

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 550.311551.1
Рег. N НИОКТР 121122300163-8
Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТПЗ РАН
чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин
« ____ » _____ 2023 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОДИНАМИКИ, РАЗРАБОТКА И
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ
ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
(заключительный)

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

_____ А.И.Горшков
Подпись, дата

Москва 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, гл. науч. сотр., зав. лаб. д.ф.-м.н.,	_____ Подпись, дата	А.И. Горшков (введение, разделы 1, 2.1, 2.3-2.5 заключение)
Исполнители темы		
гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	В.А. Желиговский (раздел 4)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	Р.Г. Новиков (раздел 7)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	В.Г. Кособоков (раздел 2.11)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	О.М. Подвигина (раздел 5)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	Г.М. Стеблов (раздел 3)
гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.В. Хохлов (раздел 8)
вед. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	И.А. Воробьева (раздел 2.4-2.5)
вед. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	М.Г. Шнирман (раздел 7)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	Е.М. Блантер (раздел 7)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.А. Баранов (раздел 2.7-2.10)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.П. Кержаев (раздел 6)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	И.В. Меньшова (раздел 6)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	О.В. Новикова (раздел 1.-1.3)

ст. науч. сотр. канд. тех. наук	_____ Подпись, дата	Е.С. Подольская (раздел 1.3)
ст. науч сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	Р.А. Чертовских (раздел 4)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	М.С. Гридчина (раздел 3)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	А.И. Ливинский (раздел .1.3)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	Г.Э. Мельник (раздел 3)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	М.А. Семка (раздел 1.2)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	Д.С. Толмачев (раздел 4)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	Т.Т. Хасаева (раздел 4)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	А.В. Чуваев (раздел 2.9)
нормоконтролер	_____ Подпись, дата	О.В. Селюцкая

РЕФЕРАТ

Отчет 112 с., 1 кн., 49 рис., 88 источн., 1 прил.

МОРФОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР, КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ДИНАМО, МАГНИТОГИДРОДИНАМИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ, МЕТОДЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ, ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ, ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ

Исследования, проводимые по теме в период 2019 – 2023 гг., включали изучение моделей магнитного динамо и гетероклиных циклов, возникающих в конвекции; построение и анализ моделей мантийной конвекции; моделирование мантийной конвекции; изучение строения континентальной коры; моделирование динамики блоковых структур Бирманской дуги, Кавказа, Алтайско-Саянского региона и применение результатов моделирования для оценки сейсмической опасности; определение иерархического блокового строения методом морфоструктурного районирования территорий северо-востока Египта, литосферного блока Корсика-Сардиния, Болгарского региона для определения мест возможного возникновения землетрясений; изучение корреляции морфоструктурных узлов с оруденением на Кавказе; создание ГИС базы геоданных сейсмогенных узлов; расчеты изгибных напряжений и деформаций в океанических плитах; построение мгновенной трехмерной модели мантии Земли на основе данных сейсмической томографии; расчет напряжений в мантии и суперконтиненте в процессе суперконтинентального цикла; изучение реакции литосферы Земли на долговременную периодическую гравитационную нагрузку; исследования кинематического динамо и идеальной магнитогидродинамики; изучение влияния луны на эволюцию оси вращения планеты; разработку метода статистической инверсии для палеомагнитных данных; разработку методов теории упругости, применимых к изучению напряженного состояния земной коры; решения прямых и обратных задач, в частности, в области гелиосейсмологии.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	9
1. Морфоструктурное районирование.....	9
1.1. Морфоструктурное районирование сейсмоактивных регионов и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений.....	9
1.2. Исследование связи оруденения с морфоструктурными узлами.....	16
1.3. Создание баз геоданных сейсмогенных узлов для ГИС.....	19
2. Геодинамика, моделирование геодинамических процессов.....	21
2.1. Обобщение современных представлений о геодинамике Кавказа.....	21
2.2. Тектонические режимы и напряжения в сейсмической зоне Вранча.....	22
2.3. Моделирование динамики блоков и сейсмичности региона Алтай-Саяны- Байкал.....	22
2.4. Моделирование динамики блоков и сейсмичности Индо-Бирманской дуги.....	24
2.5. Модель динамики коровых блоков и сейсмичность Закавказья.....	25
2.6. Глобальная геодинамическая модель современной Земли.....	26
2.7. Изучение глобальной циркуляции и роли мантийных плюмов в процессах переноса тепла и массы в мантии Земли.....	27
2.8. Построение уточненной теории изгиба литосферных плит.....	28
2.9. Напряжения в мантии и суперконтиненте в процессе суперконтинентального цикла для двумерной декартовой модели мантии.....	29
2.10. Сейсмогенно-триггерный механизм активизации эмиссии метана на Арктическом шельфе.....	31
2.11. Реакция литосферы Земли на долговременную периодическую гравитационную нагрузку.....	34
3. Исследование современных геодинамических процессов с использованием спутниковых технологий.....	37
4. Проблемы магнитогидродинамики.....	40
4.1. Кинематическая генерация магнитных мод Блоховского типа пространственно-периодическим течением электропроводной жидкости.....	40

4.2. Аналитичность решений системы трехмерных уравнений идеальной магнитогидродинамики по пространственным переменным и лагранжеву алгоритму численного интегрирования этой системы по времени.....	46
4.3. Кинематическое динамо.....	51
4.4. Идеальная магнитогидродинамика.....	51
4.5. Блоховские возмущения трехмерных пространственно-периодических стационарных МГД состояний.....	52
4.6. Генерация магнитного поля тепловой конвекцией в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси..	54
4.7. Разработка алгоритма решения задачи о тепловой конвекции в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси, в присутствии магнитного поля.....	57
5. Математическое моделирование природных систем.....	61
5.1. Классификация и достаточные условия асимптотической устойчивости для некоторого класса гетероклинических сетей в R^n	61
5.2. Исследование эволюции угла наклона оси вращения экзо-Земли в поле притяжения звезды (экзо-Солнца), ближайшего ее спутника (экзо-Луны) и экзо-планет, входящих в планетную систему.....	62
5.3. Поведение траекторий вблизи гетероклинической сети, состоящей из двух циклов.....	63
5.4. О влиянии луны на эволюцию наклона оси вращения планеты в нерезонансном случае.....	64
5.5. Существование двумерных гетероклинических связи в обобщенной системе Лотки-Вольтерры.....	67
6. Задачи теории упругости.....	69
7. Прямые и обратные задачи.....	77
8. Палеомагнитные исследования.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	86
Приложение.....	95
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2019-2023 гг.....	95

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках приоритетных направлений, определенных Планом фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021 - 2030 годы (Приложение 1 к Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № 3684-р): 1.5.2.5. «Математическое моделирование геодинамических процессов», 1.5.1.3. «Происхождение и эволюция геомагнитного поля».

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 моделирования сейсмичности.

(2) Развитие трехмерной модели напряжений на поверхности и в мантии в сферической Земле и построение уточненной теории изгиба литосферных плит.

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

(4) Численное моделирование процессов генерации магнитного поля нелинейным конвективным динамо в плоском вращающемся слое электропроводной жидкости.

(5) Изучение условий существования и устойчивости гетероклинических циклов в системах типа Лотки-Вольтерры, численное и аналитическое исследование поведения траекторий в окрестности гетероклинической сети.

(6) Развитие математических методов повышенной точности для анализа палеомагнитных направлений применительно к реальным данным по изверженным породам.

(7) 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 2019 -2023 гг. 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. Численное моделирование мантийной конвекции является вкладом в изучение глубинных геодинамических процессов. 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. Новые методы повышенной точности анализа палеонаправлений дают возможность получения более адекватных представлений о реальной эволюции магнитного поля Земли. Исследование и решение краевых задач теории упругости в конечном итоге внесет вклад в создание физической модели очага землетрясения.

По теме «Некоторые задачи геодинамики, разработка и использование математических методов изучения природных систем» подготовлены следующие промежуточные отчеты:

Отчет по теме НИР, этап 2019, рег.№ ИКРБС АААА-Б20-220070790067-4.

Отчет по теме НИР, этап 2020, рег.№ ИКРБС 221040700073-2.

Отчет по теме НИР, этап 2021, рег.№ ИКРБС 222020900140-0.

Отчет по теме НИР, этап 2022, рег.№ ИКРБС 223020700259-0.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Морфоструктурное районирование

1.1 Морфоструктурное районирование (МСР) сейсмоактивных регионов и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений

Болгарский регион. Для решения задачи распознавания сейсмогенных узлов для $M \geq 6$ составлена схема МСР Болгарского региона, отображающая положение узлов в линеаментно-блоковой структуре изучаемой территории. Схема МСР Болгарского региона представлена на рис. 1.

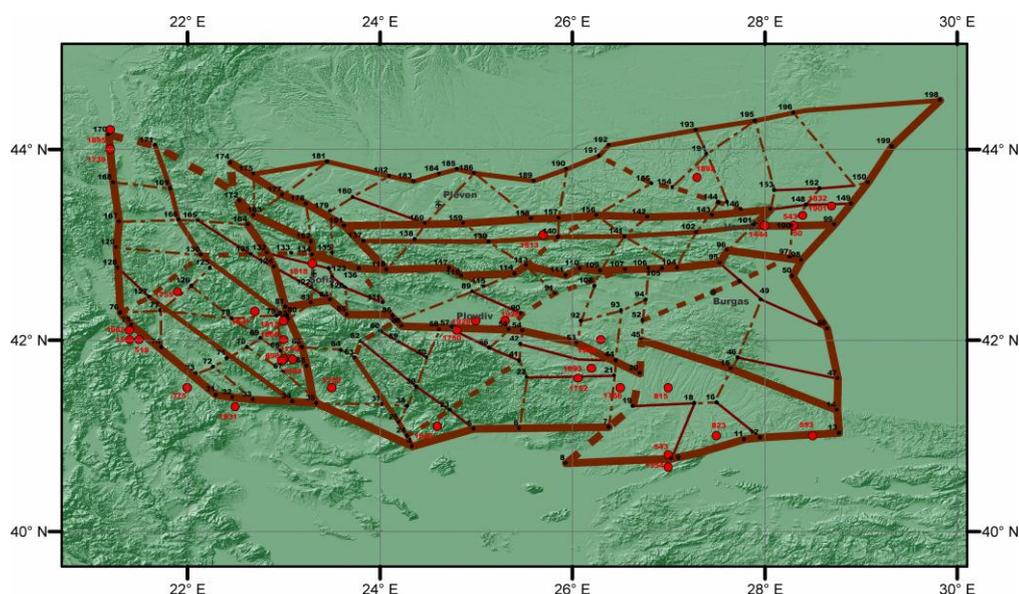


Рисунок 1. Схема морфоструктурного районирования Болгарского региона.

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 кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$. Арабскими цифрами обозначены номера морфоструктурных узлов.

Схема МСР отражает иерархическое линеаментно-блоковое строение Болгарского региона. Эпицентры землетрясений с $M \geq 6$ расположены вблизи некоторых пересечений морфоструктурных линеаментов. Всего определено 178 узлов, которые составили множество объектов для задачи распознавания. Результаты проведенного исследования были представлены на конференциях [42, 58].

Литосферный блок Корсика–Сардиния традиционно считается регионом с заведомо низкой сейсмичностью. В каталогах землетрясений сообщается только о трех умеренных землетрясениях с магнитудой 5.0–5.1. Недостаток документированной сейсмичности в регионе не позволяет надежно оценить сейсмическую опасность. Была сделана попытка оценить сейсмический потенциал региона Корсика–Сардиния, используя морфоструктурное районирование (МСР), которое позволяет идентифицировать места потенциальных землетрясений. МСР позволяет выделить иерархическую систему морфоструктурных блоков, сеть линеаментов, ограничивающих блоки, и местоположение узлов. Для выявления сейсмогенных узлов в регионе Корсика–Сардиния были использованы существующие критерии сейсмичности, определенные ранее для сейсмогенных (M5+) узлов в Иберии и Западных Альпах. Использование этих критериев обусловлено тем, что современные модели средиземноморской геодинамики показывают, что блок Корсика–Сардиния до его дрейфа к современному положению в Средиземноморье был частью восточной окраины Иберии и Прованса, прилегающего к Западным Альпам. Благодаря общей тектонической эволюции основные черты тектонического строения блока Корсика–Сардиния примерно аналогичны тектонической структуре Иберии и юга Франции. По критериям Иберии были определены 24 узла, в которых возможны землетрясения M5+ (рис.2). Узлы, в которых известны землетрясения M5+, отнесены к сейсмогенным. По критериям сейсмичности Западных Альп только два узла, в которых были землетрясения M5+, были идентифицированы правильно. Проведенный анализ показывает, что критерии сейсмичности, определенные для Иберии, более подходят для идентификации сейсмогенных узлов в блоке Корсика–Сардиния, поскольку они распознают как сейсмогенные те узлы, в которых ранее были зафиксированы землетрясения. Проведенное исследование предполагает, что сейсмический потенциал блока Корсика–Сардиния может быть определен как умеренный.

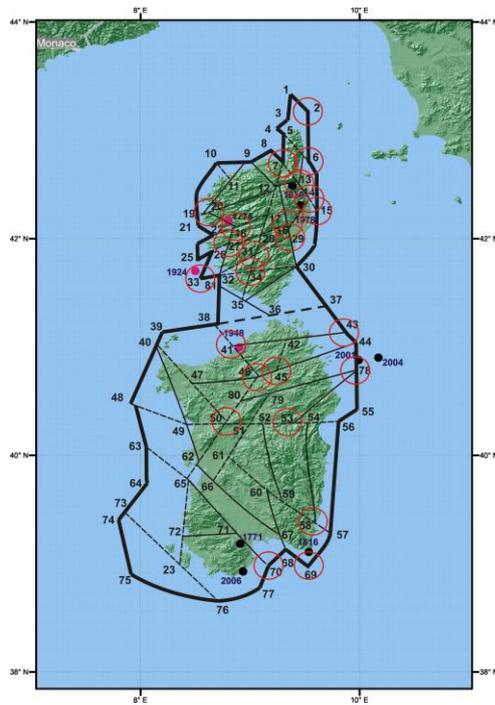


Рисунок 2. Схема морфоструктурного районирования блока Корсика-Сардиния и сейсмоопасные узлы для M5+.

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 кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 5,0$, черными - эпицентры с $M=4.0-4.9$. Красные круги показывают распознанные сейсмоопасные узлы, в которых возможны землетрясения M5+. Арабскими цифрами обозначены номера морфоструктурных узлов. Результаты проведенного исследования представлены в статье [60].

Эллиниды. Современная структура и конфигурация горного пояса Эллинид создана сложным взаимодействием Африканской плиты с Евразийской и расположенными между ними Адриатической, Эгейской и Анатолийской микроплитами. Горное сооружение Эллинид простирается в крутом северо-западном направлении вдоль берегов Ионического моря. Эллиниды разделяют на северные, представленные горами Пиндос, и южные, занимающие полуостров Пелопоннес (рис. 3). Они разделены Коринфским заливом, заполняющем зону молодого четвертичного рифта. В восточном направлении горные хребты северных Эллинид (Внешние Эллиниды) резко снижаются, замещаясь разрозненными невысокими хребтами, которые чередуются с внутригорными и

прибрежными впадинами. Структурно эти области пониженного рельефа относятся к Внутренним Эллинидам, простирающимся в восточном направлении до Эгейского моря.

Линеаменты первого ранга отделяют горную страну Эллинид от прилегающих крупномасштабных геоструктур первого ранга. На западе, востоке и юге линеаменты первого ранга отделяют горное сооружение Эллинид от глубоководных впадин Ионического, Эгейского и Критского морей, соответственно (рис. 3). Зоны этих линеаментов трассируются вдоль континентального склона и включают крупные тектонические разломы. Линеаменты второго ранга ограничивают территориальные единицы второго ранга – мегаблоки. Разделение горной страны на мегаблоки обусловлено отмеченными выше особенностями рельефа Эллинид. Выделено пять мегаблоков I - V (рис.3), которые различаются уровнем высот и простираением составляющих их крупных элементов рельефа. Мегаблоки I (горы Пиндос) и IV (хребты Пелопоннеса) выделены в пределах Внешней зоны Эллинид.

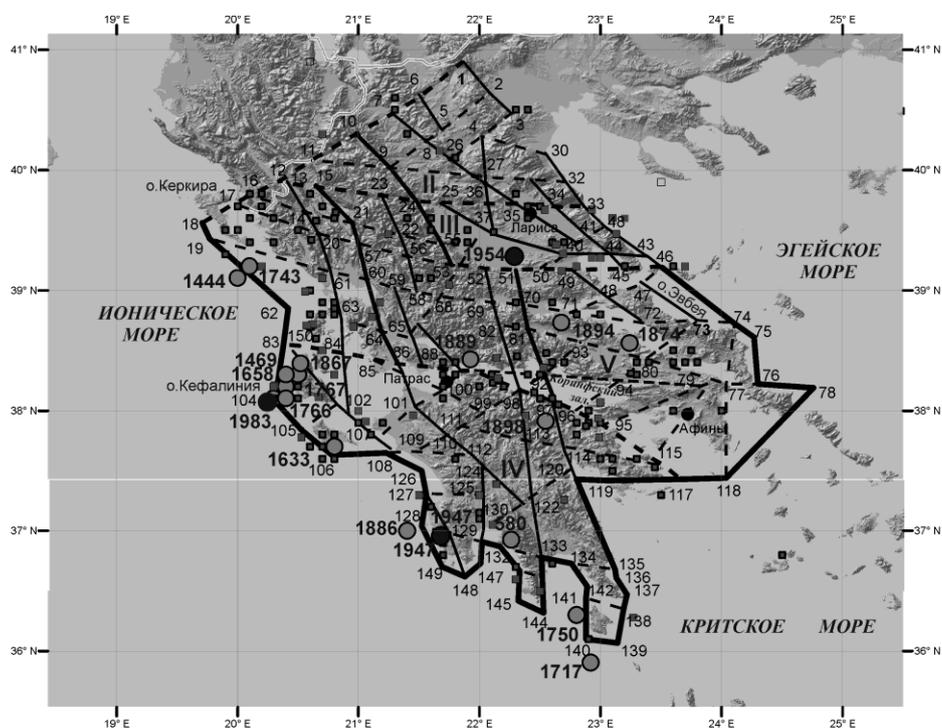


Рисунок 3. Схема морфоструктурного районирования Эллинид.

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. Темными кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 7,0$ после 1900 г., светлыми - эпицентры землетрясений с $M \geq 7,0$ до 1900 г. Темные и светлые квадратики обозначают

эпицентры землетрясений с $6,0 \leq M < 6,99$ после и до 1900г., соответственно. I – V номера мегаблоков. 1 – 149 номера пересечений линеаментов.

В мегаблоке I преобладают линейно вытянутые хребты север-северо-западного простирания, а в мегаблоке простирание хребтов Пелопонесса становится близмеридиональным). Мегаблоки II, III и V, характеризующиеся пониженным рельефом, выделены в зоне Внутренних Эллинид. Мегаблок III включает обширную межгорную впадину Лариса. Мегаблок V (Пелопоннес) отделен от остальных мегаблоков поперечным линеаментом 2-го ранга, который трассируется по наиболее тектонически активному южному борту Коринфского залива. Продольные линеаменты 2-го ранга 10-53 и 51-96 (рис. 3) отделяют мегаблоки Внешних Эллинид (I и IV) от мегаблоков Внутренних Эллинид (II, III и IV).

Линеаменты третьего ранга являются границами блоков. Они маркируют места резких изменений высоты и простирания крупных элементов рельефа. Определена достаточно плотная сеть поперечных линеаментов 3-го ранга северо-восточного и близширотного простирания, которые секут доминирующее север-северо-западное простирание горных хребтов Эллинид. В результате МСР выделено 139 пересечений линеаментов, которые были затем рассмотрены в качестве объектов распознавания, поскольку коровые землетрясения $M \geq 7,0$ приурочены к местам пересечения линеаментов (рис. 3). Результаты представлены в работе [22].

Определение локальных цунамигенных источников в Греции по морфоструктурным данным. На примере Греции предложен новый подход к определению потенциальных цунамигенных источников. Установлено, что землетрясения, вызывавшие локальные цунами в Греции, связаны с морфоструктурными узлами, местоположение которых для всей территории Греции было определено в МСР. Впервые с помощью методов распознавания образов решена задача идентификации цунамигенных узлов. Узлы региона, установленные в результате МСР, алгоритмом распознавания Кора-3 разделены на цунамигенные и не цунамигенные на основе их геоморфологических параметров. Большинство выявленных цунамигенных узлов расположено на южной оконечности полуострова Пелопоннес, а также в областях Коринфского и Патрасского заливов (Рис. 4). Отдельные потенциально цунамигенные узлы выявлены на Эгейском побережье Греции в районе Малийского залива. Результаты исследования предоставляют информацию о местоположении локальных потенциально

цунамигенных источников, которая необходима для практических работ по долгосрочной оценке цунамиопасности и проведения цунамирайонирования.

