

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34  
Рег. N НИОКТР 124020900028-0  
Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИТПЗ РАН  
чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_ П.Н. Шебалин  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
(промежуточный, этап 2024 года)

Руководитель НИР,  
гл. науч. сотр., зав.лаб.  
докт. физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ А.И.Горшков  
Подпись, дата

Москва 2024

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, гл. науч. сотр., зав. лаб. д.ф.-м.н.,	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	А.И. Горшков (введение, разделы 1, 2 заключение)
Исполнители темы		
гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	В.А. Желиговский (раздел 4)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	О.М. Подвигина (раздел 5)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	Г.М. Стеблов (раздел 3)
гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	А.В. Хохлов (раздел 2)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	А.А. Баранов (раздел 2)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	А.П. Кержаев (раздел 6)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	И.В. Меньшова (раздел 6)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	О.В. Новикова (раздел 1)
ст. науч. сотр. канд. тех. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	Е.С. Подольская (раздел 1)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	Р.А. Чертовских (раздел 4)
мл. науч. сотр.	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	А.И. Ливинский (раздел 1)
мл. науч. сотр.	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	М.А. Семка (раздел 1)
мл. науч. сотр.	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	Д.С. Толмачев (раздел 4)
мл. науч. сотр.	<hr style="width: 100%;"/> Подпись, дата	Т.Т. Хасаева (раздел 4)

лаборант-исследователь

\_\_\_\_\_  
Подпись, дата

А.А. Таранюк  
(раздел 4)

нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
Подпись, дата

О.В. Селюцкая

## РЕФЕРАТ

Отчет 40 с., 1 кн., 16 рис., 25 источн., 1 прил.

МОРФОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ; МАГНИТОГИДРОДИНАМИКА; МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ; МЕТОДЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ; ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ; ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ; СПУТНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

Исследования, проводимые по теме, направлены на изучение математическими методами строения и процессов в трех оболочках Земли: коре, мантии и ядре. Морфоструктурное районирование позволяет изучать блоковое строение земной коры и его связи с сейсмичностью и оруденением. Исследования по моделированию геодинамики включают моделирование динамики блоков земной коры и мантийных процессов. В исследованиях по магнитогидродинамике рассматриваются вопросы генерации магнитного поля, обуславливаемого процессами в земном ядре.

В 2024 г. проведено морфоструктурное районирование и определение мест возможного возникновения землетрясений в горных системах Южной Сибири. По этим результатам создана ГИС база геоданных сейсмогенных узлов в регионе Южная Сибирь. Завершено изучение пространственной связи полиметаллического оруденения с морфоструктурными узлами Алтай-Саянского региона.

Путем моделирования объяснено происхождение глубочайших континентальных впадин на Земле. Показан механизм их образования и доказано существование рифтовых систем в Восточной Антарктиде. Получена оценка скорости стекания ледовой массы по коренному ложу в океан на основе двумерной модели движения покровного ледника вдоль профиля от гор Элсуэрт до границы ледника Туэйтс в Антарктиде.

Для определения зон сейсмической генерации с помощью компьютерного геодинамического моделирования на основе спутниковых данных (ГНСС) выявлены области с повышенными значениями сжимающих напряжений на Большом Кавказе и Сахалине.

В исследованиях по магнитогидродинамике изучались: асимптотика ветвления семейств наименее устойчивых магнитных мод блоховского типа; устойчивость конвективных валов в плоском слое, вращающемся относительно наклонной оси; инверсии магнитного поля в задаче галактического динамо; формирование магнитного поля на больших расстояниях от центра галактики.

В области теории упругости получены точные решения краевой задачи теории упругости для тонкой прямоугольной плиты при разных условиях ее деформирования.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1. Морфоструктурное районирование земной коры.....	8
2. Геодинамика, моделирование геодинамических процессов.....	13
3. Изучение подвижности разломов по данным спутниковой геодезии.....	18
4. Вопросы генерации магнитного поля Земли.....	21
5. Изучение генерации магнитного поля в задачах галактического динамо.....	25
6. Задачи теории упругости.....	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	35
ПРИЛОЖЕНИЯ:	
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2024 г.....	38

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках направления фундаментальных исследований «Геофизические методы изучения строения, вещественного состава земных недр и глубинных процессов; взаимодействие геосфер».

Цели исследований включали решение задач геодинамики и математической геофизики, которые группируются по нескольким основным направлениям.

(1) Изучение блокового строения земной коры с помощью морфоструктурного районирования для решения задач распознавания сейсмоопасных мест и рудоносных структур.

(2) Геодинамика и моделирование геодинамических процессов.

(3) Развитие теоретических основ изучения тектонической активности подвижных регионов Земли на основе интерпретации спутниковых геодезических данных.

(4) Исследования магнетогидродинамики.

(5) Изучение генерации магнитного поля в задачах галактического динамо.

(6) Анализ решений краевых задач теории упругости об остаточных напряжениях в декартовой и полярной системах координат.

Изучение геодинамики литосферы, строения земной коры, глубинных мантийных процессов актуальны для понимания эволюции планеты и ее геофизических оболочек. Научная новизна проведенных в 2024 г. исследований состоит в разработке и применении новых методов, построении новых моделей и изучении ранее не исследованных процессов. В частности, построение схем морфоструктурного районирования создает основу для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений, а также для моделирования сейсмичности с помощью модели блоков и разломов. Эти подходы вносят вклад в разработку более адекватной оценки сейсмической опасности. Развитие математических методов моделирования тектонических процессов на основе данных спутниковой геодезии и решение соответствующих обратных задач позволят выявлять более точные характеристики тектонических процессов, а также реологии литосферы и верхней мантии. Теоретические исследования по проблеме магнитного динамо актуальны и перспективны для создания новых моделей и верификации существующих представлений о происхождении магнитного поля Земли. Исследование и решение

краевых задач теории упругости в конечном итоге внесет вклад в создание физической модели очага землетрясения.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1. МОРФОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

**Болгарский регион.** В 2024 г. были завершены исследования по распознаванию сейсмогенных узлов для М6+ в Болгарском регионе. Распознавание выполнено на основе схемы морфоструктурного районирования (МСР) Болгарского региона, отображающей положение узлов в линейно-амбипланной структуре изучаемой территории (Рис.1).

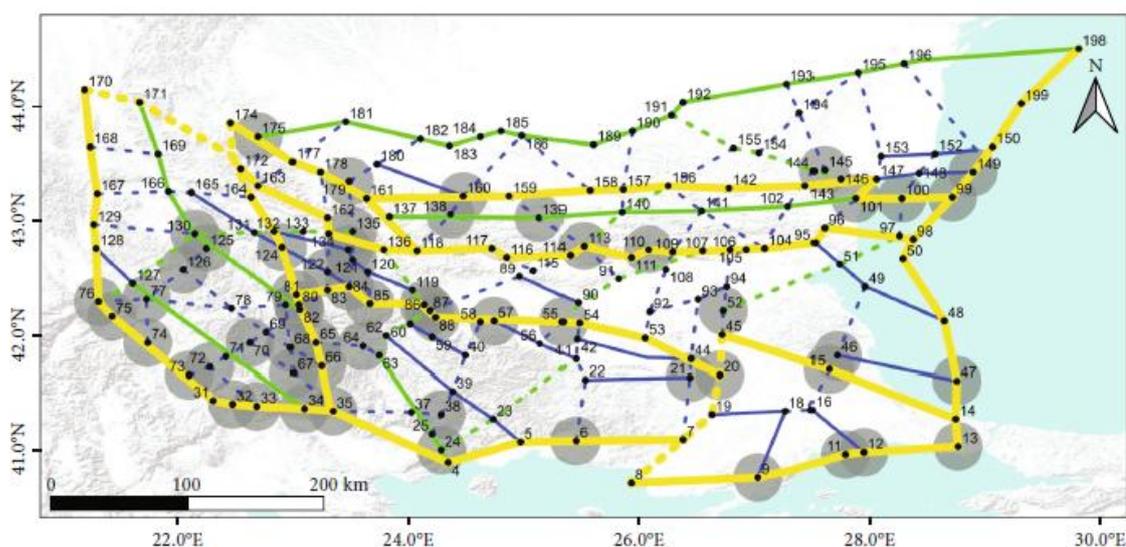


Рисунок 1. Результаты распознавания мест землетрясений с М6+ в Болгарском регионе.

Линиями показаны линейно-амбипланы. Толщина линий соответствует рангу линейно-амбипланов: самые толстые – первый ранг; средней толщины – второй ранг; тонкие – третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линейно-амбипланы, пунктирными – поперечные. Серыми кругами показаны эпицентры землетрясений с М6+. Арабскими цифрами обозначены номера морфоструктурных узлов.

Схема МСР отражает иерархическое линейно-амбипланно-блоковое строение Болгарского региона. Эпицентры землетрясений с М6+ расположены вблизи некоторых пересечений морфоструктурных линейно-амбипланов.

Всего определено 178 узлов, которые составили множество объектов для задачи распознавания. С помощью алгоритма "Кора-3" 59 узлов были распознаны как сейсмоопасные для М6+. Распознанные сейсмогенные узлы были сопоставлены с

активными разломами. На Рис. 2 показано, что практически все сейсмогенные узлы связаны с активными разломами.

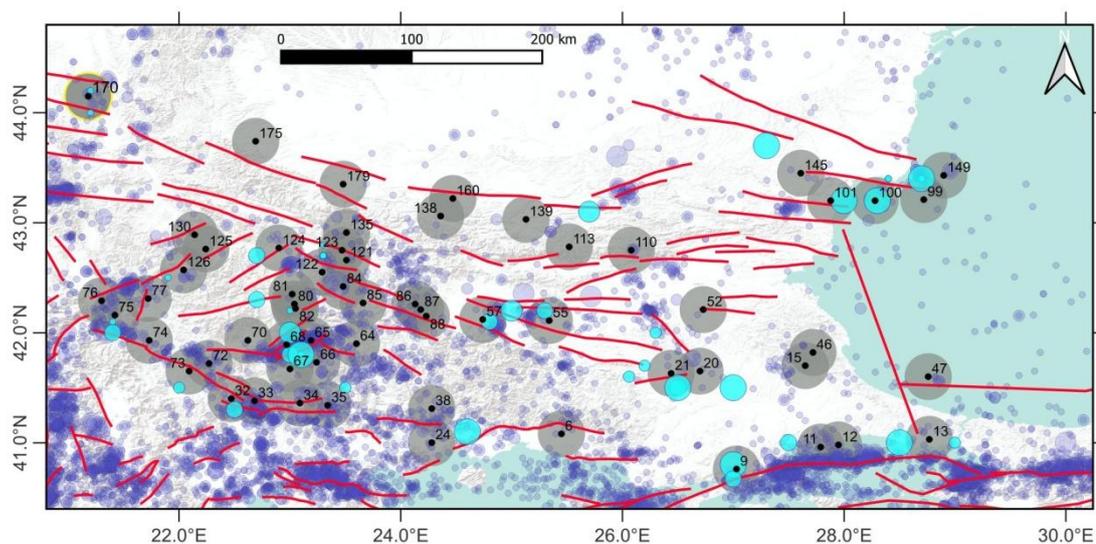


Рисунок 2. Сопоставление сейсмогенных узлов с активными разломами.

