегазонакопления. Кроме этого, наблюдается высокая локализация пластической деформации у границ раздела между слоями земной коры, вызванная наличием ослабленных слоев земной коры на глубине 20 км и у границы Мохо.

Положительные горизонтальные напряжения отмечаются почти на всей протяженности земной поверхности в исследуемом регионе (рисунок 12). Это связано с меньшей кривизной границ раздела между слоями земной коры и границы Мохо.

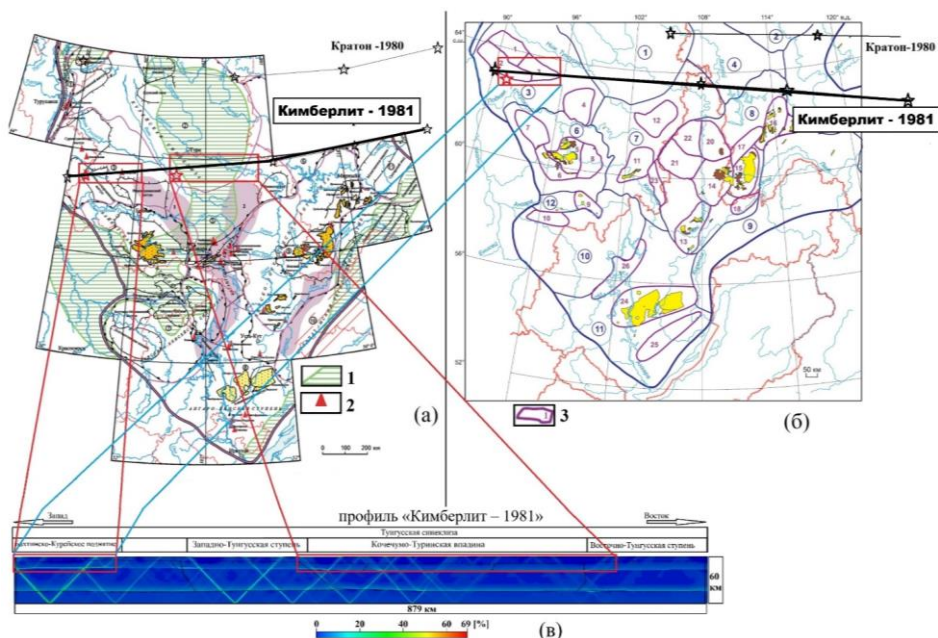


Рисунок 11 – Схематическая карта зон нефтегазонакопления в центральной части⁴ (а) и южной части⁵ (б) Лено-Тунгусской нефтегазовой провинции и распределение интенсивности пластической деформации, рассчитанное в районе Тунгусской синеклизы вдоль профиля «Кимберлит – 1981» (в).
 (а): 1 – очаги нефтегазообразования, 2 – газовые месторождения;
 (б): 3 – зоны нефтегазонакопления

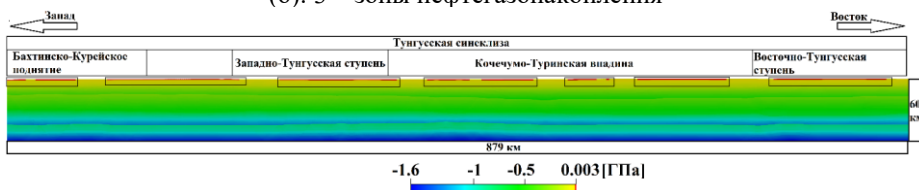


Рисунок 12 – Распределение горизонтальных напряжений, рассчитанное вдоль профиля «Кимберлит – 1981» на территории Тунгусской синеклизы

⁴ Соболев П.Н. Перспективы увеличения нефтегазового потенциала докембрийских отложений Лено-Тунгусской провинции / П.Н. Соболев, О.В. Шиганова, С.В. Дыхан // Геология нефти и газа. – 2009. – № 6. – С. 62–70.

⁵ Мельников Н.В. Зоны нефтегазонакопления в районах проведения геолого-разведочных работ Лено-Тунгусской провинции / Н.В. Мельников, П.Н. Мельников, Е.В. Смирнов // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 8. – С. 1151–1163.