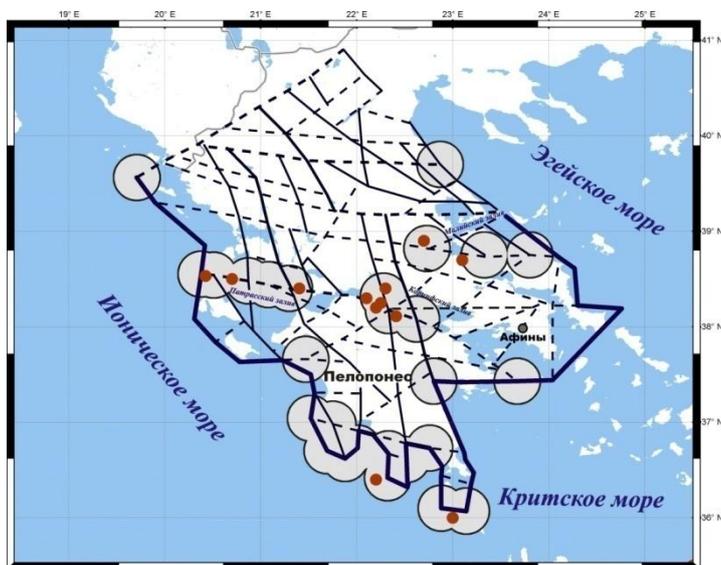


Рисунок 4. Распознанные цунамигенные узлы в Греции.

Серыми кругами отмечены цунамигенные узлы, выявленные алгоритмом распознавания Кора-3. Красные кружки – известные цунамигенные землетрясения. Линиями показаны морфоструктурные линеаменты.

Результаты проведенного исследования представлены в статье [52, Прил.А].

Морфоструктурное районирование внутриплитовых регионов. Представлены результаты исследований, направленных на выявление потенциальных очагов землетрясений в трех регионах, расположенных во внутриплитовых регионах. Были изучены *Французский Центральный массив*, расположенный в пределах Западно-Европейской платформы, район *Гуджарат*, расположенный на северо-западной окраине Индийского щита, и *северо-восточный Египет*, расположенный в северо-восточном углу Африканского континента. Эти районы отличаются различным уровнем сейсмической активности. Французский Центральный массив характеризуется самым низким уровнем сейсмичности, северо-восток Египта — сейсмичностью от низкой до умеренной, а Гуджарат — умеренной с редкими сильными событиями. Во всех регионах установлена связь сильных землетрясений с морфоструктурными узлами, образующихся на пересечениях линеаментов, выделяемых морфоструктурным районированием. Узлы охарактеризованы широким набором геофизических и геологических данных, на основе

которых алгоритм распознавания образов выделяет узлы, в которых могут происходить землетрясения определенной магнитуды. Оценка сейсмической опасности континентальных регионов затруднена из-за неполноты документированной сейсмичности. В такой ситуации информация о потенциальных очагах землетрясений, определяемых с помощью алгоритмов распознавания образов по данным морфоструктурного районирования, создает основу для более адекватной оценки сейсмической опасности. Результаты морфоструктурного районирования и распознавания мест возможных землетрясений в трех внутриплитовых регионах показаны на Рис. 5-7.

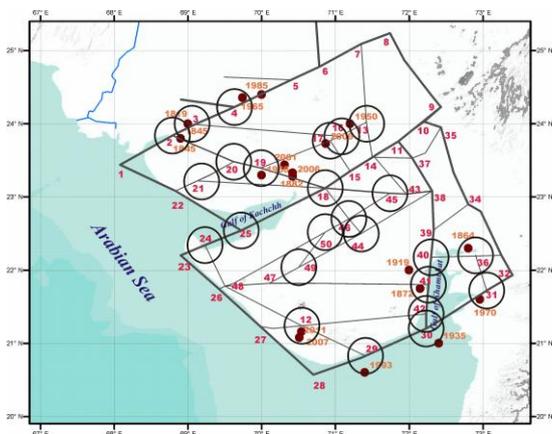


Рисунок 5. Схема морфоструктурного районирования региона Гуджарат, Индия.

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 кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 5,0$. Арабскими цифрами обозначены номера морфоструктурных узлов.

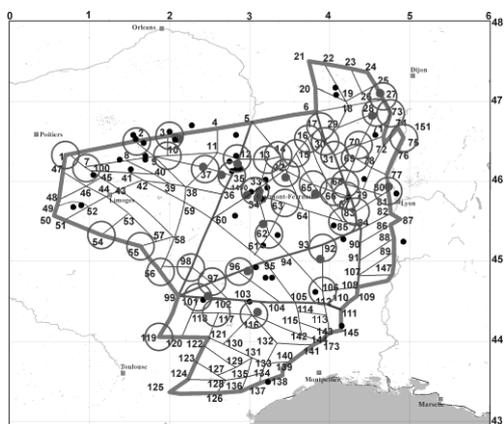


Рисунок 6. Схема морфоструктурного районирования Центрального Французского массива, Франция.

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 кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 5,0$. Арабскими цифрами обозначены номера морфоструктурных узлов.

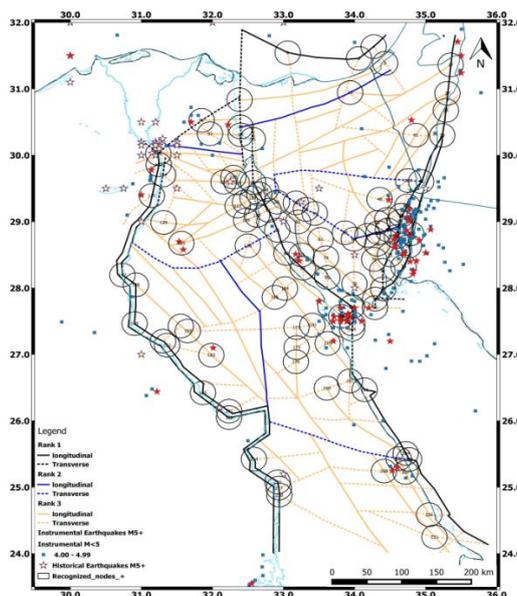


Рисунок 7. Схема морфоструктурного районирования северо-востока Египта.

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 звездочками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 5,0$, синими - эпицентры с $M=4.0-4.9$. Круги показывают распознанные сейсмоопасные узлы, в которых возможны землетрясения $M5+$.

Результаты проведенного исследования представлены в статье [51, Прил.А].

1.2. Исследование связи оруденения с морфоструктурными узлами

Кавказ. Исследование проведено в пределах горно-складчатого сооружения кавказа, для которого характерно полиметаллическое оруденение. Целью работы являлся поиск характерных геолого-геофизических и геоморфологических признаков мест локализации разномасштабных месторождений металлов эндогенного происхождения.

Задача была решена на основе схемы линеаментно-блоковой структуры региона (рис. 8), составленной методом морфоструктурного районирования. Информация о месторождениях, рассматриваемых в работе, взята из базы данных ГГМ РАН [53], а также из базы данных РОСНЕДРА [<https://map.mineral.ru>].

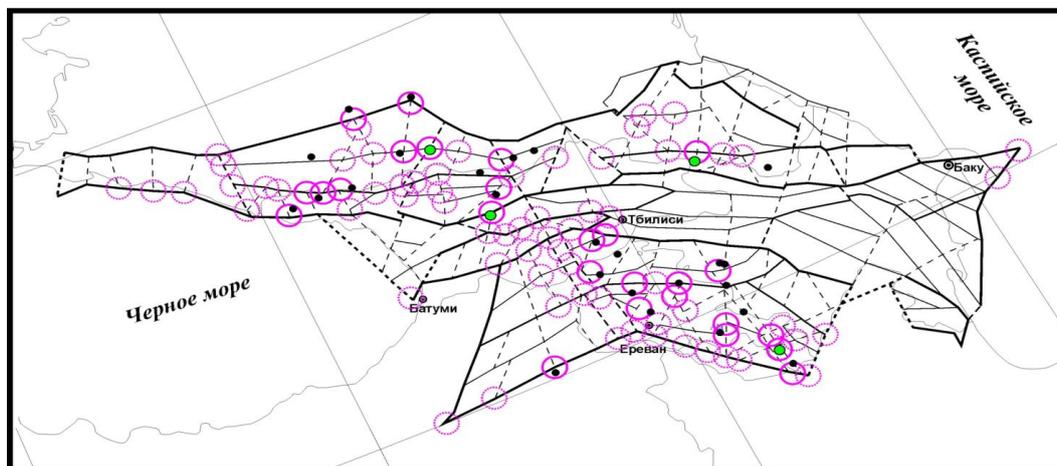


Рисунок 8. Линеаментно-блоковое строение Кавказа и распознанные рудоносные узлы.

Линиями показаны морфоструктурные линеаменты разного ранга. Зеленые и черные кружки - крупные и средние месторождения металлов, соответственно. Фиолетовыми кругами показаны распознанные потенциально рудоносные узлы.

Исследование выполнялось в два этапа. На первом этапе был проведен анализ пространственного положения разномасштабных месторождений металлов относительно мест пересечения линеаментов (узлов). Установлено, что большинство месторождений находятся в радиусе 20 км от узлов пересечений линеаментов (рис. 8). На втором этапе методами с помощью алгоритма распознавания образов Кора-3 определены характерные признаки узлов, в которых локализованы рудные металлические месторождения.

Для определения характерных признаков рудоносных узлов были использованы следующие геолого-геофизические и геоморфологические параметры узлов пересечения линеаментов:

- параметры контрастности и интенсивности новейших тектонических движений на основе данных о высотах рельефа, сочетания типов рельефа и о площади четвертичных отложений в пределах узлов;

- параметры геометрии линеаментно-блоковой структуры, которые характеризуют раздробленность узлов на основе числа и рангов линеаментов, формирующих узел, и расстояний до соседних узлов и границ блоков;

- гравитационные и магнитные параметры, которые косвенно указывают на глубинные неоднородности в окрестностях узлов.

В результате узлы пересечений линеаментов были разделены Кавказа на два класса: класс **Р** (рудоносные узлы) и класс **НР** (нерудоносные узлы).

Исследование связи месторождений металлов с морфоструктурными узлами Кавказа позволяет сделать следующие выводы:

- морфоструктурные узлы играют решающую роль в контроле пространственной локализации месторождений металлов на Кавказе;

- методы распознавания образов позволяют выделить потенциально рудоносные узлы в пределах всего региона;

- характерные признаки, определенные алгоритмом, представлены численными интервалами значений геолого-геофизических параметров, что позволяет их использовать для идентификации рудоносных узлов в другом регионе.

Результаты проведенного исследования доложены на конференциях [43. 46].

Алтай-Саяны. Рассмотрено горно-складчатое сооружение Алтая и Саян с целью выявления особенностей положения крупных и суперкрупных месторождений металлов 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. 9). 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. Результаты доложены на 2-х международных конференциях [47,51, 52].

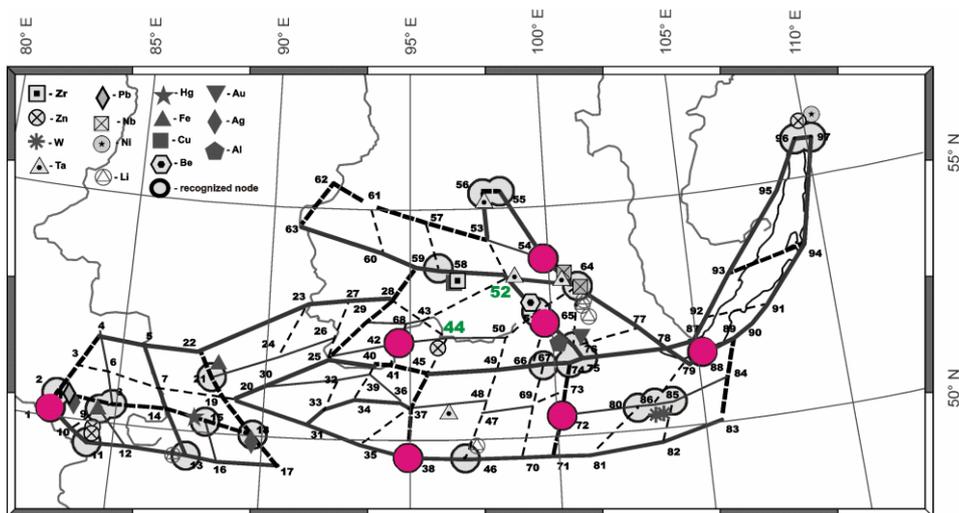


Рисунок 9. Схема морфоструктурного районирования Алтае-Саянского региона и результат распознавания рудоносных узлов.

Линиями показаны линеаменты разных рангов. Римскими цифрами показаны номера узлов, образованными пересечениями линеаментов. Серые круги обозначают узлы, распознанные как рудоносные; розовыми кругами показаны распознанные потенциально рудоносные узлы, в которых пока крупные месторождения полиметаллов не известны.

1.3. Создание баз геоданных сейсмогенных узлов для ГИС

В рамках темы с 2022 г. ведется работа по цифровизации, визуализации и распространению среди пользователей результатов морфоструктурного районирования и определения мест возможного возникновения сильных землетрясений, полученных за длительный период в ИТПЗ РАН. С этой целью были созданы ГИС-проекты ИТПЗ баз геоданных сейсмогенных узлов Черноморско-Каспийского и Итальянского регионов, а также регионов юго-западной и юго-восточной Европы

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/>. База геоданных состоит из нескольких частей, представляющих результаты проектов по Черноморско-Каспийскому региону (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/lineaments-chernomorskokaspiiskiyregion/>), Итальянскому региону (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/lineaments-italyregion/>), юго-западной Европы (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/lineaments-iberiaregion/>) и юго-

восточной Европы (<https://www.itpz-ran.ru/ru/resultaty/maps-and-databases/lineaments-bulgaryregion>) (рис.11-12).

Тематической основой баз геоданных являются опубликованные для этих регионов результаты морфоструктурного районирования и распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.

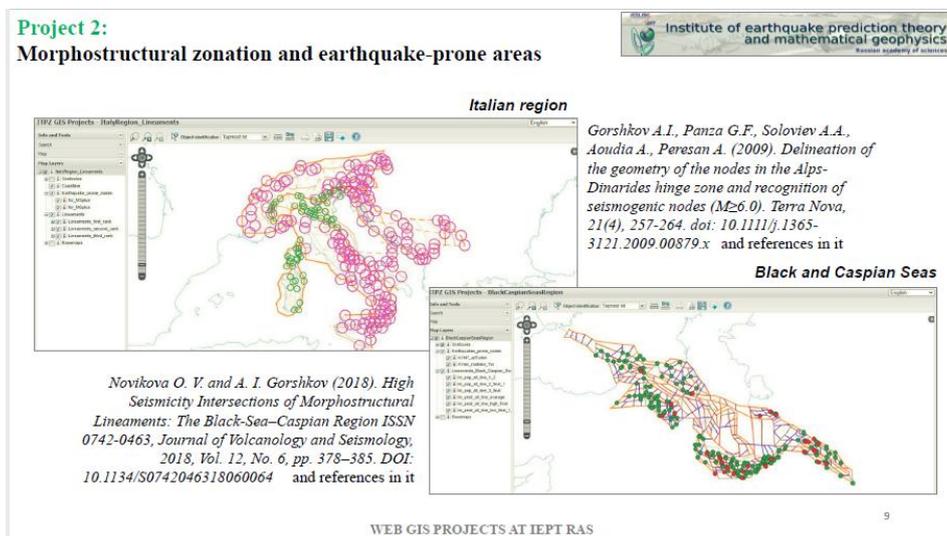


Рисунок 10. Содержание базы геоданных Черноморско-Каспийского региона (QGIS Desktop 3.16.10)

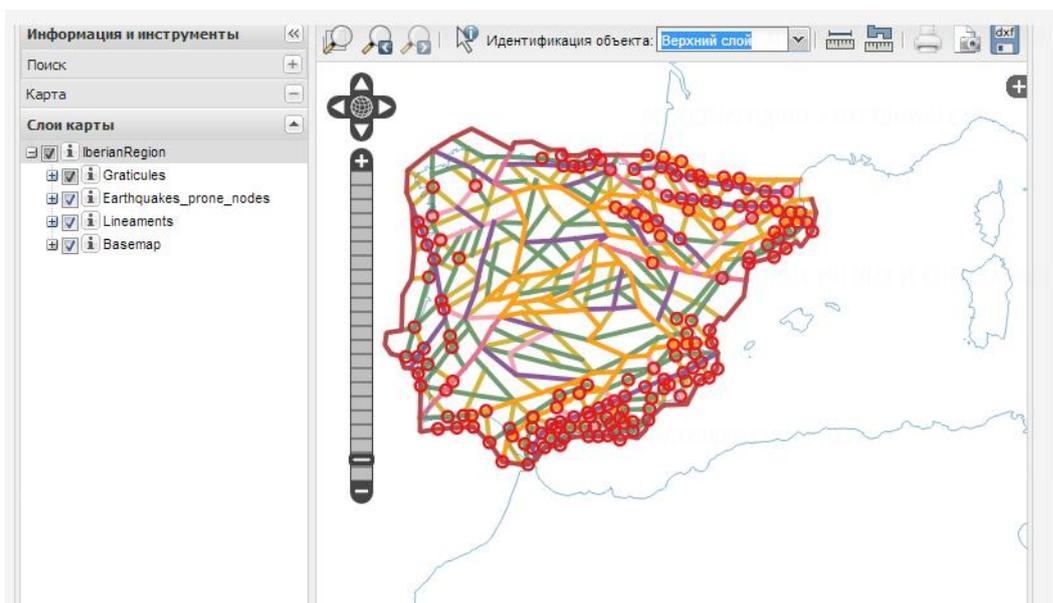


Рисунок 11. Содержание базы геоданных региона юго-западная Европа (QGIS Desktop 3.16.10)

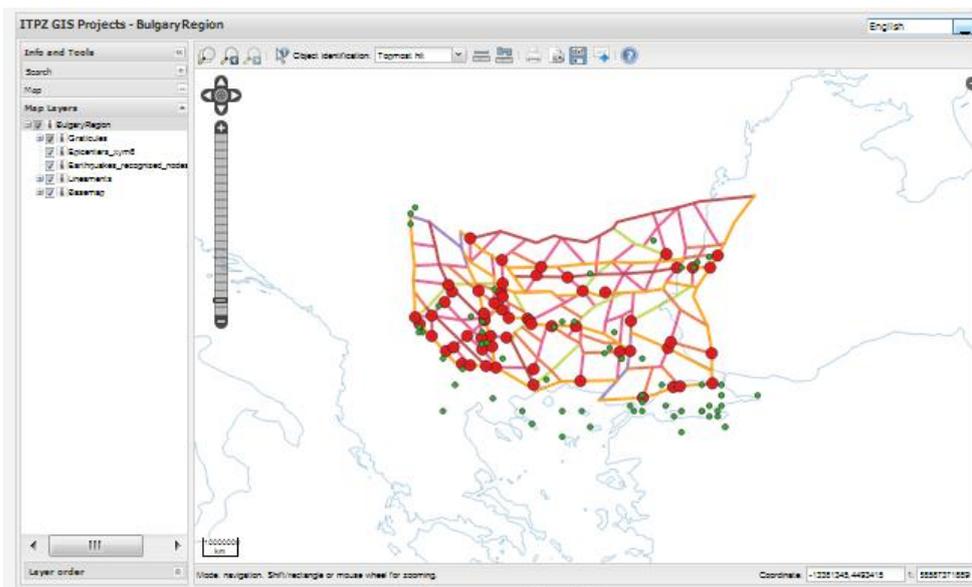


Рисунок 12. Содержание базы геоданных региона юго-восточная Европа (QGIS Desktop 3.16.10)

Результаты представлены в работе [37, Прил.А]. Получено три свидетельства о регистрации баз данных [45-46, Прил.А].

2. Геодинамика и моделирование геодинамических процессов

2.1. Обобщение современных представлений о геодинамике Кавказа

Будучи частью продолжающегося континентального столкновения между Аравийской и Евразийской плитами, Кавказский регион характеризуется умеренной и сильной сейсмичностью. В работе [30], выполненной большим международным коллективом авторов с участием сотрудников ИТПЗ РАН, были обобщены современные представления о геологии, геологической истории и геодинамике Кавказа и его окрестностей. Рассмотрены проблемы палеозойско-палеогеновой и постколлизийной эволюции, а также современные деформации Кавказа. Представлены и проанализированы данные о магматизме и тепловом потоке, активной тектонике и тектонических напряжениях, вызванных континентальной коллизией. Обсуждаются гравитационные модели, разработанные для Кавказа, связывающие их специфические особенности с региональной системой разломов, и последние геодезических исследования, связанных с региональными движениями. Анализируется региональная сейсмичность с акцентом на подкоровую сейсмичность под северными предгорьями Большого Кавказа. Недавние сейсмические томографические исследования свидетельствуют в пользу отрыва литосферного корня под Малым и Большим Кавказом. Знание геодинамики, сейсмичности и напряженного режима в Кавказском регионе помогает в оценке сейсмической опасности

и риска. Был проведен обзор моделирования землетрясений и исследований сейсмической опасности, обеспечивающих связь между глубинными геодинамическими и поверхностными процессами. В работе исследуются существующие пробелы в современных научных знаниях Кавказского региона и предлагаются пути решения задач, которые позволят улучшить понимание тектонической эволюции, активной тектоники, геодинамики, коровой и глубокой сейсмичности и поверхностных проявлений динамики литосферы. Выполненное исследование стало итогом долговременного и плодотворного международного сотрудничества, проводимого ИТПЗ РАН.