Серые круги обозначают опасные узлы для М6+. Красные линии обозначают активные разломы. Голубые точки — эпицентры землетрясений магнитудой М6+. Темно-синие кружки представляют инструментальную сейсмичность, пересмотренную Международным сейсмологическим центром (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>) за период 1900-2021 гг.

Результаты завершеного исследования опубликованы в работе [1].

**Горы Южной Сибири.** Рассмотрена единая сейсмическая зона Южной Сибири, простирающаяся от Алтая до побережья Тихого океана, которая расположена в пределах Центрально-Азиатского подвижного пояса (Рис. 3). Цель исследования определить места наиболее сильных землетрясений в этом регионе с помощью методов распознавания образов. Исследование основано на данных морфоструктурного районирования, единообразно проведенного для всей территории. Крупнейшими тектоническими элементами пояса являются Алтай, Саяны, Байкальская рифтовая зона, область Забайкальских хребтов, Становое нагорье и Становой хребет, а также горное сооружение Сихотэ-Алиня.

Сейсмическая активность в пределах пояса неоднородна. В регионе Алтай, Саяны и Байкальская рифтовая зона произошло 20 событий с М6+. К востоку от Байкальских

рифтов сейсмическая активность ослабевает: здесь зафиксировано шесть событий с магнитудами в интервале 6.0 - 6.4. По уровню сейсмичности Центрально-Азиатский подвижный пояс был разделен на западную и восточную части. К западной (регион I) относятся Алтай, Саяны и Байкальская рифтовая зона, а к восточной (регион II) - область Забайкальских хребтов, Становое нагорье, Становой хребет и Сихотэ-Алинь.

Задача распознавания решена отдельно для каждого региона. В регионе I значение пороговой магнитуды ( $M_0$ ) было принято равным 6, а в регионе II - равным 5,5. Задача решена с помощью алгоритма распознавания с обучением «Кора-3». Объекты распознавания - узлы пересечения линеаментов, описанные единым набором морфометрических и гравио-магнитных параметров.

В регионе I было выделено 140 узлов. В результате распознавания 41 узел был отнесен к высокосейсмичному классу **B**, где возможны события с  $M_6+$ . В регионе I распознанные узлы **B** группируются в отдельных областях. Группа узлов **B** образует высокосейсмичную зону на юго-востоке Алтая и вдоль его границ с Западным Саяном, котловиной Больших озер и Монгольским Алтаем. Другая группа узлов **B**, расположена на линеаменте 1-го ранга, отделяющим Западный и Восточный Саян от хребтов Хангая. Также группа узлов **B** расположена на южной границе региона в пределах Монголии. На Байкале **B**-узлы сконцентрированы на границах южной части Байкальской котловины. Зонами меньшего сейсмического потенциала оказались западный и северо-западный Алтай, внутренние области Западного Саяна, Восточный Саян и западное ограничение Байкальской впадины.

В регионе II было выделено 89 узлов. В результате распознавания 30 узлов отнесены к классу **B**, где возможны землетрясения с  $M_{5.5+}$ . Выявлено 18 потенциально опасных узлов, где до сегодняшнего дня событий такой силы не зафиксировано. В пределах региона II узлы **B** не образуют кластеры, а одиночно рассеяны по площади региона. Большая часть таких узлов сосредоточена в Становом хребте и Становом нагорье. Меньшее количество узлов **B** распознано в Забайкальских хребтах и в пределах Сихотэ-Алиня, что указывает на более низкий сейсмический потенциал этих областей.

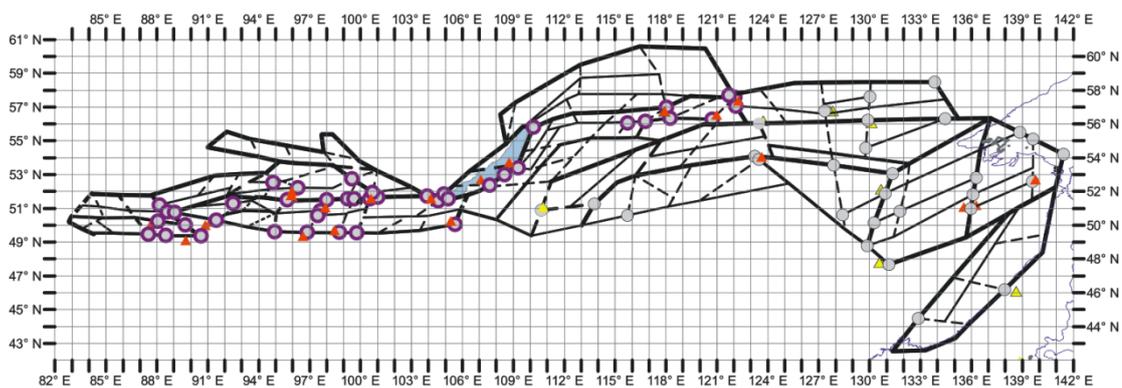


Рисунок 3. Схема морфоструктурного районирования гор Южной Сибири и распознанные сейсмоопасные узлы.

Линиями показаны линеаменты. Толщина линий соответствует рангу линеаментов: самые толстые – первый ранг; средней толщины – второй ранг; тонкие – третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные. Красными треугольниками показаны эпицентры землетрясений с  $M \geq 6,0$ , желтыми треугольниками - эпицентры землетрясений с  $M \geq 5,5$ .

Результаты были представлены на международной конференции [2].

**Исследование связи оруденения с морфоструктурными узлами.** В 2024 г. завершено изучение горно-складчатых сооружений Алтая и Саян с целью (1) выявления особенностей положения крупных и суперкрупных месторождений полиметаллов в линеаментно-блоковой структуре этого региона и (2) определения геолого-геофизических и геоморфологических признаков мест локализации этих месторождений с помощью методов распознавания образов. Исследование включало два этапа. Сначала было проанализировано положение крупных месторождений металлов в линеаментно-блоковой структуре изучаемого региона, которая определена в результате морфоструктурного районирования, выполненного с использованием геологических, геоморфологических данных и материалов дистанционного зондирования Земли. Установлена связь рассмотренных месторождений с узлами пересечения линеаментов (Рис. 4). На втором этапе с помощью математических методов распознавания образов определены характерные геолого-геофизические и геоморфологические признаки узлов, в которых локализованы крупные полиметаллические месторождения. Потенциально рудоносные узлы определены на основе этих признаков.

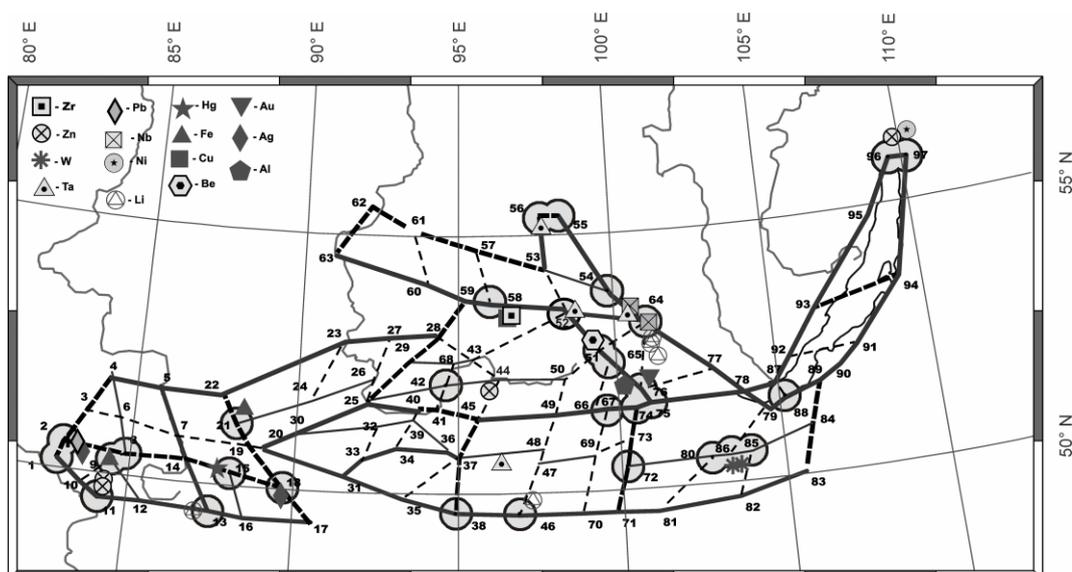


Рисунок 4. Схема морфоструктурного районирования Алтае-Саянского региона и результат распознавания рудоносных узлов.

Линиями показаны линеаменты разных рангов. Цифрами показаны номера узлов, образованными пересечениями линеаментов. Серые круги обозначают узлы, распознанные как рудоносные.

Результаты опубликованы [3].

*Создание баз геоданных сейсмогенных узлов для ГИС.* В рамках этого направления в 2024 г. был создан ГИС-проект геоданных линеаментов и сейсмогенных узлов гор Южной Сибири.

База геоданных предназначена для использования в настольных (Desktop) и web-ГИС-проектах Института, доступ для внутренних и внешних пользователей осуществляется по ссылке на картографические результаты и базы данных Института:

<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/>. Тематической основой базы геоданных Южной Сибири являются опубликованные для этого региона результаты морфоструктурного районирования и распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [2].