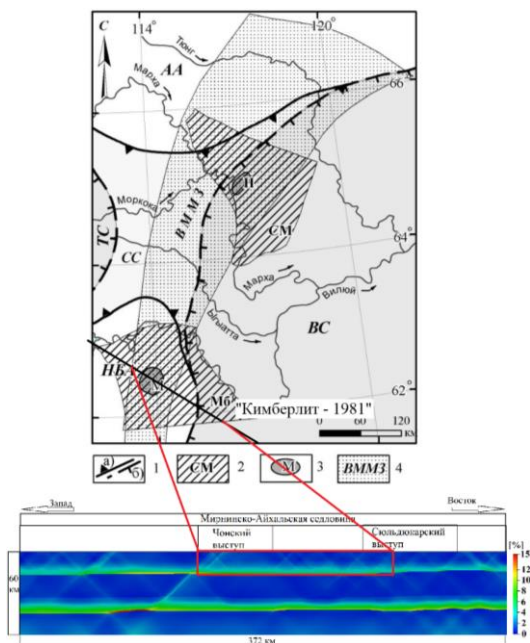


Рисунок 13 – Тектоническая схема Вилюйско-Мархинской минерагенической зоны (ВММЗ) с расположением профиля «Кимберлит – 1981» и рассчитанное распределение интенсивности пластической деформации.

Условные обозначения:

НБА – Непско-Ботубинская антиклизы,
МБ – Малоботубовский алмазоносный район,
М – Мирнинское кимберлитовое поле⁶

выделенных на структурной карте на рисунке 14 желтыми кругами, отмечается локализация пластической деформации. Также в исследованных областях находятся зоны крупных субвертикальных и сдвиговых разломов. В большей части из них также выявлены полосы локализованной пластической деформации. В результате образования одной из полос локализованной деформации в верхнем слое земной коры возникает надвиг в области границы Касского прогиба с Енисейским массивом, где существует Приенисейский надвиг.

Для анализа НДС в районе Мирнинско-Айхальской седловины вдоль профиля «Кимберлит – 1981» на рисунке 13 представлены тектоническая схема Вилюйско-Мархинской минерагенической зоны⁶ и распределение интенсивности пластической деформации, полученное при моделировании. Видно, что профиль «Кимберлит – 1981» проходит по Мирнинскому и Малоботубовскому алмазоносным районам, которые на профиле соответствуют Чонскому и Сюльдюкарскому выступам. В районах местонахождения кимберлитовых трубок наблюдается локализация пластической деформации в верхнем слое земной коры. В нижнем слое земной коры полоса локализации деформации совпадает с расположением крупного разлома на границе Чонского выступа.

В ходе анализа НДС на территории Енисейского кряжа было выявлено, что в местах расположения золотоносных залежей,

⁶ Коробков И.Г. Структуры осадочного чехла высокопродуктивных кимберлитовых полей Вилюйско-Мархинской минерагенической зоны (Якутская алмазоносная провинция) / И.Г. Коробков, Е.В. Проценко, А.И. Коробкова // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2015. – № 1. – С. 22–28.

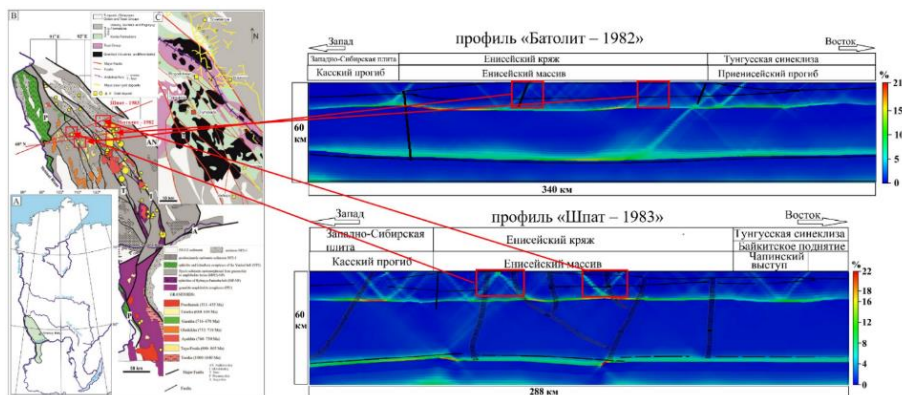


Рисунок 14 – Сопоставление мест локализации пластической деформации в расчетах с местоположениями залежей золота на территории Енисейского края⁷

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе обработки литературных данных, построения моделей структуры и численной модели, а также выполнения компьютерного моделирования и последующего анализа полученных результатов были решены все поставленные задачи и достигнута цель данной диссертационной работы.