2.2. Тектонические режимы и напряжения в сейсмической зоне Вранча

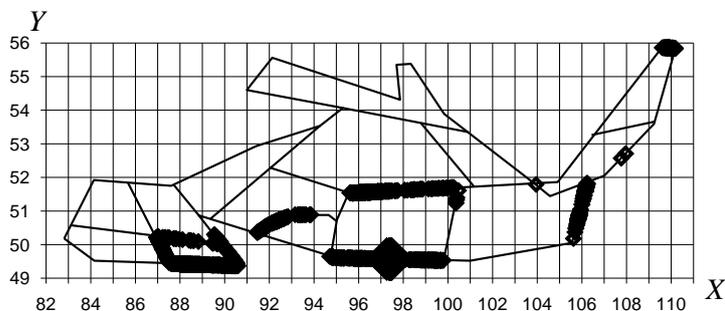
В сейсмической зоне Вранча (Румыния) с целью изучения процессов генерации землетрясений и их связи с деформацией литосферы, были оценены параметры очагов землетрясений за период с 2014 по 2020 г., а также определено поле напряжений с помощью инверсии фокального механизма и неконтролируемого машинного обучения. В пределах земной коры максимальное горизонтальное напряжение согласуется с кинематикой поверхностных разломов и геодезическими данными о горизонтальных скоростях плит. Внутри сейсмогенного тела, расположенного на мантийных глубинах, доминируют вертикальные напряжения сжатия. Полученные коэффициенты напряжений оказались небольшими: около 0.2 для мантийных землетрясений с $M_w > 4$ и около 0.4 для $M_w < 4$. Это противоречит предположению о хрупком разрушении. Показано, что повышенное давление порового флюида снижает коэффициенты напряжений. Следовательно дегидратационное охрупчивание может способствовать возникновению сейсмичности на средних глубинах в плите Вранча. Сравнение с сейсмической томографией и исследованиями анизотропии показывает высокую корреляцию между направлениями максимальных горизонтальных напряжений и сейсмической анизотропией, особенно ниже глубин 130 км. Это позволяет предполагать, что окружающий мантийный поток также может способствовать накоплению напряжений в плите, обуславливающих ее сейсмический потенциал. Результаты проведенного исследования представлены в статье [68].

2.3. Моделирование динамики блоков и сейсмичности региона Алтай-Саяны-Байкал

С использованием методики моделирования динамики блоковых структур и сейсмичности выполнено численное моделирование для региона Алтай-Саяны-Байкал. Блоковая структура представляется в виде слоя толщины H между двумя параллельными

горизонтальными плоскостями. Ее разделение на блоки построено на основе схемы морфоструктурного районирования региона. Структура состоит из 14 блоков, которые ограничены линеаментами только первого и второго рангов. Землетрясения в модели возникают в зонах разломов.

а)



б)

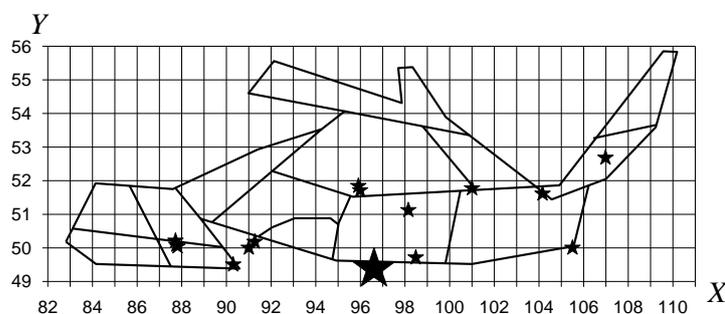


Рисунок 13. Положения эпицентров модельных (а) и реальных (б) землетрясений с $M \geq 6$. На горизонтальной оси отложены градусы в.д., на вертикальной оси – градусы с.ш. Эпицентры модельных землетрясений показаны ромбами, а реальных – звездочками. Большие ромбы - эпицентры модельных землетрясений с $M \geq 7.85$. Большая звездочка -- эпицентр сильнейшего землетрясения региона с $M 8.2$, 1905г.

Целью моделирования являлось получение путем подбора параметров модели пространственного распределения эпицентров модельных землетрясений, которое согласуется с положениями эпицентров землетрясений, произошедших в регионе. Результаты моделирования хорошо согласуются в распределением наблюдаемой сейсмичности и ее характеристиками (рис. 13 а, б). В окрестностях эпицентров всех известных землетрясений с $M \geq 6.0$ и практически всех с $M \geq 5.0$ имеются эпицентры соответствующих модельных землетрясений. Результаты моделирования дали дополнительные аргументы в пользу достоверности результата распознавания мест

возможного возникновения сильных землетрясений в регионе, выполненного ранее. Результаты проведенного исследования представлены в статье [71].

2.4. Моделирование динамики блоков и сейсмичности Индо-Бирманской дуги

Индо-Бирманская дуга представляет собой границу между Индийской и Бирманской плитами. Относительное движение плит имеет существенную сдвиговую компоненту, поэтому неясно, происходит ли субдукция до сих пор. Данные GPS указывают на сближение со скоростью 13-17 мм/год вдоль субгоризонтального раздела Индийской и Бирманской плит, в то время как сдвиги происходят на нескольких субвертикальных разломах, что соответствует закономерностям разделения деформаций в зонах субдукции. Данные сейсмической истории региона обрывочны и недостаточны для того, чтобы оценить возможность сильных землетрясений на Индо-Бирманском мегатрасте. Использована блоковая модель динамики литосферы, которая позволяет моделировать одновременно медленные тектонические движения и землетрясения. Показано, что модель сцепленного мегатраста предпочтительнее, так как она лучше воспроизводит наблюдаемые тектонические скорости. Интегральные характеристики синтетической сейсмичности, такие как магнитудно-частотное распределение землетрясений и уровень сейсмической активности, соответствуют особенностям наблюдаемой сейсмичности. Моделирование свидетельствует о том, что мегатраст сцеплен и может порождать сильные землетрясения с магнитудой более 8, с длительным периодом повторения, превышающим тысячу лет. Основные результаты показаны на рис. 14.

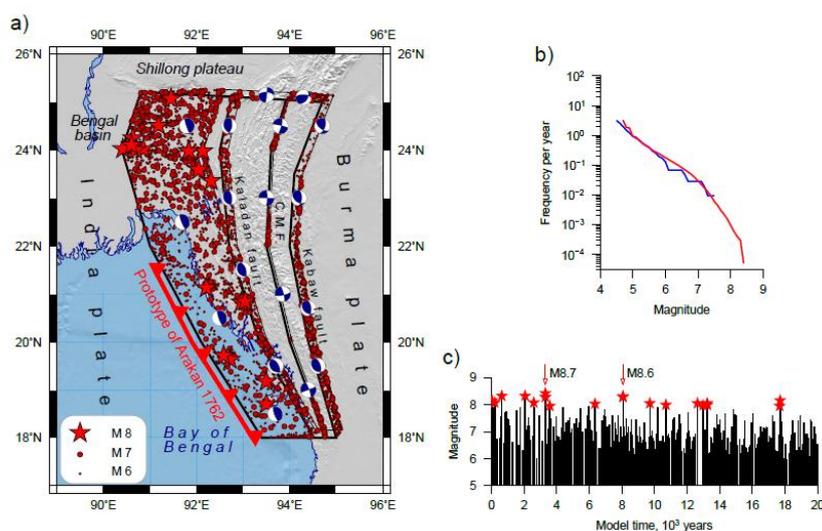


Рисунок 14. Синтетическая сейсмичность Индо-Бирманской дуги за 20 тысяч лет, полученная с помощью блоковой модели динамики литосферы.

А) – карта эпицентров: сильнейшие землетрясения с $M \geq 8.0$ (красные звездочки) смоделированы в зоне субдукции. Типичные механизмы очагов синтетических землетрясений показаны на каждом сегменте. В) Графики повторяемости модельной и наблюдаемой сейсмичности, нормированные на время. С) временная последовательность модельных землетрясений с $M \geq 6.0$, среднее время повторяемости событий с $M \geq 8.0$ превышает тысячу лет. Максимальная магнитуда $M=8.4$ на южном сегменте. Магнитуда мульти-сегментных землетрясений достигает 8.7 (отмечены стрелками на панели С), их зона разрыва отмечена красным на панели А), такие события могут быть моделью землетрясения Аракан 1762г. с макросейсмической интенсивностью XI. Результаты представлены в работе [74].

2.5. Модель динамики коровых блоков и сейсмичность Закавказья

Сильные землетрясения Закавказья являются результатом продолжающегося столкновения Аравийской и Евразийской плит. Для оценки сейсмической опасности в регионе мы моделируем динамику и сейсмичность с помощью блоковой модели динамики литосферы. Геометрия блоков определена на основе морфоструктурной схемы Закавказья, скорости тектонических движений задаются в соответствии с измерениями GPS. Была использована нелинейная реологическая модель разломов, разделяющих блоки земной коры. Проведен ряд численных экспериментов, чтобы ответить на следующие вопросы: (1) где происходят сильнейшие землетрясения и каков период их повторяемости; (2) как жесткие блоки Закавказья реагируют на движение Аравийской плиты и на движения глубоких слоев земной коры; (3) соответствуют ли скорости на разломах и смещения блоков геодезическим наблюдениям. Результаты моделирования подтверждают, что современная сейсмичность и динамика Закавказья является следствием движения Аравийской плиты в северо-северо-восточном направлении. Вариации реологических свойств разломов и нижней коры также влияют на сейсмичность и приводит к изменению числа сильных землетрясений и максимальных магнитуд. Наряду с инструментальными измерениями результаты моделирования могут быть использованы для комплексного изучения сейсмической опасности в регионе.

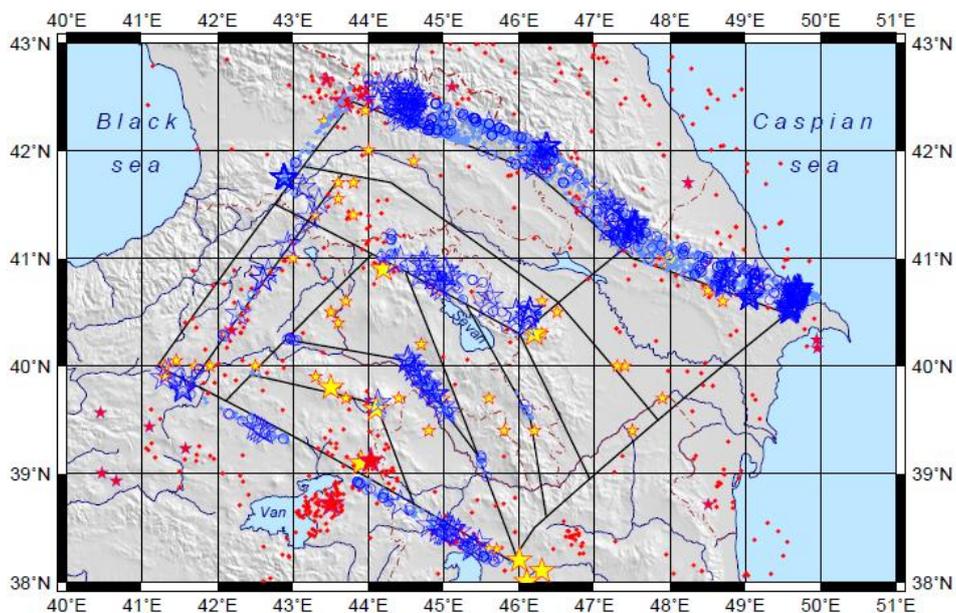


Рисунок 15. Синтетическая сейсмичность (синие символы) с $M > 6$ вдоль основных разломов и наблюдаемая сейсмичность (красные и желтые символы).

Результаты моделирования представлены на Рис. 9 и опубликованы в [128, Прил.А].

2.6. Глобальная геодинамическая модель современной Земли

На основе анализа имеющихся мировых данных сейсмологии, геохимии, геологии, данных измерений рельефа и теплового потока, а также численного моделирования построена глобальная термохимическая модель современной Земли. Дано решение фундаментальной проблемы тепло-массообмена между верхней и нижней мантии. Показано, что общепринятая модель двухслойной конвекции в мантии, в течение более трех десятилетий отстаиваемая, в частности авторитетными российскими учеными, противоречит новым данным [7].

Плюмы, идущие из нижней мантии, имеют первичный химический состав. Магмы срединно-океанических хребтов обеднены несовместимыми элементами в количестве, соответствующим тому, что эти элементы ушли в континенты только из объема верхней мантии. На этом основании полагали, что конвекция в мантии двухслойная. Однако новые открытия показали, что и нижняя мантия тоже обеднена элементами, ушедшими в гигантские скопления эклогита на дне мантии. Поэтому конвекция общемантийная. В хребты поступает деплетированное вещество из всей мантии. Плюмы зарождаются на дне

деплетированной нижней мантии, захватывая несовместимые элементы из скоплений эклогита.

В работе [8] получены основные черты суперконтинентального цикла. Сдвиговые надлитостатические напряжения в модели не превышают 2-3 МПа в основной части верхней мантии и менее 30 МПа в основной части нижней мантии; однако в зонах субдукции и в прилегающих районах континентов они составляют 100-200 МПа. Объединение континентов вызывается силами тяги от субдуцирующих слэбов в области между ними. Получено, что при высоких числах Рэлея не происходит образования единого суперплюма под суперконтинентом шириной в несколько сотен километров и более. Вместо этого возникает относительно узкая зона из одного - двух мантийных плюмов. Группа мантийных плюмов формируется на 80 – 100 млн. лет позднее, уже при значительном раскрытии океана.

2.7. Изучение глобальной циркуляции и роли мантийных плюмов в процессах переноса тепла и массы в мантии Земли

Исследовалась структура конвективных течений и перенос тепла течениями мантийной конвекции. Структура мантийных течений зависит от распределения тепловых источников, создающих конвекцию. Измеренный поток тепла Земли 46ТВт создается в основном благодаря выделению тепла при радиоактивном распаде и высвобождению тепла при вековом остывании Земли, а также благодаря теплоте затвердевания растущего внутреннего ядра. Долгое время поток тепла из ядра оценивался из условия, что почти все оно выносится на поверхность плюмами в горячих точках, зарождающихся на границе с ядром. Тепло, выносимое на поверхность плюмами, рассчитанное по росту вулканических топографических возвышенностей, составляет 2.4–3.5 ТВт. Однако при таком малом потоке из ядра рассчитанный полный поток оказывался меньше измеренного. Долгое время эта проблема оставалась нерешенной. В ряде работ даже предлагалось сделать переоценку содержания радиоактивных изотопов с превышением среднекосмического или принять, что Земля ранее остывала медленнее принятого и поэтому сохранила тепло и только сейчас отдает этот избыток. В работе показывается, что, хотя плюмы и являются восходящими потоками мантийной конвекции, но только самыми узкими. Они вместе с погружающимися плитами приводят в циркуляционное движение все вещество мантии. В результате, кроме плюмов, имеются и другие более широкие восходящие потоки. Они тоже переносят тепло ядра. Проведенные авторами расчеты распределения плотности теплового потока на границе с ядром и на поверхности показало, что эти широкие

восходящие потоки переносят к поверхности даже в 2 раза больше тепла, чем плюмы. С учетом этого эффекта баланс тепла современной Земли стал согласоваться со всем комплексом имеющихся данных наблюдения. Результаты проведенного исследования опубликованы в работе [72].

2.8. Построение уточненной теории изгиба литосферных плит

Проведены работы по построению уточненной теории изгиба литосферных плит. Самые мощные землетрясения происходят при образовании подвижек на стыке изгибающихся океанической и континентальной плиты в зонах субдукции (рис.16). Океанические плиты постоянно движутся к зоне субдукции и при погружении благодаря трению покоя давят горизонтально и тянут за собой вниз соприкасающийся край континентальной плиты. Этот край сжимается и одновременно постоянно со скоростью до см в год увеличивается глубина желоба. При этом упругое напряжение изгиба континентального края растет. В среднем через 100 лет оно достигает критического, возникает подвижка, трение ослабевает и континентальный край выпрямляется. На стыке плит и на склоне континентальной плиты возникают очаги землетрясений. После этого поднимается дно океана в желобе и возникает цунами. Структура зоны субдукции возвращается в прежнее состояние, и цикл повторяется.

Ранее было показано, изгиб края континентальной плиты подобен океанической с выгибом вверх, аналогично внешнему поднятию на дне океана. При землетрясении и выпрямлении этого края плиты, он понижается, а выгиб, наоборот, опускается. Именно в этом месте на суше происходит землетрясение (например, Фукусима). Для построения такой модели циклического изгиба края континентальной плиты необходимо построить уточненную теорию изгиба литосферных плит.

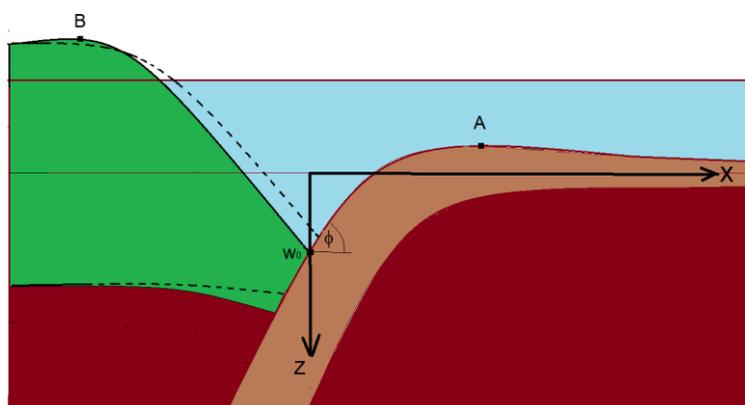


Рисунок 16. Изогнутая океаническая плита и край континентальной плиты, выпрямляющийся после землетрясения при уменьшении силы трения с погружающейся океанической плитой. Глубина желоба $-W_0$, угол субдукции $-\phi$, внешнее поднятие (выгиб) океанической плиты $-A$, континентального края $-B$. Масштаб по вертикальной оси преувеличен.

В настоящее время расчет распределений напряжений изгиба плит проводится на основе классической теории Кирхгофа для тонких плит, критерием применимости которой является условие $h/L < 10$. Для океанических плит толщина $h = 50$ км и длина $L > 1000$ км. Поэтому ранее сомнений о применимости теории Кирхгофа ни у кого не было. Однако в рамках работы по данной теме было показано, что, поскольку океанические плиты изгибаются вблизи зоны субдукции, то их эффективная длина порядка 200-300 км. Поэтому возникла задача уточнения имеющейся теории изгиба океанических плит. Построение уточненной теории еще более необходимо для расчета изгиба более толстого и более короткого изгибающегося перед землетрясением края континентальной плиты.

Исследовалась также возможность использования теории толстых плит. Все существующие в теории упругости 3Д теории толстых плит в отличие от теории тонких плит Кирхгофа, допускающей для ряда моделей аналитические решения, являются очень трудоемкими и имеют ограниченное применение даже в точных технических расчетах. Поэтому встает проблема построения упрощенной теории изгиба толстых плит. Были исследованы возможности упрощения общей теории упругости для 2Д модели изгиба толстых плит. В настоящее время изгиб океанических плит исследуется именно для 2Д моделей, но тонких плит. Показано, что систему уравнений изгиба толстых плит можно очень сильно упростить. В результате расчет функции изгиба плит для многих моделей занимает всего несколько строк и при этом решение дает в аналитическом виде.

Проведено детальное сравнение с имеющимися тестовыми точными решениями общих уравнений упругости. Оно показало, что точность расчета изгиба плит оказывается на порядок выше по сравнению с используемой в настоящее время теорией Кирхгофа. По результатам готовится публикация.