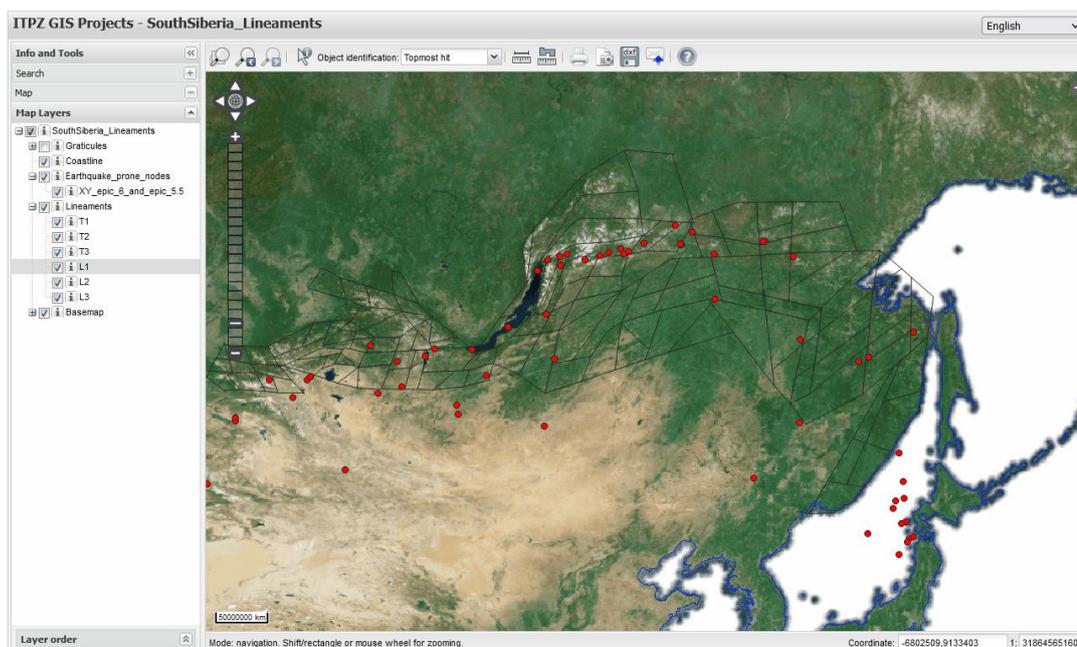


Рисунок 5. Фрагмент базы геоданных Южной Сибири (QGIS Desktop 3.16.10).

Черными линиями показаны линеаменты, красными точками - эпицентры землетрясений с M5.5+.

Получено свидетельство о государственной регистрации базы геоданных Южной Сибири [4].

## 2. ГЕОДИНАМИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Формирование глубоких впадин в Антарктиде.* Совместно с Институтом океанологии РАН исследованы глубочайшие впадины на суше, заполненные льдом. Последние данные о подледном рельефе Антарктиды из проекта BEDMACHINE обнаружили глубочайшие впадины на суше среди всех материков. Глубочайшая впадина на континенте и в мире (на суше) – это впадина Денмана в Восточной Антарктиде (Рис. 6 и 7). Ее глубина достигает 3500м ниже уровня моря, и она существенно превышает глубины Байкала, Каспия и Танганьики. В Антарктиде имеются и другие менее глубокие впадины дна – впадины Бэрда и Бентли, рифт Ламберта, впадины земли Коутс с глубинами больше 2 километров и другие. Все эти впадины заполнены льдом. Такие глубины на порядок превосходят глубины сухих континентальных впадин на других континентах.

Поскольку осадконакопление под ледяным щитом практически невозможно, предполагается, что образование этих глубоких подледных некомпенсированных впадин

связано с активизацией рифтогенеза уже после оледенения Антарктиды. При этом при подходе рифтовой структуры к берегу континента ее подледный рельеф резко выполаживается, что свидетельствует об осадконакоплении в переходной области в периоды таяния льда и последующих морских регрессий-трансгрессий.

Отрицательные гравитационные аномалии в свободном воздухе порядка -100 мГал для многих подледных впадин свидетельствуют в пользу их рифтогенной природы. Рифтогенез предполагает повышенный тепловой поток, что может приводить к подплавлению подошвы ледников и способствовать их ускоренному сползанию с коренного ложа в океан. Именно этим объясняется приуроченность наиболее быстро движущихся ледников в Антарктиде к районам рифтогенных впадин. Предполагается существование подледной вулканической провинции в районе вулкана Гауссберг в Восточной Антарктиде.

Данный результат опровергает устоявшиеся представления о пассивном континентальном блоке Восточной Антарктиды. Вкупе с повышенным тепловым потоком рифтогенез объясняет ретроградные склоны и нестабильность крупных покровных ледников Антарктиды. Большие скорости движения льда в выводных ледниках Амери, Тоттена, Денмана, Гуйетс, Пайн-Айленд и других объясняются повышенным тепловым потоком и частичным плавлением льда на их подошве. Сейсмичность на основе каталога ISC также показывает современную активность части тектонических структур Антарктиды.

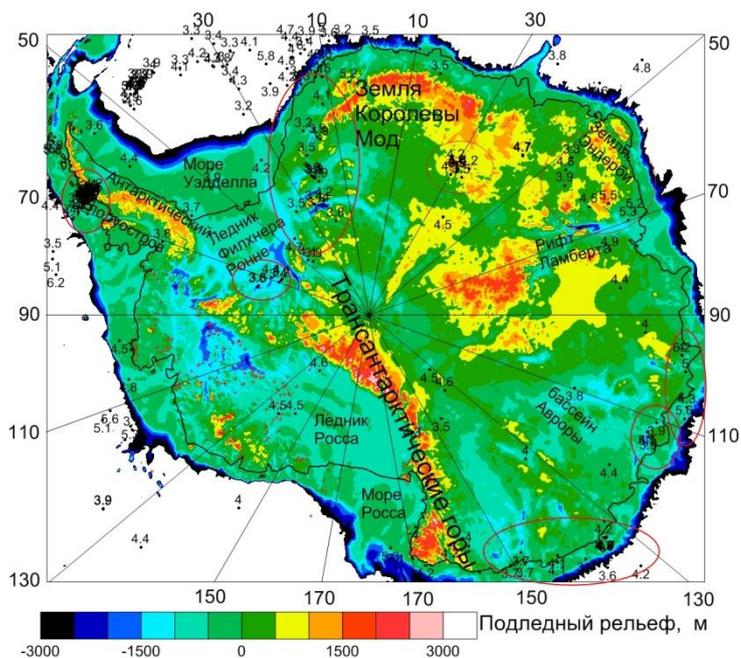


Рисунок 6. Карта подледного рельефа. Обнаруженные вулканы показаны красными крестиками. Черными точками показаны сейсмические события.

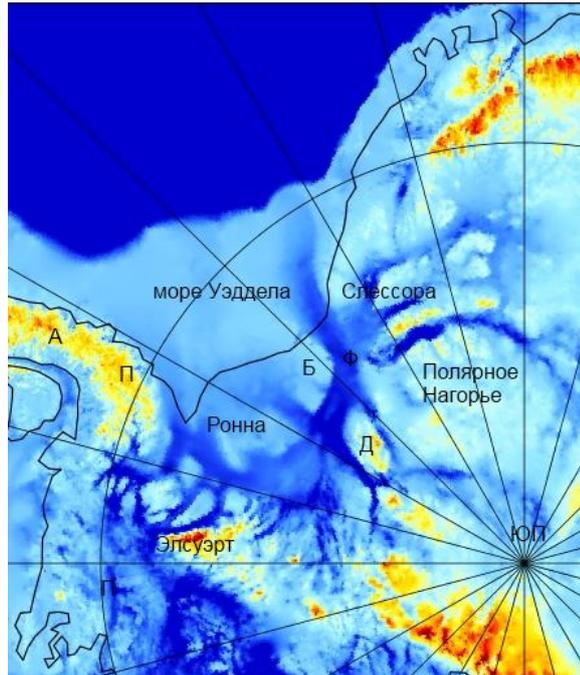


Рисунок 7. Карта подледного рельефа для Атлантического сектора Антарктиды.

В результате исследования обосновано происхождение и современная активность части тектонических структур Антарктиды, в том числе и глубочайших континентальных впадин с ретроградными склонами (при подходе к берегу подледный рельеф быстро выполаживается). Данная особенность ускоряет сток ледников в океан по мере отступления зоны заземления ледников от берега вглубь континента.

Результат опубликован в работе [5].

**Модель движения покровного ледника.** Совместно с Институтом океанологии РАН получена оценка скорости стекания ледовой массы по коренному ложу в океан на основе двумерной модели движения покровного ледника как нелинейно вязкой жидкости вдоль профиля от гор Элсуэрт до границы ледника Туэйтс в Антарктиде. Следует отметить важную особенность данного профиля (Рис. 8). При подходе к берегу подледный рельеф коренных пород резко выполаживается. Объяснение этого феномена Антарктиды связано с позднекайнозойской активизацией рифтогенеза уже после оледенения континента. Уникальность ситуации для ледяного континента заключается в том, что после оледенения происходит прекращение осадконакопления. Продолжение рифтогенеза в этих условиях приводит к формированию глубоких подледных впадин, заполненных

льдом. У берега же происходит периодическая регрессия-трансгрессия моря. В период таяния льда возобновляется осадконакопление, а внутри континента этого не происходит. Поднятие дна при подходе к берегу тормозит стекание ледника, поэтому при отступлении зоны заземления вглубь континента сечение стока будет увеличиваться, и движение льда ускоряться. Таким образом, при отступлении ледника возникает положительная обратная связь. Эта особенность характерна для наиболее нестабильных и быстро стекающих ледников.

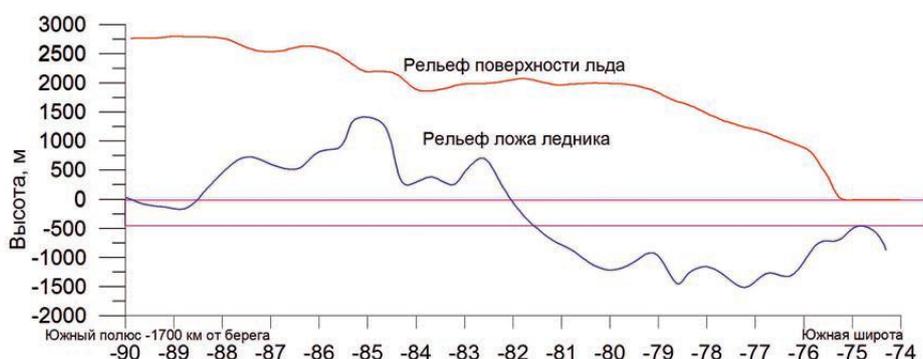


Рисунок 8. Профиль рельефа коренной породы и поверхности льда от Южного Полюса до береговой линии ледника Туэйтс.

Основной вывод исследования указывает на существующую опасность быстрого повышения уровня моря (дни-месяцы) на десятки сантиметров-первые метры не за счет длительного таяния ледников, а за счет быстрого сползания с суши в море крупных выводных ледников Антарктиды. В этом случае произойдет вытеснение воды равное объёму ледника ранее лежавшего на суше.