На основе проведенных исследований были получены следующие результаты и на их основе сделаны следующие выводы:

1. В ходе проведенного литературного обзора были проанализированы и выявлены основные достижения в области исследований геологического строения и геодинамической ситуации на территории Сибирского кратона, а также современные тенденции использования подходов и моделей МДТТ для решения задач анализа НДС природных материалов.

2. Впервые на основе анализа геофизических данных геологических профилей «Кимберлит – 1981», «Кратон – 1980», «Шпат – 1983» и «Батолит – 1982», полученных методом ГСЗ, были построены двумерные модели структуры участков литосферы Сибирского кратона, необходимые для численного моделирования их НДС.

3. Разработана математическая модель упругопластической среды типа Друкера – Прагера – Николаевского для расчета НДС участков литосферы на территории Сибирского кратона, параметры которой учитывают изменения физико-механических свойств слоев литосферы в соответствии с прочностной моделью «cratonic jelly sandwich».

⁷ Рудогенез месторождения золота Олимпиада (Енисейский край, Россия) / А.М. Сазонов [и др.] // Геосферные исследования. – 2019. – № 1. – С. 17–43.

4. На основе компьютерного моделирования процессов сжатия и растяжения участков литосферы определены зоны локализации пластической деформации и проведено их сопоставление с местоположениями полезных ископаемых на территории Сибирского кратона.

5. В результате расчетов эволюции НДС в процессе растяжения и сжатия изученных участков литосферы выявлен механизм распространения пластической деформации в земной коре от мест ее зарождения в ослабленных слоях земной коры к земной поверхности и прочным слоям земной коры, приводящий к возникновению надвигов в осадочном чехле в случае процесса сжатия и образованию впадин в верхних слоях земной коры в процессе растяжения.

6. В ходе анализа результатов расчета НДС участков литосферы, находящихся в условиях горизонтального растяжения были выявлены совпадения областей локализации пластической деформации и положительных значений горизонтальных напряжений с местами нахождения основных залежей нефти и газа: в случае Якутско-Вилуйской КИП – с расположением Лено-Вилуйской нефтегазоносной провинции, в случае Тунгусской синеклизы – с расположением Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, а для участков литосферы, находящихся в условиях горизонтального сжатия были выявлены совпадения областей локализации пластической деформации с местами нахождения других полезных ископаемых: в случае Мирнинско-Айхальской седловины – с расположением Мирнинского кимберлитового поля, а на территории Енисейского края отмеченные области совпадают с расположением залежей золота.

7. Зоны положительных горизонтальных напряжений в районе земной поверхности, возникающие в процессе растяжения, совпадают с местами локализации пластической деформации. В случае сжатия положительные значения горизонтальных напряжений в геосреде не возникают.

8. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования модифицированных моделей упругопластической среды с реологическими моделями типа «cratonic jelly sandwich» для моделирования НДС участков литосферы и анализа возможных сценариев развития геодинамических процессов в верхних слоях земной коры и верхней мантии.

9. Для описания неоднородного НДС в литосфере особую важность имеет наличие моделей структуры глубинного строения литосферы в изучаемых участках, для построения которых необходимы экспериментальные данные.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи 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:

1. **Ахметов А. Ж.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния Якутско-Вилуйской изверженной провинции для анализа геотектонических процессов в Сибирском кратоне / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2021. – № 69. – С. 53–68. – DOI: 10.17223/19988621/69/5. – 1 / 0,5 а.л.

Scopus: **Akhmetov A. Zh.** Numerical modeling of the stress-strain state of the Yakutsk-Vilyui large igneous province for the analysis of geotectonic processes in the Siberian Craton / A. Zh. Akhmetov, I. Yu. Smolin // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika. – 2021. – № 69. – P. 53–68. – DOI: 10.17223/19988621/69/5. – 1 / 0,5 а.л.

2. **Ахметов А. Ж.** Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния Тунгусской синеклизы и Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 75. – С. 52–66. – DOI: 10.17223/19988621/75/5. – 1 / 0,5 а.л.

Scopus: **Akhmetov A. Zh.** Computer modelling of the state of stress and strain of the Tunguska and Vilyui synecises / A. Zh. Akhmetov, I. Yu. Smolin // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika. – 2022. – № 75. – С. 52–66. – DOI: 10.17223/19988621/75/5. – 1 / 0,5 а.л.