2.9. Напряжения в мантии и суперконтиненте в процессе суперконтинентального цикла для двумерной декартовой модели мантии

Были изучены напряжения в мантии и суперконтиненте в процессе суперконтинентального цикла для двумерной декартовой модели мантии. В данной

работе были проведены расчеты вертикальных и горизонтальных напряжений для модели термохимической мантийной конвекции с фазовыми переходами и плавающими континентами. Континенты моделируются с помощью активных маркеров, имеющих дополнительную вязкость и плавучесть. Изучены разные стадии суперконтинентального цикла с точки зрения изменения напряжений в мантии и в континентах. В процессе численного моделирования суперконтинентальный цикл реализуется несколько раз. При этом время жизни суперконтинента зависит от его размера. Непосредственно перед распадом суперконтинента растягивающие горизонтальные напряжения в нем могут достигать -250 МПа. В то же время под суперконтинентом отчетливо проявляются сжимающие горизонтальные напряжения величиной 50-100 МПа. Причиной различия напряжений в суперконтиненте и подстилающей мантии является резкое различие их вязкости. В значительной части мантии надлитостатические горизонтальные напряжения находятся в пределах ± 25 МПа, тогда как горизонтальные напряжения вдоль зон субдукции и континентальных окраин значительно выше. В процессе континентальных столкновений сжимающие напряжения могут достигать 130 МПа, а в пределах субконтинентальной мантии растягивающие надлитостатические напряжения составляют около -50 МПа. Динамическая топография также отражает основные стадии суперконтинентального цикла и коррелирует с реальными значениями. Перед распадом и сразу после распада суперконтинента континенты испытывают максимальное поднятие. В суперконтинентальном цикле топографические высоты континентов обычно изменяются в интервале примерно $\pm 1,5$ км относительно среднего значения. Топографические максимумы орогенных образований высотой около 2-4 км обнаруживаются вдоль межконтинентальных коллизий, а также при взаимодействии соседних зон субдукции с континентальными окраинами (рис. 17).

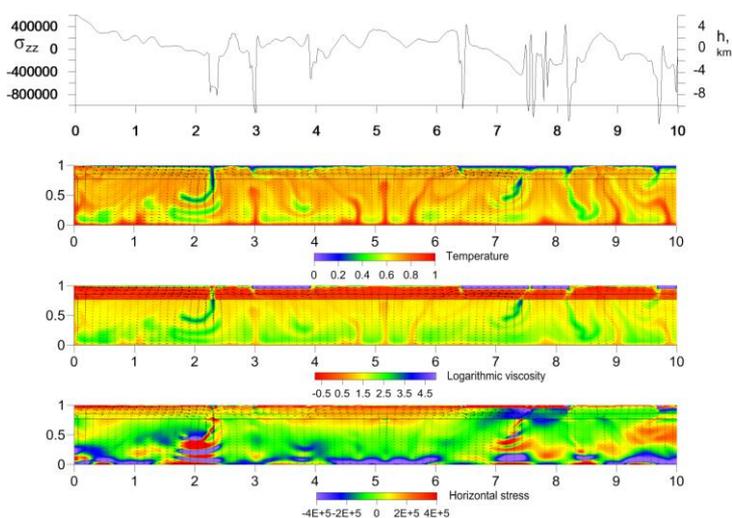


Рисунок 17. Стадия сборки суперконтинента, континенты лежат на нисходящих мантийных потоках и опущены. Результаты представлены в работе [87].

2.10. Сейсмогенно-триггерный механизм активизации эмиссии метана на Арктическом шельфе

Предлагается сейсмогенно-триггерный механизм активизации эмиссии метана на Арктическом шельфе в конце 70-х годов 20-го века, вызвавшей начало резкого потепления климата в Арктике, а также интенсивного разрушения покровно-шельфовых ледников Западной Антарктиды в конце 20-го и начале 21-го веков, сопровождаемого выделением метана из подстилающих гидратсодержащих осадочных пород и быстрым потеплением климата в Антарктиде. Данный механизм связан с действием деформационных тектонических волн в системе литосфера-астеносфера, вызванных сильнейшими землетрясениями, происходящими в наиболее близко расположенных к полярным областям зонах субдукции: Алеутской, находящейся в северной части Тихого океана, и Чилийской и Кермадек-Маккуори, расположенных в юго-восточной и юго-западной частях Тихоокеанской литосферы. А именно приход тектонической волны от сильного землетрясения приносит добавочные напряжения, которые вызывают разрушение шельфовых ледников и подлёдных газгидратов в полярных областях Земли с выделением больших объёмов метана в атмосферу, что приводит к быстрому глобальному потеплению и глобальному повышению уровня моря. Рассмотренная гипотеза приводит к выводу, что в грядущие десятилетия процессы разрушения ледников и потепления климата в Антарктиде будут нарастать из-за беспрецедентного роста числа сильнейших землетрясений в зонах субдукции юга Тихого океана в конце 20-го и начале 21-го веков. Кроме того, обсуждается возможность катастрофического сползания громадных покровных ледников Антарктиды в море (бассейн Уилкса, Восточная Антарктида) и

обрушения выводного ледника Тауйетс (т.н. ледник Судного дня, Западная Антарктида) с глобальным повышением уровня моря на несколько метров за короткое время (часы, дни).

Приведенные модель (рис. 18, 19) и расчеты показывают, что существуют естественные причины глобального потепления и вклад человечества в глобальное потепление может быть незначительным. В этом случае рушится все зеленая повестка человечества с углеродными полигонами и колоссальными вложениями в т.ч. в России в снижение выбросов углекислого газа. Результаты опубликованы в [79, 83].

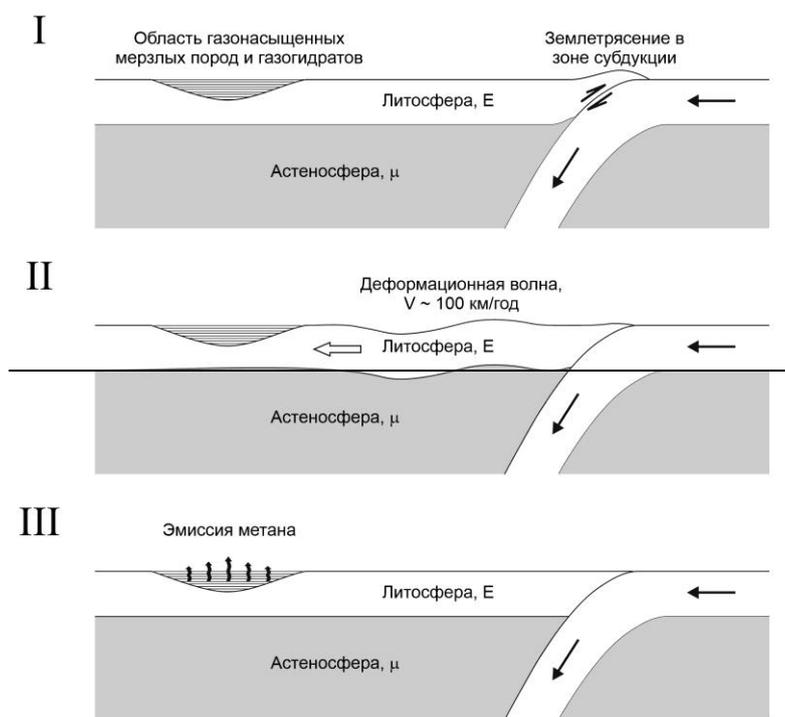


Рисунок 18. Сейсмогенно-триггерная схема разрушения газогидратов и эмиссии метана деформационными волнами, вызванными сильнейшими землетрясениями в зоне субдукции.

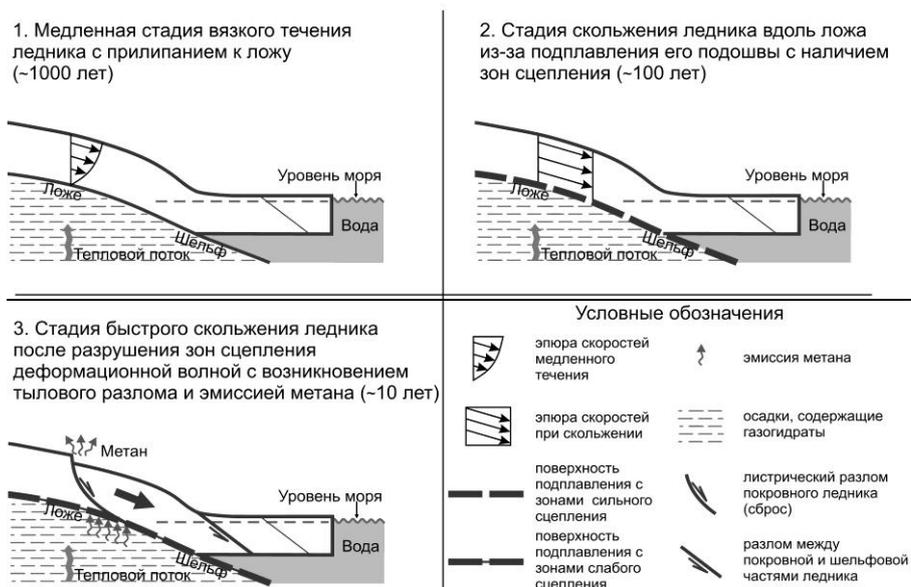


Рисунок 19. Схема различных стадий и режимов движения покровно-шельфовых ледников.

В рамках этого направления продолжается развитие теории академика Леопольда Исаевича Лобковского о влиянии сильных субдукционных землетрясений на климат Земли и быстрое разрушение шельфовых ледников в качестве триггерного эффекта. Предлагается сейсмогенно-триггерный механизм активизации эмиссии метана на Арктическом шельфе в конце 70-х годов 20-го века, вызвавшей начало резкого потепления климата в Арктике, а также интенсивного разрушения покровно-шельфовых ледников Западной Антарктиды в конце 20-го и начале 21-го веков, сопровождаемого выделением метана из подстилающих гидратсодержащих осадочных пород и быстрым потеплением климата в Антарктиде. Данный механизм связан с действием деформационных тектонических волн в системе литосфера-астеносфера, вызванных сильнейшими землетрясениями, происходящими в наиболее близко расположенных к полярным областям зонах субдукции: Алеутской, находящейся в северной части Тихого океана, и Чилийской и Кермадек-Маккуори, расположенных в юго-восточной и юго-западной частях Тихоокеанской литосферы. Предполагается, что приход тектонической волны от сильного землетрясения приносит добавочные напряжения, которые вызывают разрушение шельфовых ледников и подлёдных газгидратов в полярных областях Земли с выделением больших объёмов метана в атмосферу, что приводит к быстрому глобальному потеплению и глобальному повышению уровня моря. Также в работе построена численная модель движения льда в различных условиях. На основе реологического закона Глена для двумерной модели движения льда как нелинейной вязкой жидкости рассчитаны скорости течения ледника толщиной 3000 м в условиях

прилипании к ложу (~20 м/год) и в условиях скольжения по коренному основанию при подплавлении нижней кромки ледника за счет повышенного теплового потока снизу (~3000 м/год). Эти скорости хорошо согласуются со скоростями движения ледников Пайн-Айленд и Судного Дня, Амери, Денмен и Тоттен. Быстрое движение некоторых выводных ледников Восточной Антарктиды, вероятно, также вызвано подплавлением их подошвы, что дает основание предположить повышенный подледный тепловой поток в этих районах Восточной Антарктиды. Результаты представлены в работе [83].

Также в работе построена численная модель движения льда в различных условиях. На основе реологического закона Глена для двумерной модели движения льда как нелинейной вязкой жидкости рассчитаны скорости течения ледника толщиной 3000 м в условиях прилипания к ложу (~20 м/год) и в условиях скольжения по коренному основанию при подплавлении нижней кромки ледника за счет повышенного теплового потока снизу (~3000 м/год). Эти скорости хорошо согласуются со скоростями движения ледников Пайн-Айленд и Судного Дня, Амери, Денмен и Тоттен. Быстрое движение некоторых выводных ледников Восточной Антарктиды, вероятно, также вызвано подплавлением их подошвы, что дает основание предположить повышенный подледный тепловой поток в этих районах Восточной Антарктиды.

2.11. Реакция литосферы Земли на доглобальную периодическую гравитационную нагрузку

Проблема предпочтительных времен сейсмической активности остается в значительной степени, не решенной со статистической точки зрения, хотя обширная литература о потенциальном влиянии приливных сил на возникновение землетрясения существует и продолжают увеличиваться. В этой связи в работе [33] были проанализированы гипотезы о предпочтительных днях для землетрясений, с помощью непараметрических статистических тестов.

Для проверки гипотез о днях, благоприятных для землетрясений, были использованы два непараметрических метода: критерий Колмогорова-Смирнова [32, 41] и критерий Кюйпера [31].

Существующие данные о времени возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7.5$ во всем мире, основанные на каталогах землетрясений, не позволяют отвергнуть нулевую гипотезу о случайном совпадении в любое время земного или лунного циклов. В частности, непараметрическая статистика критерия Кюйпера для циклических вариаций, применяемая к эмпирическим распределениям времени возникновения землетрясения с

$M \geq 7.5$ по дате (JD) и фазе Луны (MP), не позволяет отвергнуть нулевые гипотезы равномерного распределения в соответствующие циклы. С другой стороны, тот же самый тест Кюйпера позволяет отвергнуть нулевые гипотезы одинаковой вероятности возникновения на любую дату JD или фазу MP для сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, по крайней мере, в течение последних четырех десятилетий предположительно лучшего определения параметров землетрясений (в частности, для землетрясений в Северном полушарии с явной сезонной вариацией). Статистика непараметрического двух выборочного теста Колмогорова – Смирнова предполагает отсутствие предпочтительных расстояний до Луны при возникновении сильных землетрясений (рис. 20).

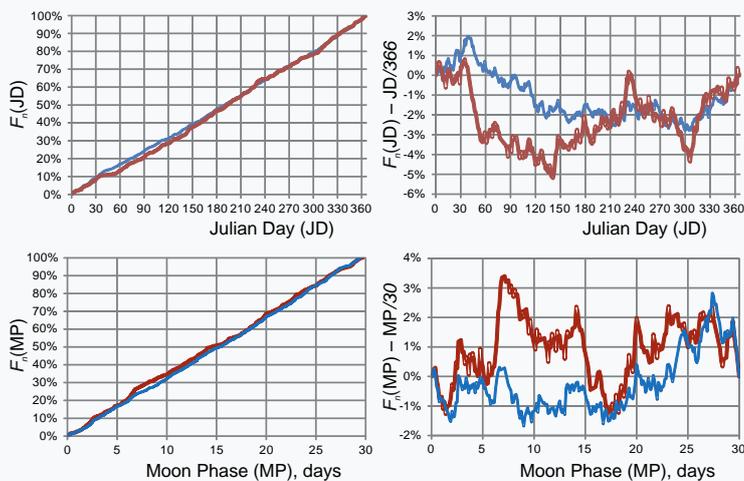


Рисунок 20. Верхний ряд слева: эмпирический cdf's $F_n(x)$ для 951 года ($x = \text{JD}$) времен возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7,5$ от NOAA, 115-2018 (синий) и 453 землетрясений с магнитудой $M \geq 7,5$ от USGS ANSS, 1900-2018 (жирный красный). Верхний ряд справа: отклонение cdf от равномерного распределения, $D(x) = F_n(x) - x / 366$, для 951 землетрясения из NOAA 115-2018 (синий) и 453 землетрясений из USGS ANSS, 1900-2018 (красный). Нижний ряд слева: эмпирический cdf's $F_n(x)$ для фазы Луны ($x = \text{MP}$) для 914 землетрясений с магнитудой $M \geq 7,5$ от NOAA, 115-2018 (синий) и 453 землетрясений с магнитудой $M \geq 7,5$. из USGS ANSS, 1900-2018 (жирный красный). Нижний ряд справа: отклонение cdf фазы Луны от равномерного распределения, $D(x) = F_n(x) - x / 29,53$ (в среднем), для 951 землетрясения от NOAA, 115-2018 (синий) и 453 землетрясений от USGS. ANSS, 1900-2018 (красный). Эмпирические кумулятивные функции распределения (cdf's) JD и MP точно следуют диагоналям равномерных распределений.

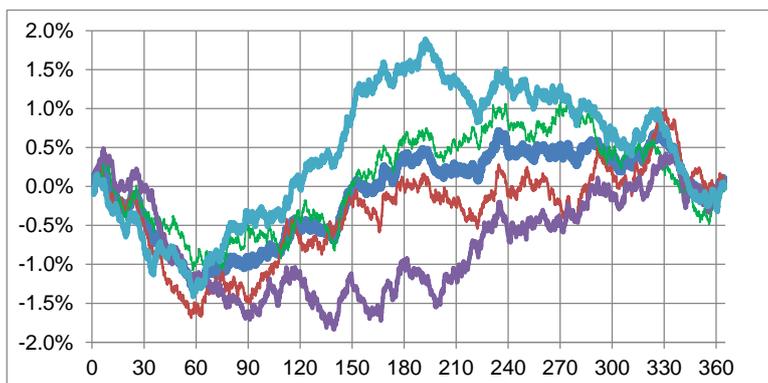


Рисунок 21. Отклонение D cdf JD от равномерного распределения для основных шоков магнитудой 6,0 или более из Глобальной базы данных гипоцентров USGS / NEIC, 1900-2017 гг. Примечание: все глобальные события - жирная синяя линия; все события в Южном полушарии - фиолетовая линия; все события в Северном полушарии - морская зеленая линия (явная сезонная закономерность - подъем от минимума 27 февраля до максимума 10 июля); события 1975-2017 гг. - красная линия; события 1900-1974 гг. - зеленая линия.

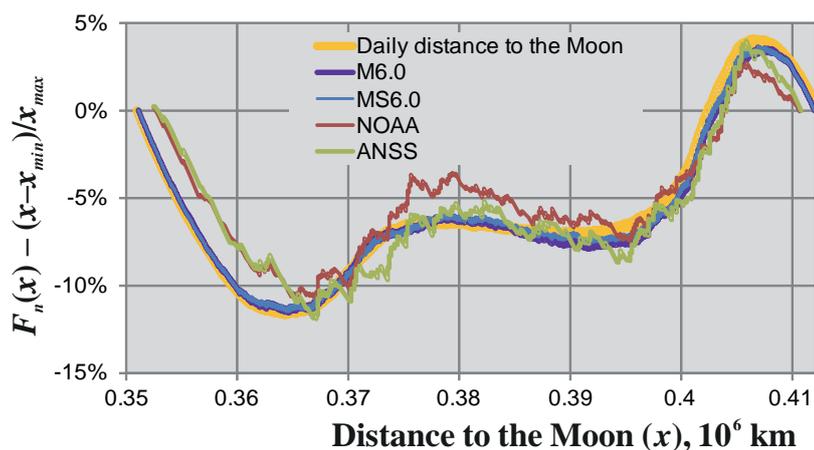


Рисунок 22. Отклонение эмпирической cdf расстояния до Луны (абсцисса, в Мкм = 106 км) от модели равномерного распределения для времен возникновения землетрясений с $M \geq 7,5$ из каталогов NOAA (красный) и ANSS (зеленый), землетрясения с $M \geq 6.0$ (фиолетовый) и основные толчки (синий) от GHDB, а также суточное расстояние до Луны по закону Кеплера (оранжевый), все в 1900-2018 гг.

Полученные результаты строгой статистической проверки гипотез (рис. 20-22) безусловно важны для лучшего понимания сложной сейсмической реакции литосферы Земли на долговременную периодическую гравитационную нагрузку. В работе сделаны следующие выводы:

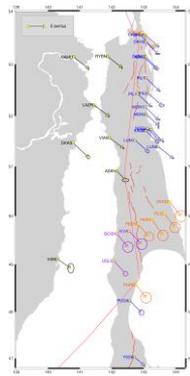
- влияние положения Земли относительно Солнца или Луны на возникновение землетрясений является сложным и вряд ли может вызвать самые большие землетрясения в мире ($M \geq 7.5$);
- однако значительная часть сильных землетрясений с $M \geq 6$ может быть связана с земными приливами, хотя и сложным образом;
- сезонная изменчивость очевидна в Северном полушарии;
- нет предпочтительного для землетрясений расстояния до Луны.

3. Исследование современных геодинамических процессов с использованием спутниковых технологий

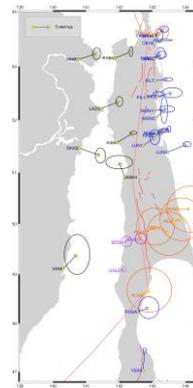
Подвижность активных разломов в сейсмоопасных регионах представляет собой один из ключевых факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние таких регионов. Моделирование деформаций земной коры в окрестности подвижных разломов позволяет оценить интенсивность накопления сейсмогенных напряжений, а также локализацию возможных очагов землетрясений. Для моделирования движений по разломам широко применяются спутниковые геодезические системы, которые позволяют при наличии развитой сети наземных наблюдений ГНСС оценивать региональную разломно-блоковую кинематику.

Сахалин. На острове Сахалин в последние годы развивается система регулярных наблюдений ГНСС. Систематизация всех имеющихся наблюдений ГНСС позволила составить обновленное, более общее представление о движениях на межплитовой границе, простирающейся вдоль острова Сахалин, согласно современным представлениям о конфигурации плит в данном регионе. Основой для выбора конфигурации границ блоков и параметров их движения послужила глобальная модель движения литосферных плит NNR-MORVEL56.

Набор измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (рис. 23) включал 23 пункта Северо-Сахалинского геодинамического полигона (ССГДП), 1 постоянно действующий пункт IGS – YSSK, расположенный в г. Южно-Сахалинске, 9 пунктов, опубликованных ранее.



a)



б)

Рисунок 23. Горизонтальные скорости смещения координат пунктов: а) в международной системе координат IGS14; б) относительно блока NA по модели NNR-MORVEL56

Для моделирования движений по разлому был применен распространенный подход, состоящий в аппроксимации контактной поверхности конечным покрытием непересекающихся элементов с последующим суммированием вклада каждого элемента в итоговые смещения в окружающей области. Результаты моделирования представлены на рис. 24.