Результат опубликован в работе [6].

**Механизм потепления климата за счет естественных причин.** Совместно с Институтом океанологии РАН предложен альтернативный антропогенному механизм потепления климата за счет естественных причин и показана антикорреляция антропогенных выбросов и повышения температуры на Земле. Предлагается механизм эмиссии метана из газгидратов в полярных областях вызванный природными явлениями, такими как сильнейшие землетрясения с последующей передачей газгидратам добавочных напряжений от сильнейших землетрясений с помощью деформационных волн в литосфере Земли.

После запуска процесса фильтрации газа в результате разрушения микроструктуры пор и резкого повышения проницаемости геосреды вследствие воздействия деформационной волны процесс эмиссии метана может продолжаться автономно в течение десятков и даже сотен лет в зависимости от толщины нарушенного газонасыщенного слоя. Этим объясняется продолжающаяся эмиссия метана на арктическом шельфе последние сорок с лишним лет после инициировавших ее сильнейших землетрясений середины прошлого века.

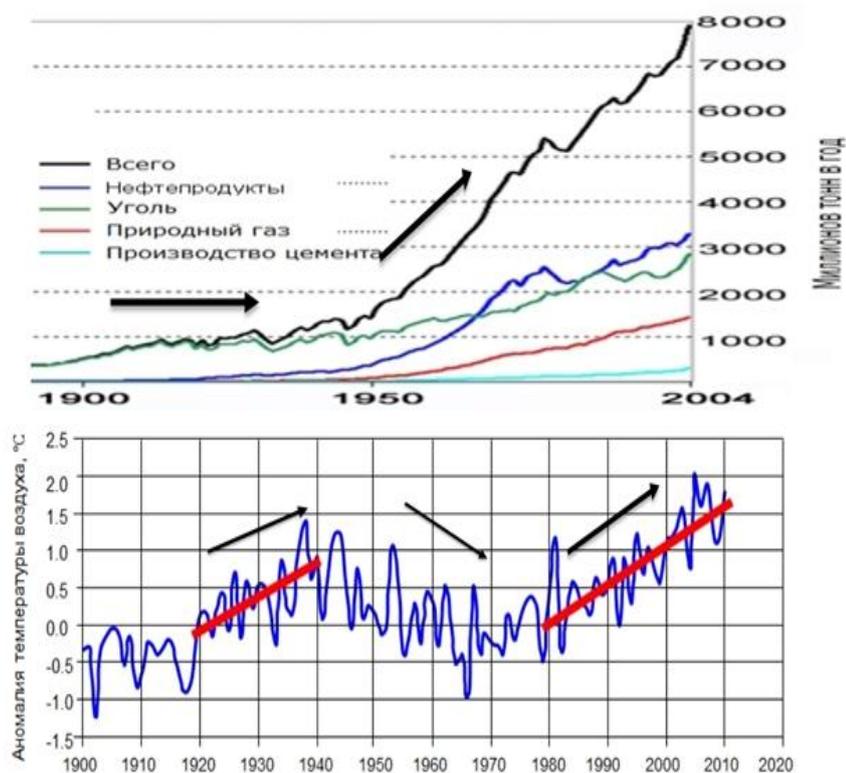


Рисунок 9. Сопоставление графика объемов выбросов  $\text{CO}_2$ , и графика изменения средней температуры в Арктике на протяжении 20-го и начала 21-го веков. Красными жирными линиями показаны фазы быстрого потепления.

Показано, что в голоцене были температурные максимумы выше современной температуры. При этом антропогенной деятельности человека в эти периоды не было. Также показана антикорреляция антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  и роста глобальной температуры во второй половине 20 века. Предложена альтернативная антропогенной гипотеза естественного потепления климата.

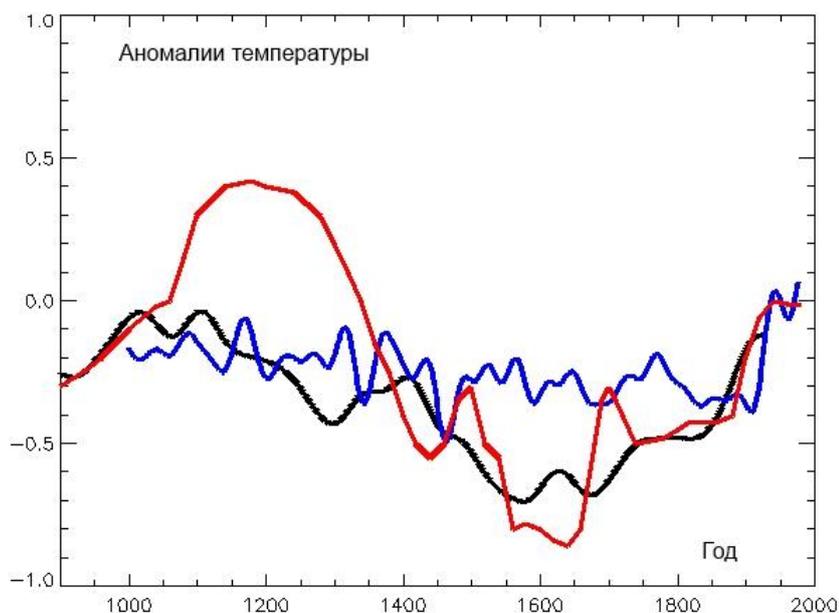


Рисунок 10. Изменение средней температуры Земли за последнюю тысячу лет. Красный график – глобальная температура из отчета МГЭИК 1990 г. синий график – глобальная температура из отчета МГЭИК 2001 г; черный график – глобальная температура.

Приведенные модель и расчеты (Рис. 9 и 10) показывают, что существуют естественные причины глобального потепления и переход на углеродную нейтральность не является необходимым.

Результат опубликован в работе [7].

### 3. ИЗУЧЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ РАЗЛОМОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

Моделирование деформаций земной коры в окрестности подвижных разломов позволяет оценить интенсивность накопления сейсмогенных напряжений, а также локализацию возможных очагов землетрясений. Информация о потенциальных очагах служит необходимым для моделирования движений по разломам широко применяются спутниковые геодезические системы, которые позволяют при наличии развитой сети наземных наблюдений ГНСС оценивать региональную разломно-блоковую кинематику. В 2024 г. результаты моделирования сейсмогенных напряжений по данным ГНСС, выполненные Г.М.Стебловым, были использованы в совместных работах с ИФЗ РАН для выявления потенциальных очагов землетрясений на Сахалине и Кавказе.

**Сахалин.** Разработан и апробирован на острове Сахалин алгоритм выделения зон сейсмической генерации или «сейсмических доменов» с использованием нечеткой логики (Рис. 11). Исходные данные получены из диаграмм распределения «слабых» зон, асимметрии распределения высот рельефа и величины современной деформации территории за один год. Обработка данных производилась с использованием  $\gamma$ -оператора в нечеткой логике с  $\gamma = 0,9$ , что позволило выделить территории с высокой сейсмической активностью. Зоны, где эти активные территории пересекаются с зонами с повышенными значениями сжимающих напряжений, определенными компьютерным моделированием, считались сейсмическими зонами. Показано, что при недостаточном количестве исходных материалов можно исключить информацию о современном поле деформаций из рассмотрения и использовать предполагаемую сетку активных разломов для компьютерного моделирования. Такой подход может быть полезен при анализе территорий, которые недостаточно изучены.

Кроме того, предлагаемый алгоритм выделения зон сейсмической генерации предполагает использование результатов компьютерного геодинамического моделирования, что позволяет выявить области с повышенными относительными значениями сжимающих напряжений. Методология, алгоритм и полученные результаты для острова Сахалин описаны в [8].

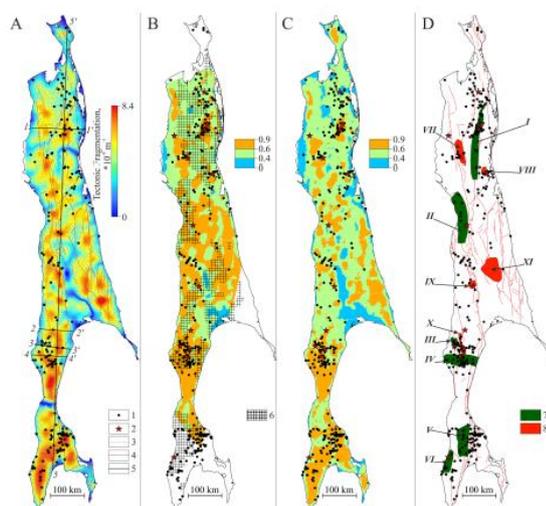


Рисунок 11. Карта тектонической раздробленности Сахалина (А), результаты обработки  $\gamma$ -оператором с ГНСС (В) и без ГНСС данных (С), зоны сейсмогенерации (D). 1–2 – эпицентры землетрясений с магнитудой: 1 –  $M < 5,5$ ; 2 –  $M \geq 5,5$ ; 3 – «слабые» зоны; 4 – активные разрывные нарушения; 5 – положение профилей тектонической

раздробленности; 6 – области локализации максимальных сжимающих напряжений, по [9]; 7 – зоны сейсмогенерации, по [9]; 8 – зоны сейсмогенерации, выделенные разработанным алгоритмом.

Результаты опубликованы в работе [9].

**Кавказ.** Совместно с ИФЗ РАН [10] было проведено определение потенциальных очаговых зон (ПЗОЗ) на Большом Кавказе. Было рассмотрено шестнадцать морфометрических параметров рельефа, положительные аномалии которых соответствуют сейсмическим областям Большого Кавказа. Анализ четырех параметров, которые, как считалось, дают наибольшую информацию с использованием  $\gamma$ -оператора в нечеткой логике, позволил разработать схему индекса неотектонической активности, которая использовалась вместе с результатами компьютерного геодинамического моделирования для выявления потенциальных зон очагов землетрясений (ПЗОЗ). Результат представлен на Рис. 12. Новый подход не требует детальной информации о современной и палеосейсмичности, поэтому может быть использован для решения аналогичной задачи для территорий, сейсмотектоника которых изучена слабо. Продемонстрирована взаимосвязь между современными деформациями и региональной сейсмичностью. Данные GNSS, представленные и обработанные сотрудниками ИТПЗ РАН, позволили оценить  $M_{\max}$  для всего Большого Кавказа.