3. **Akhmetov A. Zh.** Numerical analysis of state of stress and strain in the Yenisei Ridge based on the regional tectonic state in the Asian continent / A. Zh. Akhmetov, I. Yu. Smolin, Al.Yu. Peryshkin // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2019. – Vol. 13 (49). – P. 190–200. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.20. – 0,7 / 0,23 а.л. (*Scopus*)

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Scopus:

4. **Akhmetov A.** Modeling Modern Geotectonic Processes of the Siberian Platform and Its Margins [Electronic resource] / A. Akhmetov, P. Makarov, I. Smolin, A. Peryshkin // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences : materials of the 5th International conference «Trigger Effects in Geosystems». Moscow, Russia, June 04–07, 2019. – Cham, 2019. – P. 3–11. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-31970-0_1 (access date: 28.05.2022). – DOI: 10.1007/978-3-030-31970-0_1. – 0,45 / 0,11 а.л.

5. **Akhmetov A. Zh.** Computer analysis of the stress state in the Yenisei Ridge [Electronic resource] / A. Zh. Akhmetov, I. Yu. Smolin, P. V. Makarov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : Materials of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020005. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5131872> (access date: 28.07.2022). – DOI: 10.1063/1.5131872. – 0,27 / 0,09 а.л.

6. **Akhmetov A. Zh.** Analysis of stress and strain of earth's crust layers in the Yenisei Ridge [Electronic resource] / A. Zh. Akhmetov, I. Yu. Smolin // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : Materials of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020004. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5131871> (access date: 28.05.2022). – DOI: 10.1063/1.5131871. – 0,27 / 0,14 а.л.

7. **Akhmetov A. Zh.** Numerical simulation of geomechanical processes in the lithosphere in terms of heat flow [Electronic resource] / A. Zh. Akhmetov, I. Yu. Smolin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310 : Materials of the International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology Dedicated to the 90th anniversary of the founder and first director of ISMMS SB RAS academician Victor Panin 2020.

Tomsk, Russia, October 05–09, 2020. – Article number 020005. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0034208> (access date: 28.05.2022). – DOI: 10.1063/5.0034208. – 0,3 / 0,15 а.л.

8. **Akhmetov A. Zh.** Computer analysis of the stress state in the Yakutsk-Vilyui large igneous province [Electronic resource] / A. Zh. Akhmetov // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310 : Materials of the International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology Dedicated to the 90th anniversary of the founder and first director of ISMMS SB RAS academician Victor Panin 2020. Tomsk, Russia, October 05–09, 2020. – Article number 020004. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0034196> (access date: 28.05.2022). – DOI: 10.1063/5.0034196. – 0,22 а.л.

9. **Akhmetov A. Zh.** Modelling the state of stress and strain in layered structure under heat loading [Electronic resource] / A. Zh. Akhmetov, I. Yu. Smolin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1709 : Materials of the 10th All-Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum mechanics and Celestial Mechanics, CICMCM 2020. Tomsk, Russia, November 18–20, 2020. – Article number: 012007. – 8 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1709/1/012007> (access date: 28.05.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/1709/1/012007. – 0,5 / 0,25 а.л.

10. **Akhmetov A. Zh.** Computer analysis of the stress state of the lithosphere in the Mirny and Aikhal anticlinal fold [Electronic resource] / A. Zh. Akhmetov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2509 : Materials of the International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2021. Tomsk, Russia, September 06–10, 2021. – Article number 020006. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0084899> (access date: 28.05.2022). – DOI: 10.1063/5.0084899. – 0,3 а.л.

11. **Akhmetov A. Zh.** Numerical analysis of the stress state of the lithosphere in the Yakutsk-Vilyui large igneous province [Electronic resource] / A. Zh. Akhmetov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2509 : Materials of the International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2021. Tomsk, Russia, September 06–10, 2021. – Article number 020007. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0084897> (access date: 28.05.2022). – DOI: 10.1063/5.0084897. – 0,3 а.л.

Публикации в прочих научных изданиях:

12. Макаров П. В. Численное изучение динамики и механизмов деформирования и разрушения элементов земной коры и Центральной и Юго-Восточной Азии в целом / П. В. Макаров, Р. А. Бакеев, А. Ю. Перышкин, **А. Ж. Ахметов**, М. О. Еремин, И. Ю. Смолин, А. С. Кульков // Геодинамика. Геомеханика и геофизика : материалы XVIII Всероссийского семинара. Стационар «Денисова пещера», Алтайский край, 23–28 июля 2018 г. – Новосибирск, 2018. – С. 47. – 0,06 / 0,01 а.л.

13. **Ахметов А. Ж.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния в зонах коллизии Енисейского кряжа / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин, П. В. Макаров // XXI Зимняя школа по механике

сплошных сред : тезисы докладов. Пермь, 18–22 февраля 2019 г. – Пермь, 2019. – С. 34. – 0,06 / 0,02 а.л.