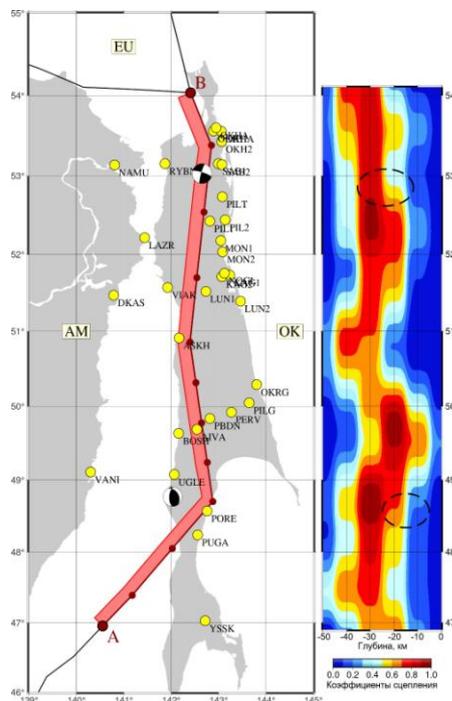


Рисунок 24. Распределение сцепления на контакте плит, полученное при уточнении векторов Эйлера блоков, с механизмами и очаговыми зонами крупнейших землетрясений.

Наибольшая величина сцепления на рассматриваемом участке межблоковой границы, в основном, характерна для глубин 20-30км. Локализация очагов двух сильнейших на Сахалине за последние 3 десятилетия сейсмических событий (показанные черным пунктиром на рис. 24), Нефтегорское (1995 г., $M_w = 7.0$) и Углегорское (2000 г., $M_w = 6.8$) показывает их близкое расположение к зонам максимального сцепления с высокоградиентными пространственными вариациями сцепления.

В ходе исследования подвижности разломов острова Сахалин смоделировано распределение сцепления на контакте плит, согласующееся с наблюдаемыми скоростями смещения пунктов на земной поверхности при одновременном уточнении кинематики смежных литосферных блоков, что позволяет интерполировать движения земной поверхности в регионе с опорой на построенную модель глубинного распределения. При этом модельные построения сопоставлены с локализацией очагов Нефтегорского и Углегорского землетрясений, что приводит к предварительным выводам о возможности оценивать сейсмогенный потенциал отдельных сегментов подвижных разломов острова. Результаты исследования были представлены в работах [75, 76, 81, 86].

Северо-Западный Кавказ и Предкавказье. Территория Северо-Западного Кавказа и Предкавказья относится к наиболее активным в сеймотектоническом отношении регионам нашей страны, поэтому анализ современных движений и деформаций этой области – актуальная научно-практическая задача. По данным анализа горизонтальных движений пунктов ГНСС территория Северо-Западного Кавказа и Предкавказья испытывает деформации сжатия и сдвига при ориентировке оси максимального сжатия в северо-восточном направлении. Их скорость составляет порядка 10^{-8} ... 10^{-7} год $^{-1}$. Согласно эмпирической зависимости, это значение достаточно для того, чтобы при активизации крупных разрывных нарушений протяженностью 500–600 км, закартированных в изучаемом районе, происходили сейсмические события с моментной магнитудой до 7.0. Такие землетрясения известны на Северо-Западном Кавказе. В то же время характер поля современной деформации не позволяет объяснить рост горно-складчатого сооружения со скоростью до 12 мм/год, развитие его контрастного, глубоко расчлененного рельефа. Этот факт свидетельствует о воздымании орогенного сооружения в том числе из-за воздействия внутренних (изостатических) сил, возникающих в связи с разуплотнением пород в интервале глубин 10–50 км. Результат опубликован в [80].

4. Проблемы магнитогидродинамики

4.1. Кинематическая генерация магнитных мод Блоховского типа пространственно-периодическим течением электропроводной жидкости

Если скорость течения $v(x)$ стационарна, то задача кинематического динамо эквивалентна задаче на собственные значения $L V = \lambda V$ для оператора магнитной индукции

$$M: V \rightarrow \eta \Delta V + \text{rot}(v \times V) \quad (1)$$

Магнитная мода V - это собственная функция оператора M , а действительная часть собственного значения λ - ее инкремент роста. Предполагается, что скорость имеет период 2π по каждой декартовой переменной x_i , и что жидкость несжимаема, т.е. поле скорости (как и магнитная мода) соленоидально.

При изучении возбуждения длинномасштабного поля предполагают, что магнитная мода зависит не только от быстрой пространственной переменной x , но и от медленной $X = \varepsilon x$, где ε - малое отношение масштабов. Если мода предполагается периодичной еще и по медленной переменной, то она имеет структуру блоховского поля $V = e^{iq \cdot x} b(x)$, где $\varepsilon = |q|$, а поле $b(x)$ имеет период 2π по каждой декартовой переменной x_i , как и поле скорости. В настоящей работе нас интересовало решение задачи о динамо, в котором дополнительный пространственный масштаб магнитной моды, независимый от пространственных периодов течения, не обязательно бесконечно длинный. Как и при использовании подхода теории устойчивости к длинномасштабным возмущениям, возможно численное решение задачи в быстрых переменных в кубе периодичности течения для магнитных мод указанного вида. В этом случае в уравнении на собственное значение экспонента $e^{iq \cdot x}$ сокращается, и оно редуцируется в задачу на собственные значения для оператора

$$\mathcal{M}_q: b \rightarrow \mathcal{M}b + 2i\eta(q \cdot \nabla)b - \eta|q|^2 b + iq \times (v \times b) \quad (2).$$

Необходимо найти волновой вектор q , для которого (при данном η) инкремент роста моды $\gamma(q) = \text{Re} \lambda(q)$ максимален. Достаточно рассмотреть q в параллелепипеде

$$Q = \{ q \mid 0 \leq q_1 \leq 1/2, -1/2 \leq q_2 \leq 1/2, -1/2 \leq q_3 \leq 1/2 \} \quad (3).$$

Задачу на поиск максимума решали с помощью метода градиентного спуска с применением псевдоспектральных методов для вычисления поля $\mathcal{M}_q b$ при заданном b . Производные инкремента $\gamma(q)$ по компонентам вектора q вычисляли, используя биортогональность собственных функций линейного оператора и сопряженного к нему.

Поведение инкремента роста магнитного поля $\gamma(q)$ изучали на примере двух модельных стационарных трехмерных течений $v(x)$ с нулевым средним, синтезированных

как конечные ряды Фурье, состоящие из гармоник, волновые числа которых не превосходят 7, с псевдослучайными коэффициентами, изначально равномерно распределенными на интервале $[0,1]$ и спроектированными и нормированными так, что течения соленоидальны, а их энергетический спектр монотонно экспоненциально спадает на 12 порядков с 1-го по 13-ый сферический слой единичной толщины в пространстве волновых векторов. Соответственно, модельные течения гладкие и периодичны по декартовым переменным, но имеют достаточно сложную пространственную структуру (рис. 25). Все коэффициенты Фурье второго течения мнимы, вследствие чего оно центрально-симметрично относительно начала координат, $\mathbf{v}(\mathbf{x}) = -\mathbf{v}(-\mathbf{x})$. Таким образом, в первом течении (но не во втором) имеет место магнитный α -эффект, а во втором - магнитная вихревая диффузия.

Графики рис.26 (б) показывают, что доминирующими при таких параметрах оказываются две ветви мод, и в точках перехода от одной ветви к другой доминирующий инкремент теряет дифференцируемость; эти графики также иллюстрируют периодичность

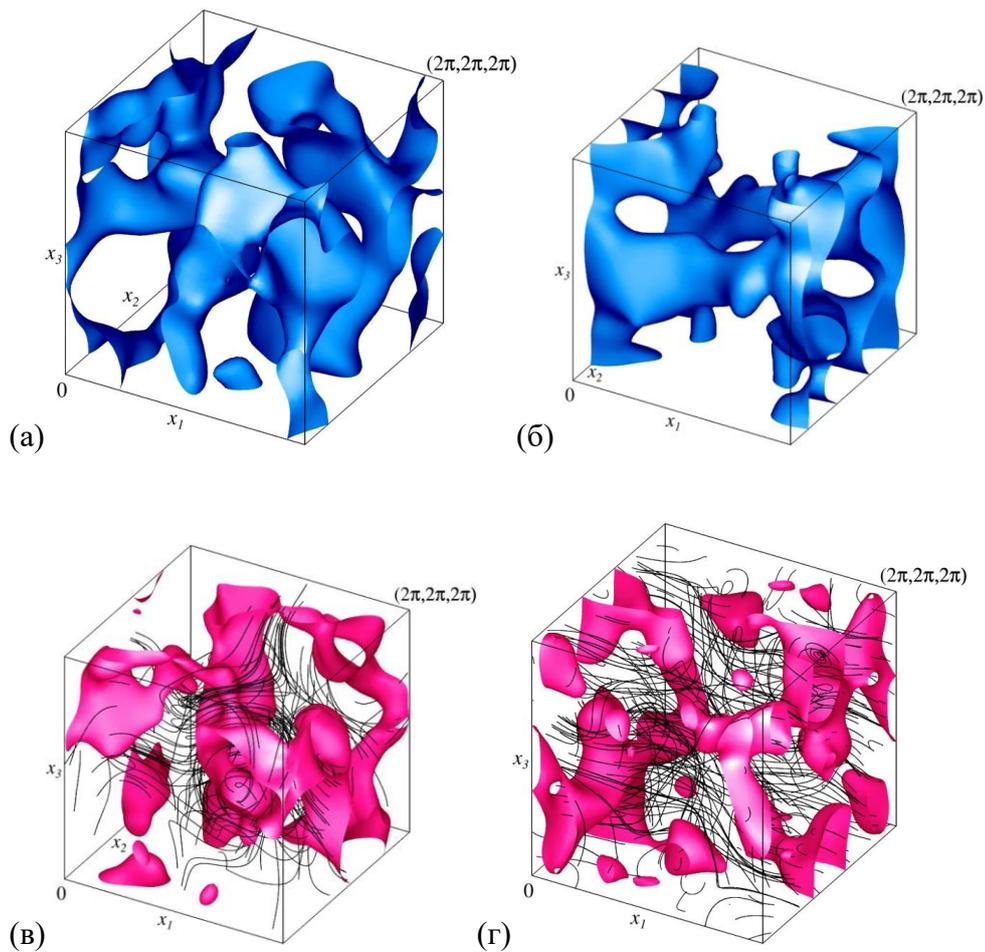


Рисунок 25. Изоповерхности плотности кинетической энергии $|\mathbf{v}|^2$ (а,б) и завихренности $|\text{rot } \mathbf{v}|$ (в,г) первого (а,в) и второго (б,г) модельных течений, для которых проведены

расчеты, на уровнях 50% (для первого течения) и 60% (для второго течения) от соответствующих максимумов. На панелях в,г также показаны отрезки некоторых траекторий частиц жидкости. Изображен один куб периодичности течений.

инкрементов роста доминирующих мод с периодом 1 по каждой компоненте волновых векторов \mathbf{q} . На рис. 2б(в) ось q_1 направлена перпендикулярно плоскости рисунка в сторону от читателя, ось q_3 вертикальна. Самые дальние от читателя изоповерхности отвечают минимальному из изображенных уровню 25% от максимума инкремента в параллелепипеде Q , и далее уровни растут при приближении к фронтальной плоскости $q_1=0$. Максимальный в Q инкремент роста, равный 0.041, достигается при $\mathbf{q}=(0.002,0.209,-0.430)$ (что соответствует $\varepsilon=|\mathbf{q}|=0.478$). Для рассматриваемого течения в кубе $[-1/2,1/2]^3$ периодичности по \mathbf{q} локальных максимумов инкрементов два, они отвечают противоположным \mathbf{q} , и оба максимума глобальные. Поскольку они оба расположены вблизи плоскости $q_1=0$, на рис. 2(в) возникают четыре локальных максимума при рассечении надвое этой плоскостью систем изоповерхностей вокруг двух указанных глобальных максимумов в указанном кубе и их копий при параллельном переносе на период вдоль вертикальной оси q_3 . У вертикальной срединной плоскости $q_2=0$ упорядоченность изоповерхностей на рис. 2б(в) нарушена, что вызвано потерей дифференцируемости максимальных инкрементов при смене ветвей собственных значений.

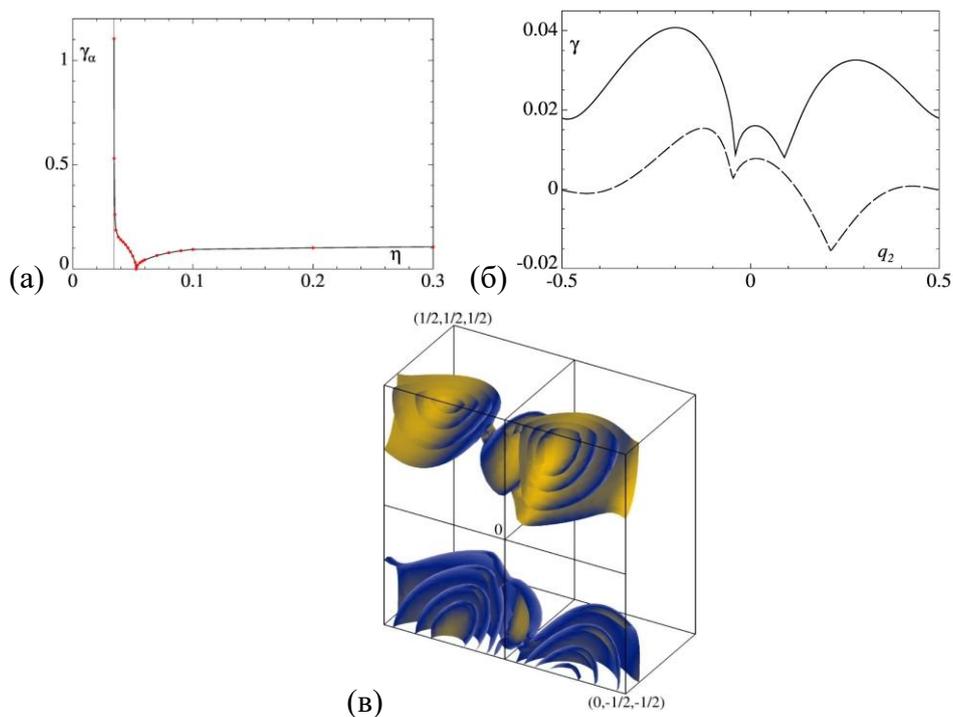


Рисунок 26. Максимальный инкремент роста длинномасштабного магнитного поля γ_α , генерируемого α -эффектом первого модельного течения, как функция молекулярной магнитной диффузии η (а). Красные точки: вычисленные величины γ_α . Тонкая прямая - вертикальная асимптота γ_α в точке $\eta \approx 0.34$ начала генерации короткомасштабного магнитного поля. Инкремент роста γ доминирующих блоховских магнитных мод типа для $q_1=0, q_3=0.4$ (сплошная линия) и $q_1=0.05, q_3=0.15$ (пунктирная линия) как функции q_2 при $\eta=0.1$ (б). Изоповерхности инкремента γ в параллелепипеде Q волновых векторов \mathbf{q} для первого модельного течения при $\eta=0.1$ на уровнях 25%, 50%, 75% и 90% от максимального в Q инкремента (в).

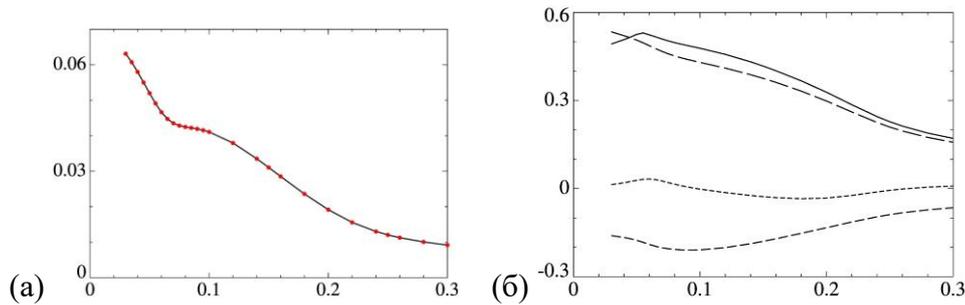


Рисунок 27. Максимальный в Q инкремент γ_{\max} роста блоховской магнитной моды для первого модельного течения (а) и волновой вектор \mathbf{q} , при котором достигается максимальный инкремент (б), как функции молекулярной магнитной диффузии η . Красные точки: вычисленные величины γ_{\max} (а). Сплошная линия: $|\mathbf{q}|$, штриховые: q_k , длина штриха увеличивается с индексом k (б).

Для рассматриваемого модельного течения максимальные (по волновым векторам \mathbf{q}) инкременты γ_{\max} роста блоховских магнитных мод монотонно растут при уменьшении молекулярной диффузии η , что согласуется с физическими представлениями о ее влиянии. Поведение инкрементов никак не коррелирует с эффективностью магнитного α -эффекта (которую естественно соотносить с максимальным инкрементом роста γ_α генерируемого α -эффектом длинномасштабного магнитного поля в медленном времени, рис. 26(а): "точечное" прекращение генерации α -эффектом (происходящее, когда среднее собственное значение симметризованного тензора α -эффекта обращается в 0) при $\eta \approx 0.053$ никак не сказывается на монотонном росте максимального инкремента γ_{\max} при уменьшении η ; также, график рис. 3(а) не отражает никаких драматических явлений в окрестности точки $\eta \approx 0.034$ начала генерации короткомасштабных магнитных полей, в которой инкремент мод, генерируемых α -эффектом, сингулярен и обращается в $+\infty$.

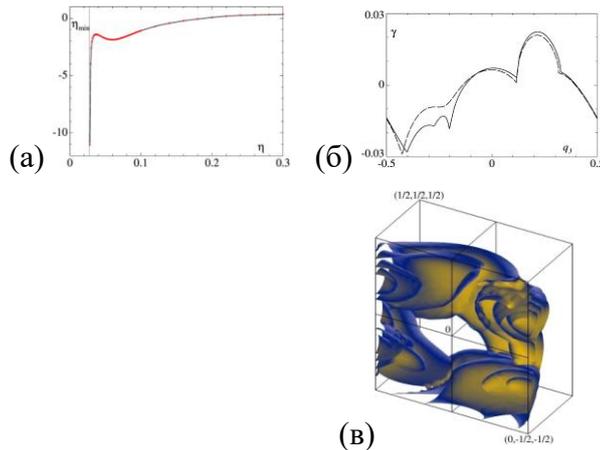


Рисунок 28. Минимальная магнитная вихревая диффузия η_{\min} во втором модельном течении как функция молекулярной диффузии η (а). Красные точки: вычисленные величины η_{\min} . Тонкая прямая - вертикальная асимптота η_{\min} в точке начала генерации короткомасштабного магнитного поля. Инкремент роста γ доминирующих блоховских магнитных мод для $q_1=0.2$, $q_2=-0.45$ (сплошная линия) и $q_1=0.2$, $q_2=-0.475$ (пунктирная линия) как функции q_3 при $\eta=0.1$ (б). Изоповерхности инкремента в области Q волновых векторов \mathbf{q} для второго модельного течения при $\eta=0.1$ на уровнях 25%, 50%, 75% и 90% от максимального в Q инкремента роста (в).

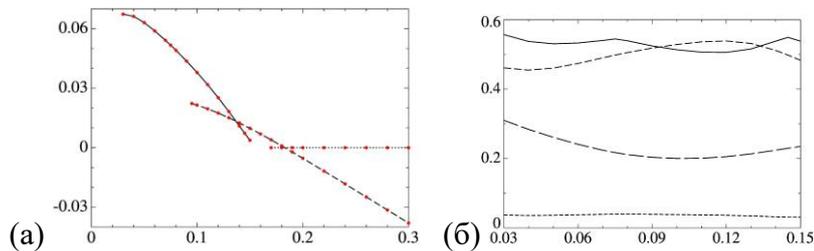


Рисунок 29. То же, что на рис. 27, для второго модельного течения.

Зависимость волновых векторов, при которых достигается максимум инкрементов γ_{\max} , представляется физически естественной: с увеличением диффузии, т.е. с ростом η , течение возбуждает поля с пространственными структурами, имеющими всё большие пространственные масштабы, и тем самым всё менее поддающиеся разрушению молекулярной диффузией; слабое разделение масштабов, отвечающее значительным $\varepsilon=|\mathbf{q}|$, у генерируемых мод возможно только при относительно малой молекулярной диффузии.