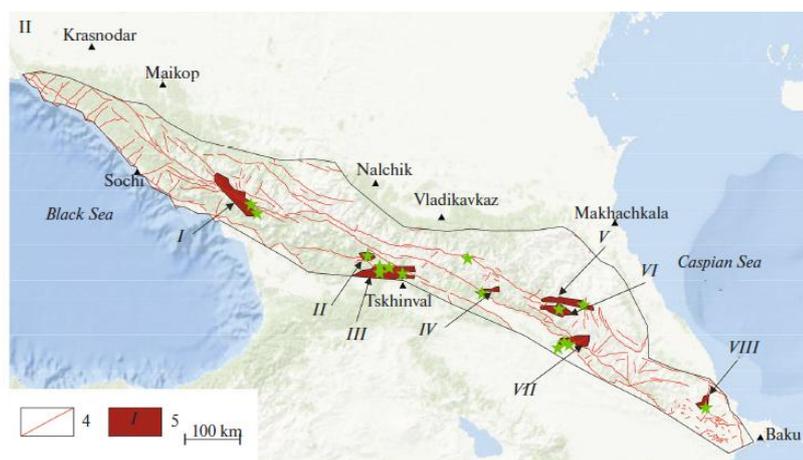


Рисунок 12. Картографирование индекса тектонической активности, полученного на основе анализа  $\gamma$ -оператором нечеткой логики (I) и ПЭСЗ Большого Кавказа (II). Звездочки - эпицентры землетрясений с  $M \geq 5,5$ ; (4) активные разломы; (5) потенциальные зоны очагов землетрясений (ПЗОЗ) с римскими цифрами, указывающими номер зон.

#### 4. ВОПРОСЫ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

*Асимптотика ветвления семейств наименее устойчивых магнитных мод блоховского типа.* Была изучена асимптотика ветвления семейств наименее устойчивых магнитных мод блоховского типа. Ранее авторами отчета в работах по этому направлению было численно показано, что, при кинематической генерации блоховских магнитных мод пространственно-периодическими течениями электропроводной жидкости, моды, имеющие максимальный по блоховскому волновому вектору  $\mathbf{q}$  инкремент роста, выстраиваются в семейства, гладко параметризованные величиной молекулярной магнитной диффузии  $\eta$ . Было доказано, что максимальный инкремент роста поля может достигаться в семействах, отвечающих т.н. полуцелым  $\mathbf{q}$ , у которых все компоненты - целые или полуцелые числа, постоянные для всего семейства. От таких семейств могут ответвляться другие семейства, в которых оптимальное  $\mathbf{q}$  для доминирующих мод гладко зависит от магнитной диффузии. Для семейства, ответвляющегося от семейства мод, отвечающих  $\mathbf{q}=0$ , были построены совместные асимптотические разложения магнитных мод, собственных значений оператора магнитной индукции, и оптимальных  $\mathbf{q}$  в виде степенных рядов по малому параметру  $|\eta_0 - \eta|^{1/2}$ , где  $\eta_0$  - точка ветвления семейства для  $\mathbf{q}=0$ . За отчетный период было построено аналогичное асимптотическое разложение для случая, когда моды в семействе, от которого происходит ответвление, отвечают ненулевому постоянному полуцелому  $\mathbf{q}$ . Оно оказалось существенно проще, т.к. роль малого параметра, по которому происходит разложение, теперь играет величина  $|\eta_0 - \eta|$ . Такие разложения объясняют особенности поведения мод и их инкрементов роста в окрестности точки ответвления  $\eta_0$ .

*Решение уравнений гидродинамики и магнитогидродинамики.* Обнаружено, что для пространственно-аналитических пространственно-периодических решений уравнений гидродинамики и магнитогидродинамики происходит вырождение нелинейности нового вида. Нелинейность в этих уравнениях представлена слагаемыми только вида производных вдоль векторных полей (которые имеют структуру  $(\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{d}$ , где поле  $\mathbf{d}$  соленоидально). Элементарная оценка для соленоидальных пространственно-периодических модифицированных решений уравнений гидродинамического типа показывает, что из-за такой особой структуры нелинейных слагаемых они допускают

оценку псевдодифференциальным оператором не первого, а половинного порядка, т.е. у них в некотором смысле отсутствует половина пространственного градиента.

Данный механизм вырождения нелинейности был использован для конструирования итеративной процедуры, увеличивающую известную на настоящее время оценку гарантированного времени пространственной аналитичности гидродинамических решений. Каждая итерация состоит из двух этапов. На первом этапе энтропия модифицированного решения и оценка снизу радиуса аналитичности решения уравнения Навье-Стокса одновременно растут. На втором этапе энтропия и оценка одновременно уменьшаются. Это обеспечивает увеличение длины гарантированного времени пространственной аналитичности почти такого же порядка по малой вязкости, как и известных ранее оценок. Аналогично можно построить улучшенную оценку времени аналитичности решений уравнений диффузионной гидродинамики.

**Программные разработки.** Продолжена работа над программой расчета временной эволюции магнитного поля, генерируемого тепловой конвекцией в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси. Этот код уже функционировал в 2023 г., однако имел недостаточное, с нашей точки зрения, быстродействие для решения задачи поиска инверсий магнитного поля, для чего он предназначен. Для увеличения скорости интегрирования уравнений конвективного динамо по времени в отчетный период был запрограммирован и встроен в этот код явно-неявный метод Рунге-Кутты 2-3 порядка IMEXRKCB3c с контролем точности интегрирования и автоматическим выбором шага интегрирования.

**Вычислительные исследования.** (1) Была продолжена работа по численному исследованию операторов магнитной индукции и переноса пассивного скаляра квазипериодическими течениями [11-14]. В вычислениях 2023 г. по задаче о кинематической генерации магнитного поля квазипериодическими по пространству течениями мы столкнулись со следующей сложностью: Если течение и, следовательно, магнитное поле имеют две несоизмеримые пространственные частоты  $\omega_n$ ,  $n=1,2$ , то можно найти целые числа  $p$  и  $q$  такие, что  $|p\omega_1 - q\omega_2|$  меньше любого наперед заданного числа. Поэтому, спектр оператора Лапласа не отделен от нуля; простым увеличением пространственного разрешения вычислений эта проблема не обходится.

В 2024 г. был найден следующий путь обхода этой проблемы: Хотя такие  $p$  и  $q$  всегда можно выбрать, их величина не лимитирована, и для некоторых пар  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  они

оказываются достаточно большими. Поэтому численные решения для таких пар несоизмеримых частот имеют достаточное затухание спектра при вычислительно приемлемых разрешениях. Это наблюдается, например, для  $\omega_1/\omega_2=\sqrt{25/7}$  и разрешения  $32^6$  гармоник Фурье.

(2) Если течение и, соответственно, магнитное поле имеют две несоизмеримые временные частоты, то необходимо решать задачу на собственные значения для оператора, в котором учитывается производная по времени (задача Флоке). При использовании степенного метода вычисления доминирующего собственного значения и его оптимизированных модификаций, которые мы применяли для расчета решений задач динамо, мнимая часть алгебраически доминирующего собственного значения (определенная с точностью до кратного временных частот генерирующего течения) испытывает паразитный рост, если в расчетах не принимать препятствующих этому мер.

В 2024 г. был найден следующий путь решения этой проблемы с использованием альтернативного метода вычисления доминирующего собственного значения. Как известно, интеграл от резольвенты некоторого линейного оператора  $L$  по некоторому замкнутому контуру в комплексной плоскости является проектором на собственное подпространство оператора  $L$ , натянутое на собственные векторы, отвечающие собственным значениям, лежащим внутри данного контура. Взяв в качестве такого контура окружности достаточно малого радиуса, и проведя численное интегрирование действия резольвенты оператора магнитной индукции на (почти любое) векторное поле, мы можем вычислить собственную функцию этого оператора, ассоциированную с максимальным инкрементом роста и минимальной мнимой частью собственного значения  $L$  (если оно комплексно). Отметим, что такой подход к вычислительным задачам кинематического динамо ранее никем не применялся.

***Палеомагнитные исследования.*** Проведены исследования на реальных палеомагнитных данных свойств метода определения направлений. Напомним, что для изверженных пород, по найденным в каждом образце векторам остаточной намагниченности последующей обработкой данных получают направление, отвечающее группе образцов. При этом возникает важный вопрос: насколько это направление близко к направлению древнего поля и как можно количественно оценить возможное отклонение? Метод Р.А. Фишера обработки группы направлений (далее для краткости будем упоминать его как «метод a95») предполагает, что измеренные направления в образцах, взятых из потока лавы, можно статистически описать формулой Фишера осесимметричного

распределения, зависящего от единственного неизвестного параметра концентрации, и дополнительно принять, что ось симметрии этого распределения и задает направление древнего поля. Была применена ранее опубликованная методика для оценки точности направления для отдельного образца, которая исходя из промежуточных лабораторных результатов определения остаточной намагниченности, позволяет указать доверительный конус, в котором лежит направление древнего поля для единичного образца. Если доверительные конусы различных образцов пересекаются, то направление древнего поля лежит в этом пересечении с вероятностью, которая вычисляется как произведение доверительных вероятностей для каждого из конусов. Тем самым для группы синхронизированных образцов можно указать область (сложной формы, вообще говоря), в которой лежит направление древнего поля с заданной вероятностью. При этом необходима характеристика качества магнитной чистки каждого из образцов, на текущем этапе исследования групп рассматривались два значения этой характеристики, условно "высокую" и "среднюю" точности магнитной чистки. Если доверительные конусы не пересекаются, то это указывает на несовместимость предположения о качестве образцов с предположением общего для них направления древнего поля. Для теста сначала выбирают сначала требуемые доверительные вероятности конусов образцов. Например, для пяти образцов средней точности, отобранных из одного потока, следует рассмотреть на сфере. Вероятность попасть в это пересечение будет равна 0.951. Если пересечение доверительных конусов для образцов окажется пустым, то это будет указанием на то, что данная группа направлений не должна рассматриваться как случайные независимые отклонения от истинного направления древнего поля. Поскольку в методе a95 даже и при пустом пересечении усредненное направление может быть вычислено, то такой тест будет показывать насколько вообще ответ по методу a95 соответствует задаче определения направления древнего поля. Для тестирования был выбран хорошо изученный в палеомагнитном плане объект, расположенный в пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса – одной из крупнейших окраинно-континентальных вулканогенных провинций в истории Земли. Пояс сложен разнообразными вулканическими, реже вулканогенно-осадочными породами. При относительно небольшой ширине (первые сотни километров) выходы Охотско-Чукотского вулканогенного пояса протягиваются практически вдоль всего Северо-Востока Евразии на более чем 3 000 км. Дискуссии вокруг возраста формирования провинции идут до сих пор, однако, согласно современным прецизионным изотопно-геохронологическим данным, возраст принимают в 106–74 млн. лет. Всего рассмотрено 812 образцов, поделенных на 78 синхронных внутри себя групп

(потоков) и к каждой группе образцов применен тест при двух разных предположениях точности чисток: высокой и средней. В предположении высокой точности окажется, что лишь для чуть более 20% потоков существуют непустые доверительные области для древнего поля. В предположении средней точности 90% потоков показывают существование непустых доверительных областей для общего направления древнего поля, а исключительными и потому подлежащими дополнительной проверке являются группы образцов в остальных 10% потоков. Для существующих доверительных областей различия направлений их барицентров от направлений соответствующих усреднений по образцам превышают четыре градуса в 7% случаев, в 74% процентах случаев эти различия составляют менее двух градусов, а в 36% случаев – менее одного градуса. Это практическое применение метода показало, что новый тест согласования образцов в группе вполне может выделять группы образцов, для которых использование метода  $a_{95}$  является сомнительным. При этом не требуется большого набора образцов, чтобы установить факт отличия распределения направлений образцов от предписываемого формулой Фишера. В случае непустой доверительной области для направления древнего поля тест не дает оснований вводить значимые поправки к направлению, получаемому по формуле Фишера. Таким образом, новый тест целесообразно использовать одновременно с обработкой группы направлений традиционным методом  $a_{95}$  для большей обоснованности. Авторы работают над имплементацией нового теста в пакет программ для обработки лабораторных результатов палеомагнитных данных.