14. **Ахметов А. Ж.** Компьютерное моделирование процесса коллизии на территории Енисейского кряжа / А. Ж. Ахметов // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К. И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина. Томск, 08–12 апреля 2019 г. – Томск, 2019. – Т. 1. – С. 277–278. – 0,13 а.л.

15. **Ахметов А. Ж.** Моделирование современных геотектонических процессов Сибирской платформы и ее обрамления / А. Ж. Ахметов, П. В. Макаров, А. Ю. Перышкин, И. Ю. Смолин // Триггерные эффекты в геосистемах : тезисы докладов V-й Международной конференции. Москва, 04–07 июня 2019 г. – Москва, 2019. – С. 19–20. – 0,13 / 0,03 а.л.

16. **Ахметов А. Ж.** Компьютерное моделирование геотектонических процессов на территории Сибирской платформы и ее обрамления / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин, П. В. Макаров, А. Ю. Перышкин // Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций : тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти. Томск, 01–05 октября 2019 г. – Томск, 2019. – С. 650–651. – 0,12 / 0,03 а.л.

17. **Ахметов А. Ж.** Численное исследование напряжений и неупругих деформаций в зонах коллизии в районе Енисейского кряжа / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин, П. В. Макаров // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2018 : материалы VIII Всероссийской молодежной научной конференции. Томск, 26–28 ноября 2018 г. – Томск, 2019. – С. 212–214. – 0,19 / 0,06 а.л.

18. **Ахметов А. Ж.** Эволюция напряженно-деформированного состояния Енисейского кряжа / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин, П. В. Макаров, А. Ю. Перышкин // Современная тектонофизика. Методы и результаты : материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара. Москва, 07–12 октября 2019 г. – Москва, 2019. – С. 69–76. – 0,5 / 0,13 а.л.

19. **Ахметов А. Ж.** Численный анализ напряжений и деформации Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : тезисы докладов Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика Виктора Евгеньевича Панина в рамках Международного междисциплинарного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций». Томск, 05–09 октября 2020 г. – Томск, 2020. – С. 635–636. – 0,11 / 0,06 а.л.

20. **Ахметов А. Ж.** Численный анализ напряжений и деформации глубинной структуры земной коры и верхней мантии Сибирского кратона / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2019 : материалы IX Всероссийской молодежной научной

конференции. Томск, 18–20 ноября 2019 г. – Томск, 2020. – С. 248–251. – 0,19 / 0,01 а.л.

21. **Ахметов А. Ж.** Анализ напряженно-деформированного состояния глубинного участка литосферы на территории Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле : материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной столетию М.В. Гзовского. Москва, 05–09 октября 2020 г. – Москва, 2020. – С. 366–372. – 0,35 / 0,18 а.л.

22. **Ахметов А. Ж.** Анализ напряженно-деформированного состояния Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции вдоль геологического профиля «Кимберлит-1981» / А. Ж. Ахметов // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 27–30 апреля 2021 г. – Томск, 2021. – С. 64–66. – 0,2 а.л.

23. **Ахметов А. Ж.** Оценка прочностных свойств континентальной литосферы для численного анализа напряжений и деформаций / А. Ж. Ахметов // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : тезисы Международной конференции. Томск, 06–10 сентября 2021 г. – Томск, 2021. – С. 503–504. – 0,1 а.л.

24. **Ахметов А. Ж.** Компьютерный анализ напряженного состояния структуры земной коры и верхней мантии Сибирского кратона / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики–2020 : материалы X Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск, 18–20 ноября 2020 г. – Томск, 2021. – С. 243–246. – 0,23 / 0,12 а.л.

25. **Ахметов А. Ж.** Анализ напряженно-деформированного состояния элементов земной коры и верхней мантии на основе изменения реологических свойств / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков, посвященная 60-летию первого полета человека в космос : тезисы докладов. Сочи, 03–12 сентября 2021 г. – Москва, 2021. – С. 28. – 0,06 / 0,03 а.л.

26. **Ахметов А. Ж.** Оценка напряженно-деформированного состояния геологических объектов Сибирского кратона на основе профиля «Кимберлит-1980» / А. Ж. Ахметов, И. Ю. Смолин // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ : тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. – Иркутск, 2021. – С. 108–109. – 0,09 / 0,05 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7502 от «01» августа 2022 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр.8, тел. 53-15-28