Рис. 28(б) показывает, что доминирующими при указанных параметрах оказываются, соответственно, пять и две ветви магнитных мод. На рис. 28 (в) оси направлены как на рис. 2(в). Изоповерхности при удалении от фронтальной плоскости $q_1=0$ отвечают убывающим уровням инкремента γ . Максимальный в Q инкремент равен

0.038, что по порядку величины совпадает с максимумом при $\eta=0.1$ для первого модельного течения. В кубе периодичности волновых векторов $[-1/2, 1/2]^3$ два глобальных и два локальных максимума. Они расположены вблизи фронтальной плоскости $q_1=0$, при $\mathbf{q}=\pm(0.039, -0.471, 0.200)$ (глобальные) и $\mathbf{q}=(0, \pm 1/2, 0)$ (локальные максимумы), что отвечает отношениям масштабов $\varepsilon=|\mathbf{q}|=0.513$ и $1/2$, соответственно. Четыре локальных максимума в Q на рис. 4(в) возникают при разрезании этой плоскостью систем изоповерхностей вокруг четырех указанных максимумов. Как и на 25(в), у вертикальной срединной плоскости $q_2=0$ нарушена упорядоченность изоповерхностей; это вызвано потерей дифференцируемости максимальных инкрементов при смене ветвей доминирующих собственных значений.

Как и для первого модельного течения (рис. 26а), в целом максимальные (по волновым векторам \mathbf{q}) инкременты γ_{\max} при уменьшении молекулярной диффузии η растут, что физически осмысленно. Однако в отличие от случая первого течения, максимальные инкременты теперь принадлежат трем независимым ветвям. На ветви, отвечающей наибольшему из рассмотренных η , максимальный инкремент $\gamma_{\max}=0$ достигается при $\mathbf{q}=0$ (пунктирная линия на рис. 29(а)). Эта ветвь состоит из нейтральных мод, т.е. соответствующее собственное значение равно 0, существование которых хорошо известно. Однако эта ветвь изображена не на всей ширине рисунка, а только для тех η , для которых нулевые инкременты роста являются локальными максимумами инкрементов. Следующая при уменьшении η (средняя) ветвь γ_{\max} (штриховая линия) отвечает волновому вектору $\mathbf{q}=(0, 1/2, 0)$. Нами доказано, что все \mathbf{q} , компоненты которых - целые или полуцелые числа, удовлетворяют условиям локального максимума (при этих \mathbf{q} производные инкремента по q_k равны 0). Инкременты этой ветви являются глобальными максимумами при $0.137 < \eta < 0.183$. Наконец, при самых малых η , изображенных на рис. 5(а), ветвь максимальных инкрементов опять сменяется.

Как и в случае первого модельного течения, поведение максимальных в Q инкрементов роста блоховских магнитных мод не коррелирует с действием механизма длинномасштабной генерации: три ветви инкрементов на рис. 29(а) ничем не напоминают график минимальной магнитной вихревой диффузии η_{\min} (рис. 28(а)).

При $\eta < 0.183$, когда максимальные инкременты образуют две ветви (показаны сплошной и штриховой линиями на рис. 29(б)), $|\mathbf{q}| \geq 1/2$, что отвечает слабому разделению масштабов; при больших η динамо не работает, максимальный инкремент роста, равный нулю, имеют короткомасштабные магнитные моды для $\mathbf{q}=0$. Существенное разделение масштабов, при котором у доминирующих мод $\varepsilon=|\mathbf{q}|$ мало, и их генерация происходит вследствие действия механизма отрицательной вихревой диффузии, не обнаружено.

Итак, наши расчеты для двух модельных течений показали, что максимальный инкремент роста имеют блоховские магнитные моды, у которых длина волнового вектора \mathbf{q} не слишком мала (порядка половины при рассмотренных величинах коэффициента молекулярной магнитной диффузии), что соответствует незначительному разделению масштабов, и растет с ростом магнитного числа Рейнольдса. Поэтому неочевидно, что генерацию длинномасштабного магнитного поля надо относить на счет действия именно магнитного α -эффекта или вихревой диффузии. Чтобы магнитный α -эффект был значителен, кроме достаточного разделения масштабов необходимо наличие достаточно развитой структуры у короткомасштабного течения. Такие условия характерны для процессов на пространственных масштабах, отвечающих инерционному интервалу спектра турбулентности, для которых локальное магнитное число Рейнольдса R_m уже мало. Они возникают, когда R_m меньше гидродинамического числа Рейнольдса, что характерно для планетарных динамо.

Полученный результат позволяет предположить, что в природных гидромагнитных динамо присутствует непрерывная шкала масштабов, слабо разделенных между собой, и турбулентное течение данного пространственного масштаба генерирует магнитное поле несколько (но не значительно) большего масштаба. Возможно, эта картина верна только при относительно малых R_m , для которых нами проведен численный эксперимент. Она усложняется нелинейным взаимодействием между полями разных масштабов, составляющих эту шкалу. Если же данная картина генерации магнитных полей верна и при больших R_m , то мы приходим к выводу, что явление генерации сложнее, чем это следует из представлений о главенствующей роли магнитного α -эффекта. Тогда, в частности, теряет фатальность для процессов генерации астрофизических магнитных полей катастрофическое подавление α -эффекта (т.н. α -quenching) при больших R_m . Результаты исследования опубликованы в [1-3].

4.2. Аналитичность решений системы трехмерных уравнений идеальной магнитогидродинамики по пространственным переменным и лагранжев алгоритм численного интегрирования этой системы по времени

Физические условия на поверхности Земли существенно зависят от поведения вещества в пространстве, окружающем планету. Солнечный ветер способен оказывать негативное воздействие как на технические устройства (спутники и средства связи), так и непосредственно на самочувствие людей. Поэтому изучение течения плазмы и

электромагнитных процессов в космическом пространстве - одна из практически важных задач физики Земли. Они удовлетворяют системе уравнений идеальной (диффузионными процессами пренебрегаем) магнитогидродинамики; она состоит из уравнения Эйлера, описывающего динамику течения жидкости и включающего в себя силу Лоренца (характеризует воздействие магнитного поля на жидкость), и уравнения магнитной индукции, описывающего эволюцию во времени магнитного поля.

Разработка более эффективных алгоритмов указанной системы уравнений требует лучшего понимания их весьма сложной математической природы. Так, с течением времени в решениях уравнения Эйлера (описывающего течения невязкой жидкости в отсутствие магнитного поля), как правило, развиваются мелкомасштабные структуры, что приводит к неограниченному росту градиентов поля скорости, а это создает существенные сложности при теоретическом исследовании свойств решений. Однако расчеты показывают, что происходит и обратное явление: в зонах больших градиентов у изначально существенно трехмерных потоков развиваются доминирующие структуры меньших размерностей, что, в принципе, может упростить задачу.

Для простоты, мы рассматривали пространственно-периодические решения. Используя оригинальный метод В.А. Желиговского, мы построили априорные оценки для галеркинских приближений к решению в функциональных пространствах Жевре и дали простое доказательство пространственной аналитичности решений уравнений идеальной магнитогидродинамики при условии аналитичности начальных данных по пространственным переменным. Отсюда следует аналитичность траекторий жидких частиц и магнитного поля по времени. Как и при отсутствии магнитного поля, траектории жидких частиц можно разложить в ряд Тейлора по времени (магнитное поле - подчиненное неизвестное поле, т.к. оно обладает свойством замороженности, а уравнение магнитной индукции при заданном течении имеет точное аналитическое решение). Из аналитичности решения по времени следует сходимость этого ряда в круге сходимости строго положительного радиуса. Для коэффициентов ряда Тейлора выведены рекуррентные соотношения с использованием как лагранжевых, так и эйлеровых пространственных переменных.

На основе этих результатов мы сформулировали алгоритмы для решения магнитогидродинамической задачи, аналогичные алгоритмам для интегрирования по времени уравнения Эйлера, в т.ч. лагранжеву алгоритму с использованием инвариантов Коши для чисто гидродинамического случая, созданному нами ранее. Отметим, что пространственная аналитичность начальных данных теперь оказывается существенным

условием, т.к. в отличие от случая решений бессилового уравнения Эйлера, из-за наличия в уравнении, описывающем динамику течения жидкости, силы Лоренца, каждый последующий коэффициент в разложении решения в ряд Тейлора по времени зависит теперь от вторых пространственных производных предыдущих коэффициентов. Это явление "потери производных" существенно усложняет задачу (в чисто гидродинамическом случае его нет) как в теоретическом, так и в вычислительном плане.

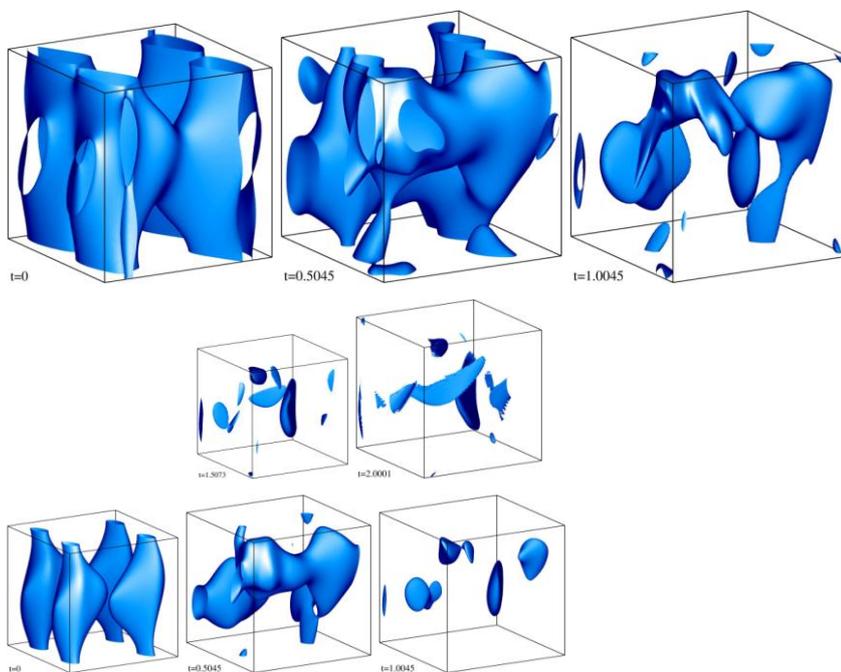
Для случайным образом выбранных начальных гладких трехмерных полей были проведены вычисления решений системы уравнений идеальной магнитогиродинамики. Из двух рассмотренных алгоритмов был выбран лагранжев, поскольку тестовые расчеты, выполненные нами ранее, показали, что в применении для чисто гидродинамической задачи этот алгоритм более эффективен. Вычисление коэффициентов временного ряда Тейлора с использованием рекуррентных соотношений проводили стандартным псевдоспектральным методом с разрешением 256^3 гармоник Фурье. На каждом шагу по времени суммировали 12 членов ряда Тейлора. Временной шаг выбирался автоматически из условия, что среднеквадратичная величина последнего суммируемого слагаемого в обрезанном ряду Тейлора равна заданной погрешности 10^{-12} .

Вычисление производных - процедура численно неустойчивая. Для проверки, насколько этот эффект существенен при вычислении коэффициентов ряда Тейлора, расчеты проведены 4 раза: с использованием стандартной "двойной" точности представления чисел с плавающей запятой (данные типа `real*8` Фортрана) и "четверной" (`real*16`), а также суммировались 6 или 12 членов ряда Тейлора по времени. Кроме того, мы провели расчеты с разрешением 512^3 гармоник Фурье с двойной точностью и суммированием 6 членов ряда Тейлора. При этом существенного расхождения в результатах расчетов не обнаружено.

Расчеты проводили до времени $t=2$. На рисунках показаны изоповерхности кинетической и магнитной энергий, с шагом ~ 0.5 единиц времени (в моменты окончания шагов интегрирования, в которых были превышены целевые временные пороги, кратные 0.5, поэтому эти времена не кратны 0.5 точно). В процессе эволюции в поле скорости (рис. 30) образуются квазидвумерные структуры и концентрированные сгустки высокой кинетической энергии течения, а в магнитном поле (рис. 31) возникают квазиодномерные структуры (жгуты). Это согласуется с существующими представлениями о развитии в гидродинамических и магнитогиродинамических системах структур меньшей размерности. Максимальная плотность магнитной энергии ко времени $t=2$ увеличивается в 1.9 раз, а кинетической - в 5.4 раза (это объясняет относительную малость объема,

ограниченного приведенными на рис. 7 изоповерхностями при $t > 1.5$). Рост максимумов энергий на фоне мало меняющихся их пространственных средних также свидетельствует о формировании контрастных пространственных структур. Проверено выполнение сохранения полной энергии $(|\mathbf{V}|^2 + |\mathbf{B}|^2)/2$; с течением времени она уменьшается (поскольку использованное в расчете пространственное разрешение ограничено и поэтому не может правильно описать развитые процессы прямого каскада энергии), однако это уменьшение не превышает 0.006 при $t=2$.

На рис. 30 и 31 видно, что при $t=1.5073$ в зонах большой кривизны изоповерхностей энергии магнитного поля на них возникает "бахрома"; изоповерхности кинетической энергии этим поражены меньше. При $t=2.0001$ это явление уже весьма развито - "мелкой рябью" покрыты многие изоповерхности и вдалеке от их "краюнок". Это характерное проявление недостаточности пространственного разрешения вычислений. Именно оно, а не ограниченная точность вычислений оказывается главным препятствием для продолжения численного интегрирования уравнений идеальной магнитогидродинамики. Однако эти два явления взаимосвязаны: численное дифференцирование рядов Фурье сводится к умножению коэффициентов на соответствующие волновые числа, а при использовании в вычислениях большего числа гармоник Фурье для увеличения пространственного разрешения растет величина этих сомножителей, что предъявляет повышенные требования к точности.



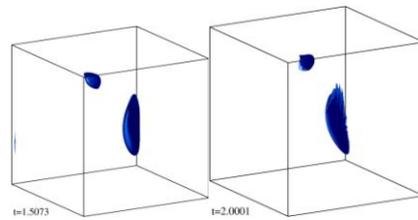


Рисунок 30. Изоповерхности плотности кинетической энергии течения на уровне $1/3$ (2 верхние ряда) и $1/2$ (2 нижних ряда) максимума с шагом по времени ~ 0.5 (точные времена указаны на рисунке).

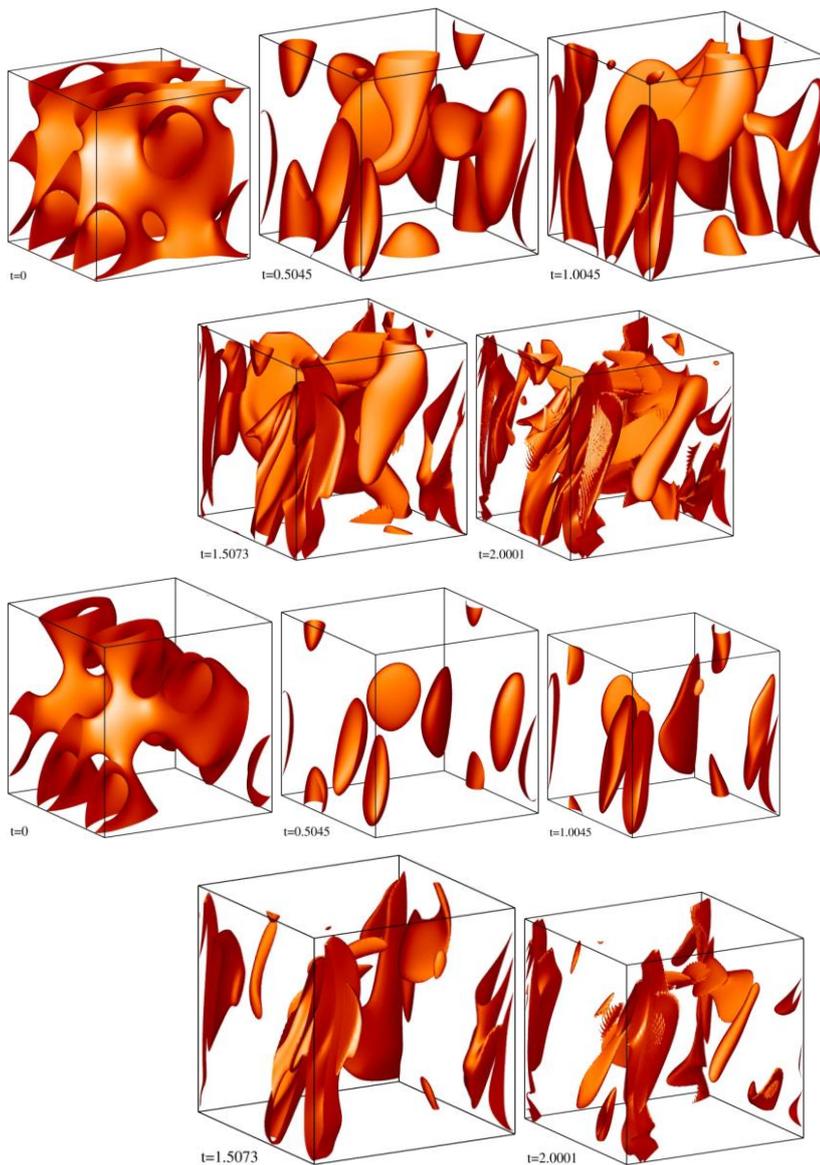


Рисунок 31. Изоповерхности плотности магнитной энергии течения на уровне $1/3$ (2 верхние ряда) и $1/2$ (2 нижних ряда) максимума с шагом по времени ~ 0.5 (точные времена указаны на рисунке).

Результаты исследования опубликованы в [26].

4.3. Кинематическое динамо

В работе [26] рассмотрена кинематическая генерация пространственно-периодическим течением электропроводной жидкости магнитных мод Блоховского типа вида произведения трехмерного поля, имеющего такую же периодичность, на гармонику Фурье с произвольным постоянным волновым вектором \mathbf{q} . Проведены расчеты магнитных мод с максимальным по \mathbf{q} инкрементом роста γ для модельного течения общего вида (в таких течениях присутствует магнитный α -эффект) и для центрально-симметричного модельного течения (в таких течениях α -эффект отсутствует, но в течении присутствует отрицательная магнитная вихревая диффузия, также именуемая β -эффект). Показано, что магнитные моды с максимальным по \mathbf{q} инкрементом роста характеризуются слабым разделением пространственных масштабов. Этот результат, по-видимому, означает, что, вопреки общепринятой точке зрения, указанные эффекты (как правило, ассоциирующиеся с существенным разделением масштабов) не могут считаться основными механизмами генерации космических магнитных полей; по-видимому, реальные природные механизмы характеризуются иерархией масштабов, течение жидкости данного масштаба генерирует поля несколько большего масштаба, а из-за нелинейности происходит взаимодействие процессов на всех масштабах, составляющих иерархию.

4.4. Идеальная магнитогидродинамика

Доказано, что, если начальные скорость течения жидкости и магнитное поле - аналитические функции пространственных переменных, то решение системы трехмерных уравнений идеальной магнитогидродинамики аналитично по пространственным переменным и времени на некотором временном интервале строго положительной длины. С использованием свойства замороженности магнитного поля построены разложения решения в лагранжевых координатах в ряды Тейлора по времени. Для их коэффициентов выведены рекуррентные соотношения. Эти результаты положены в основу алгоритмов численного интегрирования рассматриваемой системы уравнений по времени. Показана принципиальная применимость Лагранжева алгоритма. В решении наблюдается образование структур меньших размерностей. Уже при $t \approx 1.5$ использованное пространственное разрешение 256^3 гармоник Фурье оказывается недостаточным, и на изоповерхностях появляется численная "рябь". Результаты изложены в работе [25].

4.5. Блоховские возмущения трехмерных пространственно-периодических стационарных МГД состояний

Классические понятия α -эффекта и вихревой (турбулентной) диффузии основаны на предположении о существенном разделении пространственных масштабов между возмущаемым состоянием и генерируемой модой неустойчивости (например, между магнитной модой и генерирующим течением в задаче кинематического динамо). Пространственно-периодическое течение может генерировать квазипериодические магнитные поля типа блоховских мод, имеющих вид произведения периодического поля на плоскую волну с несоизмеримыми пространственными периодами; такой же вид могут иметь и моды неустойчивости периодических гидродинамических и МГД состояний. Сомножители, представляющие собой плоскую волну, имеют вид гармоник Фурье $e^{iq \cdot x}$. В задачах линейной гидродинамической и МГД устойчивости, описывающей моды неустойчивости и их инкременты роста, эти гармоники сокращаются из уравнений задачи на собственные значения, приводя (вследствие наличия в этих уравнениях дифференциальных операторов) перед этим к возникновению новых членов, линейных и квадратичных по волновому вектору плоской волны, \mathbf{q} . Соответственно, задача преобразуется в задачу на собственные значения для поля такой же пространственной периодичности, что и у поля скорости течения в задаче кинематического динамо, или у возмущаемого состояния в задачах гидродинамической и МГД неустойчивости. Это существенно упрощает расчеты, поскольку при вычислении собственных мод и их инкрементов роста нет более необходимости одновременно принимать во внимание зависимость мод от малых и больших пространственных масштабов.

Вычисляя максимум инкремента роста возмущения по волновому вектору плоской волны, можно узнать, насколько велико разделение пространственных масштабов между доминирующей модой неустойчивости и возмущаемым состоянием. В качестве численной оценки разделения масштабов блоховской моды естественно принять длину волнового вектора \mathbf{q} плоской волны $e^{iq \cdot x}$.