## 5. ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИНАМО

*Устойчивость конвективных валов в плоском слое, вращающемся относительно наклонной оси.* Исследована устойчивость валов в плоском горизонтальном слое, подогреваемом снизу и вращающемся относительно наклонной оси, в приближении Буссинеска. На горизонтальных границах предполагаются условия прилипания. Показано, что критическое число Рэлея и критическое волновое число наиболее неустойчивой моды для установления конвекции не зависят от горизонтальной компоненты угловой скорости. Устойчивость валов в нелинейном режиме была исследована численным интегрированием уравнений конвекции. Результаты вычислений указывают, что валы становятся более устойчивыми с увеличением горизонтальной компоненты, при условии, что остальные параметры системы фиксированы.

**Новый алгоритм решения задач методом Галеркина.** Метод Галеркина часто используется для численного интегрирования задач гидродинамики и магнитогидродинамики, таких как уравнение Навье-Стокса и уравнение магнитной индукции. Для задач с физическими граничными условиями, например, условия прилипания для жидкости, использование традиционного алгоритма предполагает решение системы линейных уравнений на каждом шаге интегрирования. При использовании нового алгоритма решение системы уравнений заменяется проектированием на пространство небольшой размерности, или же решением модифицированной системы уравнений, которое требует меньшего количества операций, и проектированием. Тем самым, уменьшается количество операций, требующееся для решения задачи. Метод применен для решения уравнений конвекции.

**Инверсии магнитного поля в задаче галактического динамо: зависимость от коэффициента магнитной диффузии.** Генерация магнитного поля в различных задачах гео- и астрофизики описывается механизмом магнитного динамо. Для галактик часто предполагается, что толщина галактического диска мала по сравнению с его протяженностью в горизонтальных направлениях. Временная эволюция магнитного поля подчиняется уравнениям, в котором учитываются дифференциальное вращение и альфа-эффект. Предполагается, что система осесимметрична. Уравнения решаются численно с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка. Исследуется зависимость магнитного поля от коэффициента магнитной диффузии, при условии, что все остальные параметры системы фиксированы. Для больших значений коэффициента магнитное поле отсутствует, а при его уменьшении возникает аттрактор с нетривиальным магнитным полем. При дальнейшем уменьшении коэффициента в системе появляются множественные аттракторы, в некоторых из них наблюдаются инверсии магнитного поля. Для достаточно малых значений коэффициента инверсии становятся контрастными, с большими значениями градиентов магнитного поля на границах регионов различной ориентации.

**Формирование магнитного поля на больших расстояниях от центра галактики.** Магниторотационная неустойчивость — это гидродинамический эффект, связанный с неустойчивостью течения жидкости в магнитном поле. В случае течения немагнитной жидкости должны иметь место достаточно большие градиенты угловой

скорости для того, чтобы течение оказалось неустойчивым. В то же время для возникновения магниторотационной неустойчивости достаточно убывания угловой скорости с практически любым градиентом. Исследуется возможность генерации магнитного поля во внешних областях галактики за счет действия как динамо, так и магниторотационной неустойчивости. Поведение системы описывается дифференциальным уравнением, полученным из уравнений Навье-Стокса и уравнения магнитной индукции, в которых учитываются дифференциальное вращение, в приближении плоского слоя. Задача на собственные значения для этой системы решается с использованием методов теории возмущений. Линейное, а в некоторых случаях квадратичное, приближения к собственным значениям, хорошо согласуются с величинами, полученными численно. Показано, что генерация магнитного поля может иметь место как за счет механизма динамо, так и за счет магниторотационной неустойчивости. Для случая нелинейной задачи магнитное поле также может успешно генерироваться как с помощью механизма динамо с учетом нелинейных эффектов, так и за счет магниторотационной неустойчивости. При этом поле, которое может сформироваться за счет данного явления, быстро убывает с расстоянием (Рис. 13). Поэтому можно предполагать, что более значимую роль на таком удалении играют нелинейные эффекты механизма динамо [15-21].

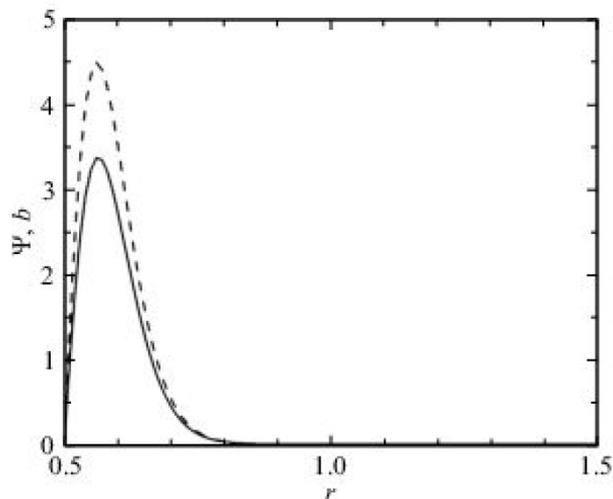


Рисунок 13. Магнитное поле, отвечающее доминирующей собственной функции.

## 6. ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Получены новые точные решения краевой задачи теории упругости.

1. Построено точное решение краевой задачи теории упругости для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты (полосы) с поперечной трещиной, расположенной на вертикальной оси симметрии (Рис. 14). Решение ищется в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых определяются в явном виде. Метод решения не зависит от вида однородных граничных условий на сторонах плиты. На разрезе может быть задан разрыв продольных перемещений (вдоль оси плиты) или нормальные напряжения, действующие на берегах трещины. В первом случае неизвестные коэффициенты легко находятся с помощью классического соотношения ортогональности Папковича. Во втором случае решение задачи усложняется, т.к. сначала потребуется найти перемещения на разрезе, соответствующие заданным там напряжениям, и только потом воспользоваться соотношением ортогональности Папковича. Чтобы определить неизвестные перемещения, вводится функция, сконструированная определенным образом из собственных функций Папковича–Фадля так, что она допускает аналитическое продолжение во всю полосу, кроме точек разреза. Для построения аналитических продолжений используется преобразование Бореля. На примерах проиллюстрирована последовательность решения задачи в том случае, когда на берегах разреза заданы нормальные напряжения. Одно из решений сравнивается с решением соответствующей задачи для неограниченной плоскости с трещиной. Показана эквивалентность задачи с разрывом перемещений и неоднородной задачи теории упругости в свободной плите. Аналогично можно построить решение четносимметричной задачи для плиты с жестко защемленными сторонами. Для этого нужно просто воспользоваться соответствующими собственными функциями Папковича–Фадля. Для других однородных граничных условий, например, отвечающих подкреплению сторон плиты ребрами жесткости, нужно воспользоваться другим соотношением ортогональности Папковича, полученным авторами, т.к. классическое соотношение ортогональности Папковича справедливо только в тех случаях, когда стороны плиты свободны или жестко защемлены. Причина заключается в том, что те математические приемы, которые использовались при построении известных соотношений ортогональности Папковича, не работают в случае плиты с подкрепленными сторонами. Полученное решение может быть использовано в теории очага землетрясений точно так

же, как ранее использовалось для этих целей классическое решение для плоскости с трещиной.

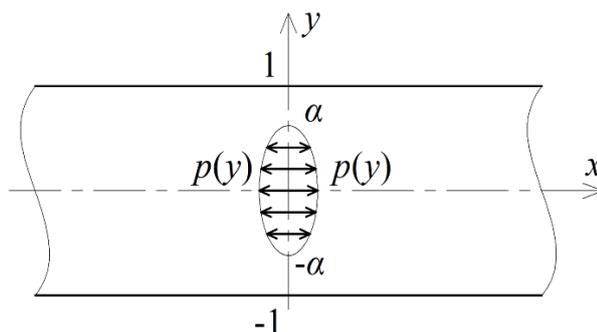


Рисунок 14. Плита с заданными на берегах трещины нормальными напряжениями.

Результаты опубликованы в [22, 23].

2. Построено точное решение краевой задачи теории упругости о растяжении тонкой полубесконечной прямоугольной плиты (полосы), длинные стороны которой свободны, а торец жестко заземлен (Рис. 15). Решение представляется рядами по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых определяются в явной форме. В основе решения лежат два фундаментальных результата по теории базиса систем собственных функций Папковича–Фадля: соотношение ортогональности Папковича и разложения Лагранжа по собственным функциям Папковича–Фадля. Решение задачи складывается из двух решений: 1) элементарного решения четно-симметричной задачи для свободной плиты, находящейся под действием приложенных справа и слева на бесконечности постоянных растягивающих напряжений, равных 1, и 2) решения неоднородной четно-симметричной задачи для свободной плиты, на которую вдоль оси  $y$  действует некоторая внешняя распределенная нагрузка. Внешняя нагрузка должна быть такой, чтобы отвечающие ей перемещения на оси  $y$  были равны взятым с обратным знаком поперечным перемещениям из элементарного решения. Приведены асимптотические формулы для напряжений в угловых точках плиты. Проведено сравнение полученного решения с численным. Численное решение было получено на основе метода конечных элементов в упругой постановке с использованием сертифицированного программно-вычислительного комплекса ZSoil. Установлен характер поведения напряжений в окрестности угловых точек плиты. В частности, вопреки укоренившемуся мнению, показано, что особенность в угловых точках, являющихся точками смены типа граничных условий, имеет не степенной, а логарифмический характер. Полученное решение может быть полезно при анализе напряженно-

деформированного состояния литосферных плит в окрестности угловых точек, являющихся точками смены типа граничных условий.