Были рассмотрены модельные стационарные генерирующие течения и возмущаемые МГД состояния с заданными псевдослучайными коэффициентами разложений в ряд Фурье и заданными энергетическими спектрами различного типа: экспоненциально затухающим или колмогоровским, или состоящие из нескольких ненулевых гармоник Фурье. Таким способом мы моделировали фрагмент турбулентного МГД состояния в определенном диапазоне пространственных масштабов: в диссипативном и инерционном интервалах, а также на наибольших масштабах крупных

вихрей. Были рассмотрены МГД состояния общего вида (не имеющие симметрий) и центрально-симметричные: в первых, в отличие от вторых, возникает магнитный α -эффект, гидродинамический АКА-эффект или комбинированный МГД α -эффект, а в центрально-симметричных возникает вихревая (турбулентная) вязкость и/или диффузия.

Было численно решено 18 задач линейной устойчивости для различных стационарных МГД состояний. Моды неустойчивости были представлены в виде конечных рядов Фурье, для дискретизации нелинейных дифференциальных операторов использован псевдоспектральный метод. Безразмерные коэффициенты молекулярной магнитной диффузии η и вязкости ν изменяли в ограниченном диапазоне от 0.03 до 0.3 (обезразмеривание по отношению к характерному пространственному масштабу изучаемого фрагмента течения исключает необходимость рассматривать более широкий диапазон величин этих коэффициентов), в связи с чем достаточное разрешение дают гармоники с компонентами волнового вектора в интервале от -15 до 15 для состояний с экспоненциально затухающим энергетическим спектром или состоящих из нескольких ненулевых гармоник Фурье, и в интервале от -31 до 31 для состояний с колмогоровским спектром. Выведены формулы для производных инкремента роста линейного возмущения по компонентам волнового вектора q_n , что позволило применять метод градиентного спуска для эффективного вычисления при данных η и ν максимального по \mathbf{q} инкремента. Также используя эти формулы, показано, что инкременты роста для волновых векторов \mathbf{q} плоской волны с целыми или полуцелыми компонентами являются локально экстремальными (т.е. производные инкремента роста по компонентам волнового вектора q_n равны нулю).

Полученные результаты полностью подтверждают наши предварительные результаты, изложенные в работе [3]. А именно, что в рассмотренных задачах всех трех типов (кинематического динамо и гидродинамической и МГД устойчивости) длина волнового вектора \mathbf{q} , для которого наблюдается максимальный по \mathbf{q} инкремент роста возмущения, в практически интересном случае достаточно малых коэффициентов магнитной диффузии η и/или вязкости ν оказывается в пределах от 0.3 до 1 и имеет тенденцию мало изменяться или увеличиваться с уменьшением η и ν . Следовательно, при таких параметрах задачи моды неустойчивости, отвечающие сильному разделению пространственных масштабов, не дают существенного вклада в эволюцию МГД системы, поскольку они растут со временем существенно медленнее, чем моды неустойчивости, характеризующиеся относительно небольшим разделением пространственных масштабов.

Полученные результаты предполагают, что в природных гидромагнитных динамо присутствует непрерывная шкала масштабов, слабо разделенных между собой, турбулентное течение данного пространственного масштаба генерирует магнитное поле несколько (но незначительно) большего масштаба, и поля разных масштабов, составляющих эту шкалу, нелинейно взаимодействуют между собой. Тем самым, классические понятия α -эффекта и вихревой (турбулентной) диффузии, основанные на гипотезе существенного разделения пространственных масштабов, по-видимому, требуют определенной ревизии.

В процессе выполнения этой работы были найдены случаи причленения кривых q , для которых реализуются локальные максимумы по q инкрементов, к подобным прямым, отвечающим постоянным q с целыми или полуцелыми компонентами (напомним, что для таких прямых было доказано достижение на них локального экстремума инкрементов). Мы изучили такое причленение с помощью асимптотических методов с разложением инкрементов и отвечающих им волновым векторам по корню из надкритичности, $(\eta_0 - \eta)^{1/2}$, вывели уравнения, которым удовлетворяют члены разложений, и, в частности, показали, что точка η_0 , в которой происходит причленение, является границей начала генерации длинномасштабного магнитного поля с помощью механизма отрицательной вихревой (турбулентной) магнитной диффузии результат опубликован в [73].

4.6. Генерация магнитного поля тепловой конвекцией в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси

Зависимость от скорости вращения вокруг вертикальной оси режимов нелинейного магнитного динамо с квадратными ячейками периодичности по горизонтальным направлениям в плоском слое электропроводной жидкости была исследована численно в работе [15]. Изучению слабонелинейной устойчивости по отношению к длинномасштабным возмущениям ветви стационарных конвективных динамо, устойчивых к мелкомасштабным возмущениям, была посвящена работа [14], где были выведены и численно исследованы амплитудные уравнения, описывающие развитие таких возмущений, и был сделан вывод, что крупномасштабное возмущение либо редуцируется в мелкомасштабную нейтральную моду, либо его амплитуда возрастает до бесконечности за конечное время. Эти результаты, однако, верны только в пределе существенного разделения пространственных масштабов возмущаемого МГД режима и его возмущения.

Мы численно исследовали вопрос, насколько этот сценарий воспроизводится в случае умеренного разделения масштабов в полностью нелинейной постановке. Для этого мы задавали возмущение (малой или большой амплитуды), имеющие по горизонтальному направлению x_i периодичность в целое число M_i раз большую, чем периодичность возмущаемого состояния, и вычисляли решение системы эволюционных уравнений динамо в новой ячейке периодичности. (Отметим, что геометрически ячейки периодичности с периодами кратностей $M_1 \times M_2$ и $M_2 \times M_1$ идентичны, т.к. ячейки периодичности возмущаемого МГД режима квадратны - различие в расчетах возникает только в силу того факта, что возмущаемое состояние не имеет симметрии замены $x_1 \leftrightarrow x_2$.) Поскольку вычисления должны выполняться с адекватным пространственным разрешением, из-за ограничений по доступным вычислительным ресурсам мы могли рассматривать возмущения и возникающие режимы только при $1 \leq M_i \leq 4$. Были использованы псевдоспектральные методы для дискретизации нелинейных дифференциальных операторов по пространству и конечноразностные методы интегрирования системы жестких галеркинских обыкновенных дифференциальных уравнений с т.н. экспоненциальным дифференцированием.

Проведенные расчеты позволили сделать следующие выводы.

1. Возмущаемые стационарные состояния из рассматриваемой ветви неустойчивы по отношению к длинномасштабным возмущениям, однако потеря устойчивости происходит с возникновением крупных вихрей или прямолинейного относительного движения прежде стационарных структур; качественно этот сценарий отличен от сценария развития неустойчивости, рассмотренного в статье [14], поскольку минимальное рассмотренное в настоящей работе отношение масштабов, равное $1/4$, оказывается еще слишком большим для возможности применения асимптотических разложений, отвечающих инфинитезимальным отношениям масштабов.

2. Можно ожидать, что, когда конвективные движения и магнитное поле могут иметь большие пространственные периоды по горизонтальным направлениям характерные пространственные горизонтальные масштабы структур физических полей увеличиваются, что приводит к увеличению эффективных кинематического и магнитного чисел Рейнольдса, и в целом благоприятно для генерации магнитного поля. К нашему удивлению, эти эвристические соображения оказались неверны: генерация магнитного поля при кратном увеличении горизонтальных пространственных режимов сохраняется только в случае, когда $M_1=1$ или $M_2=1$, т.е. параллелепипеды периодичности имеют вытянутую форму.

Генерирующими оказываются только такие режимы, в которых средняя плотность кинетической энергии не менее 100, т.е. генерация возможна только достаточно быстрыми течениями. (Мы используем маркировку расчетов вида $M_1 \times M_2 \cdot N$, где N - номер расчета для данной периодичности $M_1 \times M_2$; $N=1$ отвечает малому возмущению исходного МГД режима, $N=2$ и 3 - большому возмущению.) Это условие генерации, однако, только необходимое - в расчетах для пространственной периодичности 1×3 наблюдалось финальное затухание магнитного поля несмотря на большую величину средней плотности кинетической энергии. Используя подходы, основанные на оценках характерных пространственных масштабов МГД структур в терминах интегральных оценок первых и высших пространственных производных поля скорости и магнитного поля, мы также оценили эффективное магнитное число Рейнольдса R_m в рассчитанных реализациях динамо. Оно изменяется в диапазоне от 15 до 25. Как оказалось, генерация возможна только при $R_m > 20$, однако это тоже только необходимое для генерации условие.

3. Данные динамические системы имеют квазипериодические по времени гидродинамические аттракторы типа бегущих волн (найденные только в расчетах с пространственной периодичностью 1×3), не генерирующие магнитное поле, или хаотические - как генерирующие (для периодичностей 1×2 , 2×1 , 3×1 , 1×4 , 4×1), так и нет (когда $M_1 > 1$ и $M_2 > 1$). Во всех 6 расчетах для периодичностей 1×2 и 2×1 найден единственный генерирующий аттрактор, характеризующийся сильной перемежаемостью: МГД система находится долгое время в окрестности генерирующего квазипериодического течения, при достижении магнитным полем пороговой величины начинается ярко выраженное хаотическое поведение, приводящее систему в окрестность очень слабо неустойчивого гидродинамического режима, что вызывает экспоненциальное затухание магнитного поля; длительности указанных фаз этого цикла изменяются хаотически. Расчеты для периодичностей 1×4 и 4×1 , по-видимому, также выявляют единый для данной геометрии ячейки периодичности хаотический слабо-генерирующий МГД режим.

4. В работе [16] было найдено, что для всех аттракторов, найденных в рассмотренных там расчетах решений уравнения Навье-Стокса, величины $D_q^v = (A^{1-1/q} \nu^{1/q} \left(\int |\mathbf{v} \times \mathbf{v}|^q \mathbf{d}\mathbf{x} \right)^{1/q}$, где $\alpha_{q,s} = q/(q(s+1)-3)$ и A - объем ячейки периодичности, монотонно убывают с ростом q . Мы проверили, что эта монотонность также имеет место (при рассмотренных величинах $q \leq 10$), несмотря на то, что мы рассматриваем более сложную систему уравнений тепловой конвекции в присутствии магнитного поля. Для величин D_q^b , определенных аналогично для магнитного поля с заменой коэффициента диффузии ν на η ,

подобная монотонность не имеет места. Например, в расчете $4 \times 1.1 D_q^b$ убывают одновременно с q , как и D_q^v , при временах $t \leq 45$, но возрастают с q на интервале $80 \leq t \leq 160$. Кроме того, мы рассмотрели величины $D_{q,s}^v = ((A/v) \langle |(-\nabla^2)^{s/2} \mathbf{v}|^q \rangle^{1/q}$, где угловые скобки означают усреднение по ячейке периодичности. Как оказалось, при рассмотренных $q \leq 10$ величины $D_{q,2}^v$ также монотонно убывают с ростом q , а для определенных аналогично для магнитного поля (с заменой v на η) $D_{q,2}^b$ такой монотонности нет (см. рис. 8(с) и (d)). Монотонность отсутствует и при рассмотрении последовательностей величин $D_{2,s}^v$ и $D_{2,s}^b$, занумерованных индексом s . Результат опубликован в [32, прил.А].

4.7. Разработка алгоритма решения задачи о тепловой конвекции в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси, в присутствии магнитного поля

Проводятся исследования по изучению инверсий геомагнитного поля и поиску предвестников инверсий. Для получения большого числа реализаций инверсий нами было предложено моделировать их в рамках модели конвективного динамо во вращающемся горизонтальном плоском слое жидкости. Такое моделирование мы не можем проводить, используя код, которым мы проводили вычисления в проекте *I*, по следующим причинам:

1. Для сохранения существенных свойств эволюции конвективной МГД системы, определяющей подобие модели реальному геомагнитному динамо, необходимо решать уравнения в частных производных при краевых условиях, соответствующих условиям расплава во внешнем ядре Земли:

- условие прилипания $v=0$ на границах слоя $z=\pm 1$ для поля скорости жидкости (z - вертикальная координата);

- условия наличия диэлектрика над слоем жидкости ("в мантии") и проводника под слоем ("электропроводного внутреннего ядра") для магнитного поля.

Краевые условия, обрабатываемые существующим кодом, другие, что обеспечивает возможность использования существенно менее сложного метода дискретизации неизвестных физических полей, чем в рассматриваемой задаче, приближая их рядами Фурье по всем трем пространственным переменным.

2. Данный слой жидкости моделирует сегмент внешнего ядра Земли, локализованный на определенной широте, поэтому необходимо иметь возможность проводить расчеты при произвольном направлении оси вращения слоя. В существующем коде предусмотрено вращение только относительно вертикальной оси.

3. Как обычно, предполагается, что жидкость несжимаема, т.е. поле скорости соленоидально. Если приняты условия прилипания, то для поля скорости отсюда следует наличие четвертого независимого краевого условия $dv^z/dz=0$ при $z=\pm 1$, где v^z - вертикальная компонента скорости. Это обстоятельство существенно усложняет задачу, т.к. краевых условий для неизвестной функции оказывается больше, чем позволяют "обычные" параболические уравнения в частных производных. (Математического противоречия, однако, тут не возникает, т.к. в уравнениях Навье-Стокса, управляющих течением жидкости, присутствует градиент давления, и "избыточное" краевое условие для поля скорости играет роль неявного краевого условия для давления.)

Разумеется, для решения указанной задачи предложены различные численные схемы. Известно, однако, что они страдают рядом существенных недостатков - например, хорошо известно, что так называемый τ -метод неустойчив, если только интегрирование по времени выполняется с очень мелкими шагами. Эти обстоятельства потребовали разработать математически и вычислительно корректный алгоритм. Мы формулируем задачу в терминах потенциалов полоидальной и тороидальной составляющей скорости жидкости и магнитного поля. Это удобно, т.к.

- 1) эти потенциалы должны удовлетворять разным краевым условиям на границах слоя жидкости, что обеспечивается разложением по разным системам базисных функций,
- 2) это позволяет в полтора раза уменьшить размер использованной оперативной памяти компьютера.

Использовано разложение потенциалов в ряды Фурье по горизонтальным направлениям и по базисным функциям, являющимся линейными комбинациями многочленов Чебышева (включающими от двух до четырех многочленов), которые удовлетворяют необходимым краевым условиям. Например, потенциал T тороидальной компоненты поля скорости течения удовлетворяет на границах слоя $z=\pm 1$ условиям $T=0$, и базисные функции для таких краевых условий имеют вид $T_n^* = T_{n+2} - T_n$ для $n \geq 0$, где $T_n = \cos(n \arccos x)$ - стандартные многочлены Чебышева; потенциал P полоидальной компоненты поля скорости течения удовлетворяет на обеих границах слоя двум условиям $P=dP/dz=0$, и базисные функции для таких краевых условий имеют вид $T_n^{**} = (n+1)(T_{n+4} - T_{n+2}) - (n+3)(T_{n+2} - T_n)$ для $n \geq 0$.

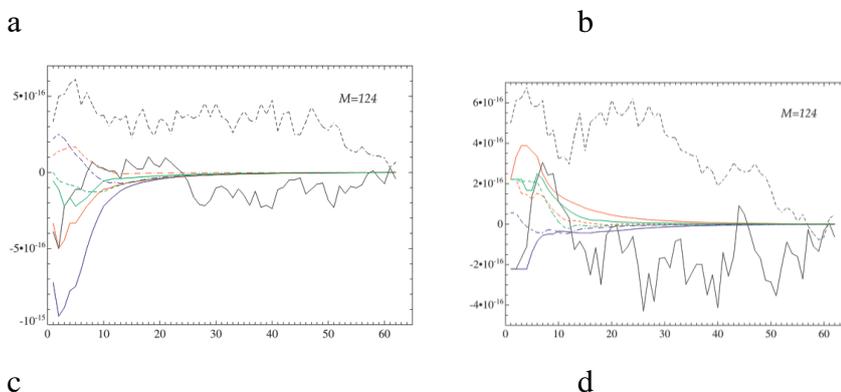
Коэффициенты разложения потенциалов по таким базисным функциям находим из системы обыкновенных дифференциальных уравнений, построенных по методу Галеркина посредством ортогонализации невязки этим же базисным функциям. Этот

подход позволяет минимизировать норму невязки, что способствует устойчивости вычислительного метода.

Однако в рамках этого метода возникает сложность, связанная с тем, что базисные линейные комбинации многочленов Чебышева (в том числе, указанные выше) не ортогональны ни в одном стандартном функциональном пространстве - например, в пространстве Лебега с весом, которое естественно использовать в данном контексте. Производные коэффициентов по времени удовлетворяют системам линейных уравнений, которые надо решать на каждом шагу по времени. Матрицы этих систем ленточные, содержат от 3 до 7 (суб)диагоналей, поэтому для их численного решения применим метод прогонки.

Однако эти системы имеют специальное свойство, состоящее в том, что сумма коэффициентов каждого уравнения, кроме пары первых и пары последних, равна нулю. Для решения таких систем нами предложены специализированные методы. Мы исследовали в методических расчетах их преимущества и недостатки (в части точности вычисленных решений и эффективности, т.е. скорости решения задач) по сравнению с методом прогонки. Так, производные коэффициентов галеркинских приближений потенциалов полоидальных составляющих определяются решением системы с пятидиагональной матрицей. Наш метод позволяет вычислять решения на 5% быстрее (в смысле времени процессора), хотя при этом ошибки решения оказываются несколько выше (см. рис. 32). Учитывая, что метод прогонки является, ввиду его эффективности и устойчивости, бесспорно основным методом решения подобных задач уже 70 лет, ускорение на 5% существенно ускоряет вычисления.

Наши результаты показывают, что ни один из рассмотренных алгоритмов не "идеален". Так, мы сравнивали результаты вычисления решений 10^6 тестовых задач определения коэффициентов линейной комбинации базисных функций T_n^{**} четырьмя



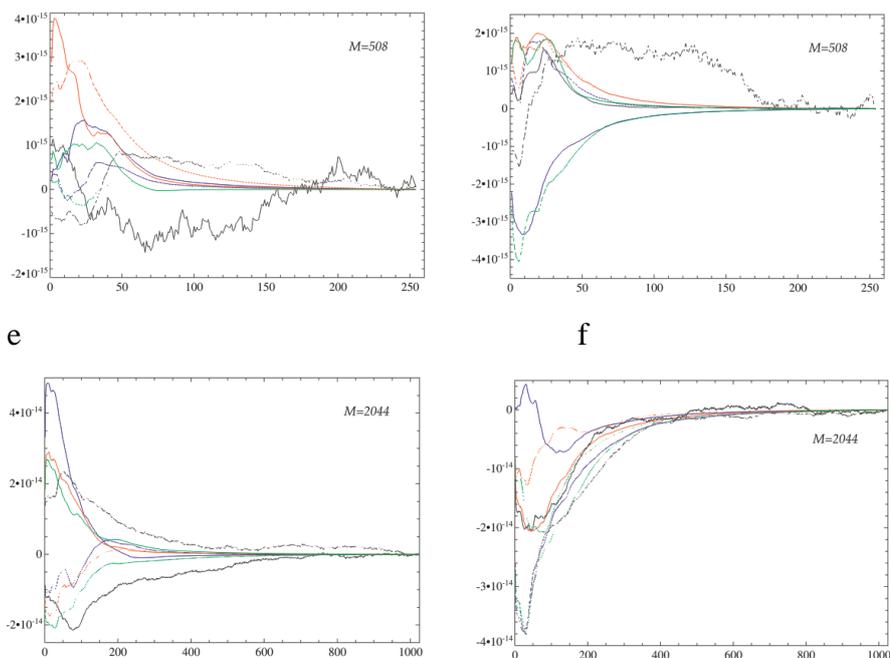


Рисунок 32. Графики погрешностей (вертикальные оси) приближенных решений, вычисленных для 6 тестовых задач определения коэффициентов линейной комбинации базисных функций T_n^{**} алгоритмами прогонки (красный), обратной прогонки (зеленый), разработанного нами специализированного алгоритма (синий) и этого же алгоритма с обращением порядка нумерации уравнений и неизвестных (черный цвет, соответственно) как функции индекса коэффициента n (горизонтальные оси). M - число неизвестных коэффициентов. Сплошная линия: коэффициенты с нечетными индексами, штриховая линия: коэффициенты с четными индексами. Видно, что решения, полученные последним алгоритмом, имеют значительно бóльшие ошибки для средних и высоких индексов n (скажем, для $n > M/6$), чем решения, полученные с помощью любого из трех остальных алгоритмов. Это означает, что указанный алгоритм дает приближенные решения, в которых неизвестные для промежуточных и высоких индексов n имеют большие относительные ошибки, что является неприемлемым свойством этого алгоритма.

алгоритмами: прогонки, обратной прогонки, разработанного нами специализированного алгоритма и этого же алгоритма с обращением порядка нумерации уравнений и неизвестных. Выяснилось, что, например, каждый из алгоритмов давал в некоторых задачах наихудший результат (вектор ошибок имеет максимальную норму). Поэтому выбор алгоритма сводится к компромиссу: наиболее точным (в частности, дающим минимальную среди 4 алгоритмов ошибку) оказывается алгоритм обратной прогонки, а

самым быстрым - наш специализированный алгоритм с прямым порядком нумерации уравнений и неизвестных. Результаты опубликованы в [11, прил.А].