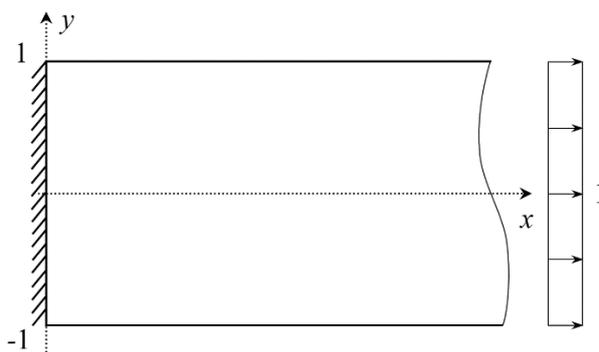


Рисунок 15. Плита со свободными длинными сторонами и защемленным торцом.

Результат опубликован в [24].

**3.** Построено точное решение неоднородной задачи для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты (полосы), вдоль длинных сторон которой имеются ребра жесткости. Внутри плиты вдоль ее вертикальной оси приложена внешняя нагрузка (Рис. 16). Рассмотрена только четно-симметричная деформация. Ребра жесткости подобраны так, что их жесткость эквивалентна жесткости плит, примыкающих к рассматриваемой плите вдоль ее границ. Метод решения основан на соотношении ортогональности Папковича, что позволяет существенно упростить процесс решения, а окончательные формулы представить в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых записываются в простом явном виде. Впервые было предложено соотношение ортогональности Папковича, не зависящее от вида однородных граничных условий на сторонах плиты, так как классическое соотношение ортогональности Папковича справедливо только для тех случаев, когда стороны плиты свободны или жестко защемлены. Из полученного решения легко получаются предельные случаи: когда прослойка нет и когда они абсолютно жесткие. Проведено сравнение полученного решения с решением аналогичной задачи для плиты со свободными сторонами. Установлено, что в том случае, когда внешняя нагрузка задана по всей ширине плиты, значения напряжений в плите без ребер жесткости при приближении к границам плиты логарифмически возрастают (из-за нарушения закона парности касательных напряжений), в то время как для плиты с ребрами они конечны. Результаты получены впервые и могут быть использованы при анализе напряженно-деформированного состояния в тех случаях, когда стык литосферных плит идет вдоль длинных сторон. В этом случае можно оценить влияние примыкающих плит.

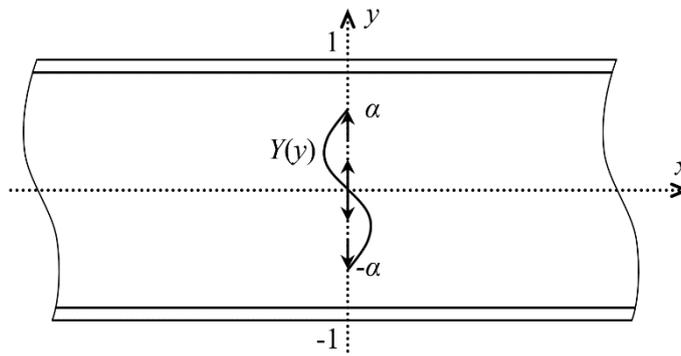


Рисунок 16. Схема неоднородной задачи для плиты с ребрами жесткости.

Результат опубликован в [25].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования являются вкладом мирового уровня в решение изучавшихся в рамках темы проблем геодинамики и геофизики. Получены следующие основные результаты.

Совместно с болгарскими коллегами завершены исследования по идентификации мест сильных землетрясений с  $M_b+$  в Болгарском регионе. Показано, что выявленные сейсмогенные морфоструктурные узлы хорошо коррелируют с активными разломами, что позволяет локализовать места возможных событий с  $M_b+$  в зонах активных разломов. Положение выявленных потенциальных сейсмогенерирующих источников вносит важный вклад в решение проблемы оценки сейсмической опасности Болгарского региона.

Составлена схема морфоструктурного районирования протяженной системы гор Южной Сибири, простирающейся от Алтая до побережья Тихого океана. На этой основе с помощью методов распознавания образов в пределах горного пояса определены места сильных землетрясений. Данные о положении потенциальных сейсмогенных узлов позволят значительно улучшить оценки сейсмической опасности юга Сибири и Приморья.

Завершены исследования по выявлению потенциально рудоносных узлов методами распознавания образов в Атайско-Саянском регионе. Результаты могут быть полезны при планировании и проведении поисковых работ в этом регионе.

Совместно с Институтом океанологии РАН исследованы глубочайшие впадины на суше, заполненные льдом. В результате исследования обосновано происхождение и современная активность части тектонических структур Антарктиды, в том числе и глубочайших континентальных впадин.

Совместно с Институтом океанологии РАН получена оценка скорости стекания ледовой массы по коренному ложу в океан на основе двумерной модели движения покровного ледника как нелинейно вязкой жидкости. Исследование указывает на существующую опасность быстрого повышения уровня моря (дни-месяцы) на десятки сантиметров-первые метры не за счет длительного таяния ледников, а за счет быстрого сползания с суши в море крупных выводных ледников Антарктиды.

Совместно с Институтом океанологии РАН предложен альтернативный антропогенному механизм потепления климата за счет естественных причин и показана антикорреляция антропогенных выбросов и повышения температуры на Земле. Исследование показывает, что существуют естественные причины глобального потепления и переход на углеродную нейтральность не является необходимым.

Совместно с ИФЗ РАН были определены потенциальные очаговые зон на Большом Кавказе. Анализ данных ГНСС, проведенный в ИТПЗ РАН, позволил оценить  $M_{max}$  для всего Большого Кавказа.

Совместно с ИФЗ РАН разработан и апробирован на острове Сахалин алгоритм выделения зон сейсмической генерации или «сейсмических доменов» с использованием нечеткой логики. Предложенный алгоритм предполагает использование результатов компьютерного геодинамического моделирования, что позволяет выявить области с повышенными относительными значениями сжимающих напряжений. Моделирование выполнено в ИТПЗ РАН.

Обнаружено, что для пространственно-аналитических и пространственно-периодических решений уравнений гидродинамики и магнитогиродинамики происходит вырождение нелинейности нового вида.

Была изучена асимптотика ветвления семейств наименее устойчивых магнитных мод блоховского типа.

Для изучения формирования магнитного поля на больших расстояниях от центра галактики исследована возможность генерации магнитного поля во внешних областях галактики за счет действия как динамо, так и магниторотационной неустойчивости. Предполагается, что более значимую роль на таком удалении играют нелинейные эффекты механизма динамо.

Исследована зависимость магнитного поля от коэффициента магнитной диффузии, при условии, что все остальные параметры системы фиксированы. Установлено, что для больших значений коэффициента магнитное поле отсутствует, а при его уменьшении возникает аттрактор с нетривиальным магнитным полем.

Исследована устойчивость валов в плоском горизонтальном слое, подогреваемом снизу и вращающемся относительно наклонной оси, в приближении Буссинеска.

Решены новые задачи теории упругости. Построено точное решение краевой задачи теории упругости для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты (полосы) с поперечной трещиной, расположенной на вертикальной оси симметрии. Полученное решение может быть использовано в теории очага землетрясений точно так же, как ранее использовалось для этих целей классическое решение для плоскости с трещиной.

Построено точное решение краевой задачи теории упругости о растяжении тонкой полубесконечной прямоугольной плиты (полосы), длинные стороны которой свободны, а торец жестко заземлен. Полученное решение может быть полезно при анализе

напряженно-деформированного состояния литосферных плит в окрестности угловых точек, являющихся точками смены типа граничных условий.

Построено точное решение неоднородной задачи для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты (полосы), вдоль длинных сторон которой имеются ребра жесткости. Результаты получены впервые и могут быть использованы при анализе напряженно-деформированного состояния в тех случаях, когда стык литосферных плит идет вдоль длинных сторон. В этом случае можно оценить влияние примыкающих плит.

По результатам исследований в 2024 г. опубликовано 13 статей в рецензируемых журналах, а также сделано 5 докладов на международных и российских научных конференциях. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации баз данных.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gorshkov A.I., Novikova O.V., Y. Dimitrova S.Y., Dimova L.D., and Raykova R.B. (2024) Potential Locations of Strong Earthquakes in Bulgaria and the Neighbouring Regions. *International Journal of Geophysics*, 11: 1-13 DOI: 10.1155/2024/8103337
2. Gorshkov A., Novikova O., Livinskiy A., Semka M. (2024) Locations of possible earthquakes in the Central Asian mobile belt In Abstracts of the International Conference, dedicated to the 70th anniversary of the Geophysical Center of the RAS and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences "Data Science, Geoinformatics and Systems Analysis in Geosciences" 25–27 September 2024, Suzdal, Russian Federation, 12(1), BS1002, p. 118, <https://10.2205/2024-GCRAS70>
3. Горшков А. И., Новикова О.В., Ливинский А.И. Использование методов распознавания образов для изучения особенностей пространственной локализации полиметаллического оруденения в Алтайско-Саянском регионе // *Физика Земли*, 2024, № 5, с. 3–14 DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050049>
4. Подольская Е. С., Горшков А. И., Новикова О. В., Трубенков А. В. База геоданных линеаментов и сейсмогенных узлов Южной Сибири для ГИС. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623735. 23.08.2024.
5. Баранов А. А., Лобковский Л.И. Глубочайшие впадины на суше в Антарктиде как результат кайнозойской активизации рифтогенеза. // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* – 2024. – Т. 514, № 1. – С. 50-55. – DOI 10.31857/S2686739724010065.
6. Лобковский, Л. И. Баранов А. А., Рамазанов М. М. Современное ускорение движения ледников Антарктиды на фоне высокого подледного теплового поток. // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* – 2024. – Т. 515, № 1. – С. 157-163. – DOI 10.31857/S2686739724030203.
7. Лобковский Л. И., Семилетов И. П., Баранов А. А., Владимирова И. С. Трудности обоснования антропогенной концепции глобального потепления и сейсмогенно-триггерный механизм климатических изменений // *Вестник ДВО РАН.* 2024. № 4. С. 48–63.
8. Стеблов Г.М., Агибалов А.О., Макеев В.М., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Сенцов А.А. К проблеме оценки максимально возможных магнитуд землетрясений острова Сахалин различными методами // *Вопросы инженерной сейсмологии.* 2023. Т. 50. № 4. С. 25-35. DOI: 10.21455/VIS2023.4-2

9. Sobisevich, A. L., G. M. Steblov, A. O. Agibalov, I. M. Aleshin, G. R. Balashov, A. D. Kondratov, V. M. Makeev, V. P. Perederin, F. V. Perederin, A. A. Sentsov, and K. I. Kholodkov (2024), Seismic Domain Identification Algorithm Using Fuzzy Logic Methods With Combined Geological and Geomorphological Data for the Case of Sakhalin Island, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES2004, EDN: JZBFTU, <https://doi.org/10.2205/2024es000906>

10. Sobisevich A. L, Steblov G. M., Agibalov A. O., Aleshin I. M., Balashov G. R., Kondratov A. D., Makeev V. M., Perederin V. P., Perederin F. V., Rozenberg N. K., Sentsov A. A., Kholodkov K. I., and Fadeeva K. V. Identification of Potential Earthquake Source Zones in Areas of Recent Tectogenesis Based on Geological and Geomorphological Factors and Tools of Fuzzy Logic: The Greater Caucasus *Journal of Volcanology and Seismology*, 2024, Vol. 18, No. 5, pp. 446–458.

11. Михайлов Е.А., Таранюк А.А., Степанова А.П. Исследование электровихревого течения между плоскостями с помощью различных вычислительных подходов. Труды Института системного программирования РАН. 2024, 36(2), 169-180. DOI:10.15514/ISPRAS-2024-36(2)-12 <https://ispranproceedings.elpub.ru/jour/article/view/1799>.

12. Zheligovsky V. Depletion of nonlinearity in space analytic solutions to equations of magnetohydrodynamics. Конференция Mathematical Aspects of Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, Университет Ньюкасла, Великобритания. 11-12 января 2024 г.

13. Zheligovsky V. Linear MHD stability with respect to Bloch modes. Пятая Российская конференция по магнитогидродинамике RMHD-V, Пермь, 24-27 июня 2024 г.

14. Tolmachev D. Predictive patterns for magnetic field reversals. The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics (RMHD-2024). (Пятая Российская конференция по магнитной гидродинамике) 24–28 июня 2024 г. Пермь, Россия

15. Khasaeva T., Mikhailov E.A., and Teplyakov I.O. Modeling reversals of galactic magnetic fields at large distances from centers of Milky-Way –like galaxies using computations on GPUS. *Serb. Astron. J.* 200 (2024), 1-5.

16. Mikhailov E.A., Khasaeva T.T., Eigenvalue Problem Describing Magnetorotational Instability in Outer Regions of Galaxies. *Mathematics*, 2024, 12(5), 760. DOI:10.3390/math12050760

17. Podvigina Olga. An efficient Galerkin method for problems with physically realistic boundary conditions. "Mathematical Aspects of Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics" 11-12 January 2024, Newcastle University, Newcastle, UK (on-line)

18. Podvigina O. Generation of magnetic field by convective rolls. (О.М.Подвигина Генерация

магнитного поля конвективными течениями.) The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics (RMHD-2024). 24–28 июня 2024 г. Пермь, Россия.

19. Хасаева Т.Т. Численное исследование стабильных инверсий галактического магнитного поля методом Галеркина с использованием полиномов Чебышева. "Всероссийская конференция молодых ученых-механиков" 4-14 сентября 2024 г. Сочи.

20. Хасаева Т.Т. Собственные функции в задаче о возбуждении магнитного поля во внешних областях галактики за счет магниторотационной неустойчивости. Всероссийская конференция "Звёздообразование и планетообразование", 11-13 ноября 2024 г. АКЦ ФИАН, Москва.

21. Khasaeva T. Role of magnetorotational instability in the magnetic field occurrence on the periphery of the galactic disc. "The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics", 24-28 июня 2024 года, г. Пермь.

22. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П., Шуляковская Т.Д. Трещина в бесконечной упругой свободной полосе // Материалы Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики», Москва, 5–8 декабря 2023 г. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 94–99.

23. Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Меньшова И.В., Власов Д.А. Упругая полоса с трещиной. Точное решение // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 518. С. 52–57. DOI: 10.31857/S2686740024050089

24. Kovalenko M.D., Kerzhaev A.P., Menshova I.V., Vlasov D.A. Half-strip with a clamped end. Solution in series in Papkovitch–Fadle functions // Mechanics of Solids. 2024. Vol. 59. No. 7.

25. Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Меньшова И.В. Неоднородная задача для полосы с ребрами жесткости. 14-ая Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 23–25 октября 2024 г. Москва, Россия.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НИР

## «РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ»

## Статьи в журналах

1. Khasaeva T.T., Mikhailov E.A., Eigenvalue Problem Describing Magnetorotational Instability in Outer Regions of Galaxies. *Mathematics*, 2024, 12(5), 760. DOI:10.3390/math12050760 (<https://www.mdpi.com/2227-7390/12/5/760>).
2. Khasaeva T., Mikhailov E.A., and Teplyakov I.O. Modeling reversals of galactic magnetic fields at large distances from centers of Milky-Way –like galaxies using computations on GPUS. *Serb. Astron. J.* 200 (2024), 1 - 5.
3. Михайлов Е.А., Таранюк А.А., Степанова А.П. Исследование электровихревого течения между плоскостями с помощью различных вычислительных подходов. *Труды Института системного программирования РАН*. 2024, 36(2), 169-180. DOI:10.15514/ISPRAS-2024-36(2)-12 (<https://ispranproceedings.elpub.ru/jour/article/view/1799>).
4. Горшков А. И., Новикова О.В., Ливинский А.И. Использование методов распознавания образов для изучения особенностей пространственной локализации полиметаллического оруденения в Алтайско-Саянском регионе // *Физика Земли*, 2024, № 5, с. 3–14 DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050049>
5. Gorshkov A.I., Novikova O. (2024) Analysis of the prediction of earthquake locations in Anatolia and adjacent regions of 1974 in connection with the 2023 Türkiye -Syria Great Earthquakes. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering* Vol. 26, No. 1, DOI:10.48303/jsee.2023.2010510.1071
6. Gorshkov A.I., Novikova O.V., Y. Dimitrova S.Y., Dimova L.D., and Raykova R.B. (2024) Potential Locations of Strong Earthquakes in Bulgaria and the Neighbouring Regions. *International Journal of Geophysics*, 11: 1-13 DOI: 10.1155/2024/8103337
7. Баранов А. А., Лобковский Л.И.. Глубочайшие впадины на суше в Антарктиде как результат кайнозойской активизации рифтогенеза. // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* – 2024. – Т. 514, № 1. – С. 50-55. – DOI 10.31857/S2686739724010065.
8. Лобковский, Л. И. Баранов А. А., Рамазанов М. М. Современное ускорение движения ледников Антарктиды на фоне высокого подледного теплового

поток. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2024. – Т. 515, № 1. – С. 157-163. – DOI 10.31857/S2686739724030203.

9. Лобковский Л. И., Семилетов И. П., Баранов А. А., Владимирова И. С. Трудности обоснования антропогенной концепции глобального потепления и сейсмогенно-триггерный механизм климатических изменений // Вестник ДВО РАН. 2024. № 4. С. 48–63.

10. Sobisevich A. L, Steblor G. M., Agibalov A. O., Aleshin I. M., Balashov G. R., Kondratov A. D., Makeev V. M., Perederin V. P., Perederin F. V., Rozenberg N. K., Sentsov A. A., Kholodkov K. I., and Fadeeva K. V. Identification of Potential Earthquake Source Zones in Areas of Recent Tectogenesis Based on Geological and Geomorphological Factors and Tools of Fuzzy Logic: The Greater Caucasus Journal of Volcanology and Seismology, 2024, Vol. 18, No. 5, pp. 446–458

11. Sobisevich, A. L., G. M. Steblor, A. O. Agibalov, I. M. Aleshin, G. R. Balashov, A. D. Kondratov, V. M. Makeev, V. P. Perederin, F. V. Perederin, A. A. Sentsov, and K. I. Kholodkov (2024), Seismic Domain Identification Algorithm Using Fuzzy Logic Methods With Combined Geological and Geomorphological Data for the Case of Sakhalin Island, Russian Journal of Earth Sciences, 24, ES2004, EDN: JZBFTU, <https://doi.org/10.2205/2024es000906>

12. Kovalenko M.D., Kerzhaev A.P., Menshova I.V., Vlasov D.A. Half-strip with a clamped end. Solution in series in Papkovitch–Fadle functions // Mechanics of Solids. 2024. Vol. 59. No. 7.

13. Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Меньшова И.В., Власов Д.А. Упругая полоса с трещиной. Точное решение // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 518. С. 52–57. DOI: 10.31857/S2686740024050089

#### Статьи в сборниках

Robert T., Wenjin Ch., Baranov A., Mohammad B. GEOLOGICAL INTERPRETATION OF GRAVITY ANOMALIES FOR THE SOUTH POLAR REGION. В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 50-я юбилейная сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. Москва, 2024. С. 376-381.

#### Доклады на конференциях

1. Хасаева Т.Т. Собственные функции в задаче о возбуждении магнитного поля во внешних областях галактики за счет магниторотационной неустойчивости. Всероссийская

конференция «Звёздообразование и планетообразование», 11-13 ноября 2024 года АКЦ ФИАН, Москва.

2. Khasaeva T. Role of magnetorotational instability in the magnetic field occurrence on the periphery of the galactic disc. "The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics", 24-28 июня 2024 года, г. Пермь.

3. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П., Шуляковская Т.Д. Трещина в бесконечной упругой свободной полосе // Материалы Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики», Москва, 5–8 декабря 2023 г. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 94–99.

4. Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Меньшова И.В. Неоднородная задача для полосы с ребрами жесткости. 14-ая Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 23–25 октября 2024 г. Москва, Россия.

5. Gorshkov A., Novikova O., Livinskiy A., Semka M. (2024) Locations of possible earthquakes in the Central Asian mobile belt In Abstracts of the International Conference, dedicated to the 70th anniversary of the Geophysical Center of the RAS and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences "Data Science, Geoinformatics and Systems Analysis in Geosciences" 25–27 September 2024, Suzdal, Russian Federation, 12(1), BS1002, p. 118, <https://10.2205/2024-GCRAS70>.

## **РИД**

Подольская Е. С., Горшков А. И., Новикова О. В., Трубенков А. В. База геоданных линеаментов и сейсмогенных узлов Южной Сибири для ГИС. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. № 2024623735. 23.08.2024.