5. Математическое моделирование природных систем

5.1. Классификация и достаточные условия асимптотической устойчивости для некоторого класса гетероклинических сетей в \mathbb{R}^n

Исследованы свойства асимптотической устойчивости так называемых ап-сетей (as-networks). Термин ап-сеть предложен для обозначения структурно-устойчивой гетероклинической сети в \mathbb{R}^n , существующей в эквивариантных (симметричных) системах с группой симметрий, порождаемой симметриями изменения знака одной из пространственных координат. Сеть состоит из стационарных состояний и связующих траекторий. Предполагается, что стационарные состояния расположены на координатных осях и размерности их неустойчивых многообразий не превосходят двух. Такие гетероклинические сети существуют, например, в системах, описывающих динамику популяций или группу связанных осцилляторов.

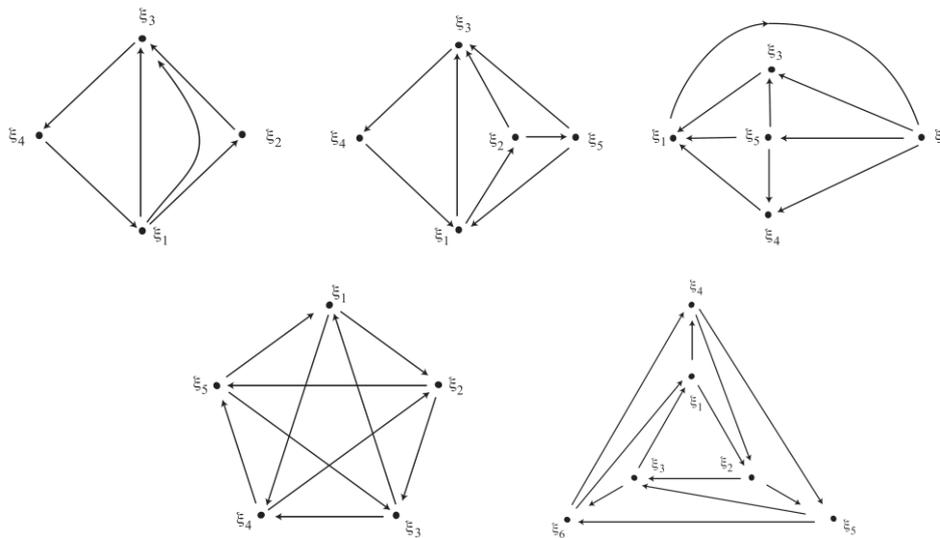


Рисунок 33. Примеры графов, отвечающих ап-сетям.

С гетероклинической сетью можно отождествить ориентированный граф, на котором стационарному состоянию отвечает точка, а связующая траектория показана линией. Доказана теорема, что такой граф принадлежит к одному из двух классов. А именно, либо из M стационарных состояний каждое m -ое соединено с $(m+1)$ -ым и с $m+(M-1)/2$ -ым (где M - нечетное число), либо стационарные состояния ап-сети можно представить в виде набора непересекающихся множеств таких, что траектории соединяют

только стационарные состояния внутри множества, или же из n -го множества с $(n+1)$ -ым. Более того, доказано, что при соответствующей нумерации стационарных состояний внутри множества, возможны траектории только одного из пяти типов. Таким образом, построена классификация ап-сетей.

Для исследования асимптотической устойчивости гетероклинической сети, мы аппроксимируем поведение траекторий вблизи стационарных состояний локальными отображениями, а в окрестности соединяющих траекторий - глобальными. Таким образом, поведение траекторий вблизи гетероклинической сети описывается суперпозициями локальных и глобальных отображений. Рассматривая суперпозиции, отвечающие различным путям по гетероклинической сети, мы получили достаточные условия асимптотической устойчивости гетероклинической сети. Эти условия имеют вид неравенств, зависящих от собственных значений оператора линеаризации, и применимы к более общему классу гетероклинических сетей, чем рассмотренные ап-сети, при выполнении условий теорем. Полученные результаты позволяют строить примеры различных динамических систем, в которых существуют асимптотически устойчивые гетероклинические сети. Отметим, что в литературе было известно только небольшое число частных случаев и один класс (подмножество ап-сетей) гетероклинических сетей, для которых получены необходимые или достаточные условия асимптотической устойчивости.

Рассмотрены пять частных случаев ап-сетей, приведенные на рис. 33. Используя доказанные теоремы, мы получили для них в явном виде достаточные условия асимптотической устойчивости. Результаты исследования опубликованы в [4, 37].

5.2. Исследование эволюции угла наклона оси вращения экзо-Земли в поле притяжения звезды (экзо-Солнца), ближайшего ее спутника (экзо-Луны) и экзо-планет, входящих в планетную систему

Исследована эволюция угла наклона оси вращения экзо-Земли в поле притяжения звезды (экзо-Солнца), ближайшего ее спутника (экзо-Луны) и экзо-планет, входящих в планетную систему, в предположении, что экзо-Земля является динамически симметричным твердым телом, а экзо-планеты двигаются по кеплеровским эллипсам вокруг звезды. В переменных Депри-Андуайе получена функция Гамильтона задачи в рамках спутникового приближения. Проведено осреднение функции Гамильтона по быстрым переменным вращательного и орбитального движений при условии отсутствия резонансов между быстрыми частотами указанных движений. Проведены расчеты размаха

колебаний по углу нутации и возмущенного периода прецессии для частного случая планетной системы, состоящей из звезды и двух планет с симметрично расположенными орбитами, плоскости которых пересекаются под некоторым углом (см. рис.34).

Проведено сравнение с другими работами, где сходные задачи также решены с использованием методов осреднения, и показано, что наш подход является более общим, чем подходы, используемые другими авторами. А именно, в других работах либо рассматривается система, состоящая только из (экзо-) Земли, (экзо-) Луны и (экзо-) Солнца, либо рассматривается некоторый частный случай где временное поведение исследуется численным интегрированием по времени.

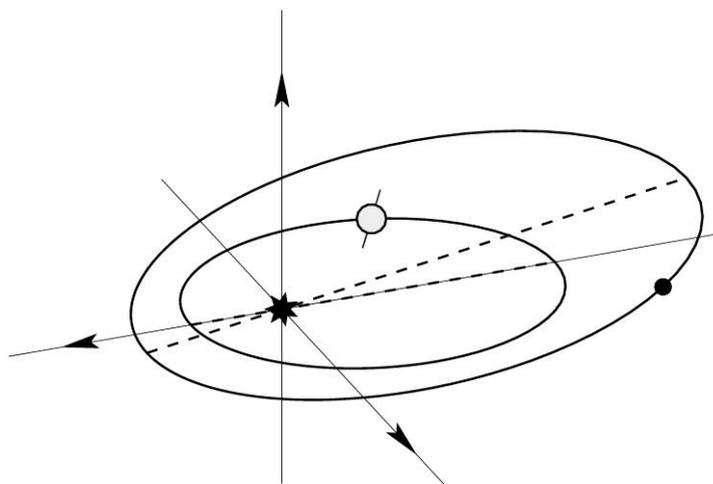


Рисунок 34. Планетная система, состоящая из экзо-звезды и двух экзо-планет.

По результатам исследования опубликованы статьи [6, 70].

5.3. Поведение траекторий вблизи гетероклинической сети, состоящей из двух циклов

Гетероклинический цикл является инвариантным множеством динамической системы, состоящим из конечного числа стационарных состояний (или компактных подмножеств более общего вида), и соединяющих их гетероклинических траекторий. Гетероклиническая сеть - это объединение конечного числа гетероклинических циклов.

Траектория вблизи гетероклинической сети находится долгое время около стационарных состояний, а переходы между состояниями происходят существенно быстрее. Таким образом, траекторию можно охарактеризовать последовательностью стационарных состояний, вблизи которых она проходит.

Эта последовательность может состоять из некоторого периодически повторяющегося набора состояний, например, если траектория притягивается к

гетероклиническому циклу, являющемуся частью сети. В случае, если такой повторяющейся подпоследовательности не существует, траектория называется хаотичной. Поведение траекторий вблизи гетероклинической сети существенно зависит от собственных значений операторов линеаризации в окрестности стационарных состояний. В литературе известно большое количество гетероклинических сетей, для которых хаотическое поведение траекторий связано с существованием комплексных собственных значений операторов линеаризации.

Мы рассмотрели гетероклиническую сеть в пространстве размерности шесть, являющуюся объединением двух гетероклинических циклов, где все собственные значения операторов линеаризации действительны. Предполагается, что динамическая система инвариантна относительно симметрий, меняющих знак одной из шести координат, а стационарные состояния находятся на координатных осях. При таких предположениях рассматриваемая гетероклиническая сеть структурно устойчива.

Получены необходимые и достаточные условия фрагментарной асимптотической устойчивости для каждого из гетероклинических циклов, из которых следует, что они могут быть устойчивы или неустойчивы независимо. Также показано, что гетероклиническая сеть может быть фрагментарно асимптотически устойчива, при условии, что каждый из двух циклов неустойчив.

Численное исследование решений динамической системы, в которой существует рассматриваемая гетероклиническая сеть, указывает на возможность различного поведения траекторий в ее окрестности при изменении параметров динамической системы. Они могут притягиваться к гетероклиническому циклу, могут переходить от одного цикла к другому регулярным образом, совершив некоторое определенное количество оборотов, или же такие переходы носят нерегулярный характер. Таким образом, предложен пример простой гетероклинической сети, вблизи которой возможно хаотическое поведение. Результаты опубликованы в [6].

5.4. О влиянии луны на эволюцию наклона оси вращения планеты в нерезонансном случае

Известно, что величина наклона оси вращения Земли, а также колебания по углу наклона оси оказывают существенное влияние на климат планеты. К примеру, ледниковый период связывают с изменениями в угле нутации Земли, совместное изменение в наклоне оси вращения и в эксцентриситете орбиты Земли оказывают фундаментальное воздействие на глобальный климат планеты. Поэтому исследованию

наклона оси Земли (либо экзо-Земли) и его влиянию на климат планеты посвящены сотни работ западных исследователей. К примеру, известны результаты численного исследования прецессии Земли, изменения ее угла нутации, инсоляции поверхности Земли, в которой отмечается "стабилизирующая" роль Луны (Луна резко уменьшает амплитуду нутационных колебаний Земли, вызванных эволюцией орбиты Земли), а некоторые работы указывают на отсутствие такого стабилизирующего влияния.

Исследовано влияние спутника (экзо-Луны) на эволюцию угла наклона оси вращения планеты (экзо-Земли) в поле притяжения звезды (экзо-Солнца) и экзо-планет, входящих в планетную систему. А именно, численно и аналитически изучается, каким образом изменяется размах колебаний угла нутации экзо-Земли при добавлении экзо-Луны в систему, состоящую из экзо-Солнца, экзо-Земли и экзо-планет. Под размахом колебаний угла нутации мы понимаем разность между его максимальным и минимальным значениями по времени. Мы говорим, что влияние экзо-Луны стабилизирующее, если при добавлении экзо-Луны размах колебаний угла нутации уменьшается, и дестабилизирующим, если размах колебаний увеличивается. Задача рассматривается в общей постановке. Экзо-Земля предполагается твердым, осесимметричным телом, близком к сферическому, а разность между наибольшим и наименьшим главными моментами инерции является малым параметром задачи. Предполагая, что орбиты небесных тел квазипериодические, проведено осреднение функции Гамильтона по быстрым переменным вращательного и орбитального движений при условии отсутствии резонансов между быстрыми частотами указанных движений. Для случая системы, состоящей из экзо-Солнца и экзо-планет, осредненная функция Гамильтона допускает разделение переменных, и, как следствие, система интегрируема, что позволяет вычислить зависимость размаха колебаний угла нутации от его начального значения. Показано, что осредненная функция Гамильтона содержит, помимо классических параметров, параметры D_i , являющиеся функционалами на семействе орбит небесных тел, входящих в планетную систему.

Используя полученные выражения, мы выделили класс систем, для которых можно показать аналитически, что влияние экзо-Луны стабилизирующее, а также, класс для которого влияние экзо-Луны дестабилизирующее. Влияние экзо-Луны на размах колебаний угла нутации экзо-Земли численно исследуется для частного случая системы, состоящей из звезды и двух планет. Рассматривается зависимость изменения размаха колебаний угла нутации экзо-Земли от эксцентриситета и больших полуосей орбит, угла наклона плоскостей орбит, а также начального значения угла нутации.

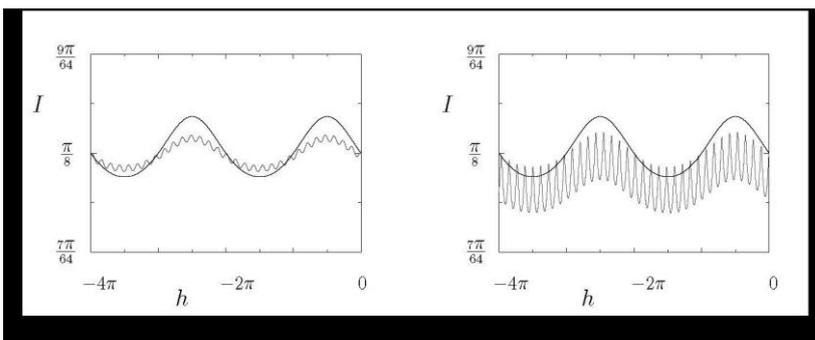


Рисунок 35. Примеры стабилизирующего и дестабилизирующего воздействия экзо-Луну

Примеры стабилизирующего и дестабилизирующего воздействия экзо-Луну приведены на рис. 35, на котором показаны колебания угла нутации экзо-Земли при наличии (серая линия) или в отсутствии (черная) экзо-Луны при некоторых параметрах планетарной системы.

Исследовано влияние гипотетической экзо-Луны на вращение планеты в системе звезды VY Большого Пса, состоящей из звезды и двух плане (см. рис.36). Данные о массах звезды и планет и орбитальные данные планет взяты из каталога <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/6987/7-canis-majoris-b/>, <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7505/7-canis-majoris-c/>. Как показано на рис.37, для реальной планетной системы влияние спутника также может быть как стабилизирующим, так и дестабилизирующим.

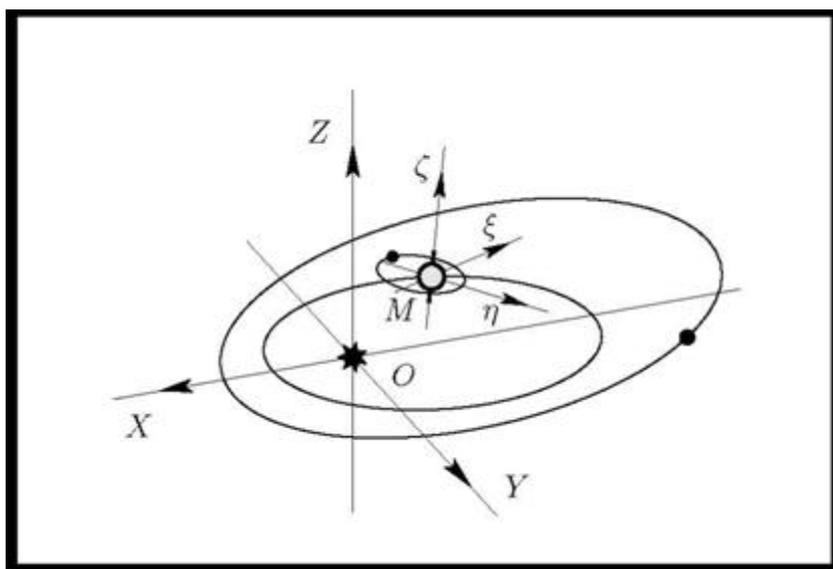


Рисунок 36. Система звезды VY Большого Пса с гипотетической экзо-Луной.

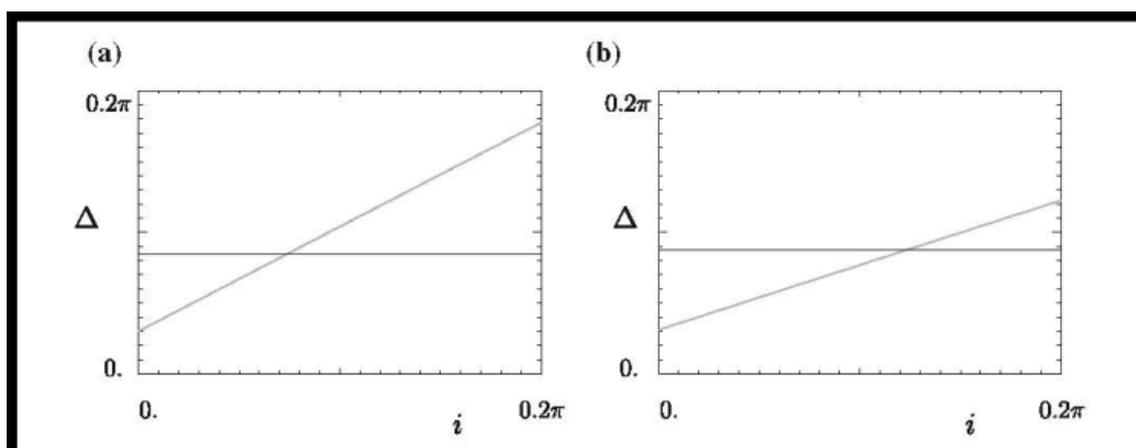


Рисунок 37. Зависимость размаха колебаний угла нутации (вертикальная ось, рисунки (а) и (б) отвечают различным начальным значениям угла) от наклона плоскости орбиты экзоплуны (горизонтальная ось). Черная горизонтальная линия - размах колебаний при отсутствии спутника.

Результат опубликован в [69].

5.5. Существование двумерных гетероклинических связи в обобщенной системе Лотки-Вольтерры

Гетероклинический цикл, являющийся инвариантным множеством динамической системы, состоит из конечного числа стационарных состояний (или компактных подмножеств более общего вида, называемых узлами), и соединяющих их гетероклинических траекторий. Множество траекторий между двумя узлами называется связью. Гетероклиническая сеть - это объединение конечного числа гетероклинических циклов. Таким образом, вопрос о существовании гетероклинического цикла или сети в некоторой системе сводится к вопросу о существовании набора гетероклинических связей.

Система Лотки-Вольтерры была независимо предложена Лоткой для описания динамики химических реакций и Вольтеррой как модель взаимодействия хищник-жертва. В динамике популяций обобщенная модель Лотки-Вольтерры размерности n описывает взаимодействие n видов. Эта система часто используется в различных областях науки, например, физике, биологии или экономике.

Для случая $n=2$ динамика системы изучена полностью. Однако, уже при $n=3$ возможно достаточно сложное поведение, например, переход к хаосу с удвоением

периода. В зависимости от знаков коэффициентов системы, различают несколько частных случаев систем Лотки-Вольтерры: кооперационная, конкурентная, консервативная, диссипативная, для которых были получены результаты общего вида. В частности, было показано, что в кооперационной системе, при выполнении некоторых условий, существует гетероклиническая сеть, состоящая из двумерных гетероклинических связей.

В соответствии со структурой системы, любая координатная плоскость, или пространство большей размерности, натянутое на координатные оси, является инвариантным. Рассматривается ограничение системы на координатное пространство размерности три в предположении, что: на каждой из координатных осей есть стационарное состояние, X_1 , X_2 и X_3 ; эти стационарные состояния устойчивы вдоль направлений, отвечающих соответствующим координатным осям; существуют гетероклинические траектории от X_1 к X_2 и от X_1 к X_3 . Предположения относительно коэффициентов системы отсутствуют, т.е., она не является кооперационной или конкурентной.

Доказано, что при выполнении этих предположений фазовый портрет соответствует одному из показанных на рис.38. А именно, (а) почти все траектории неустойчивого двумерного многообразия X_1 притягиваются к X_2 , следовательно, существует двумерная гетероклиническая связь от X_1 к X_2 ; (б) почти все траектории неустойчивого двумерного многообразия X_1 притягиваются к X_3 , следовательно, существует двумерная гетероклиническая связь от X_1 к X_3 ; (с) существует стационарное состояние X_4 и почти все траектории неустойчивого двумерного многообразия X_1 притягиваются к X_4 , следовательно, существует двумерная гетероклиническая связь от X_1 к X_4 ; (д) все траектории неустойчивого двумерного многообразия X_1 уходят на бесконечность, двумерные гетероклинические связи отсутствуют; (е) существует стационарное состояние X_4 и почти все траектории неустойчивого двумерного многообразия X_1 притягиваются к X_2 или X_3 , следовательно, существуют двумерные гетероклинические связи от X_1 к X_2 и от X_1 к X_3 ; (ф) существуют стационарные состояния X_4 и X_5 , и почти все траектории неустойчивого двумерного многообразия X_1 притягиваются к X_2 или X_3 , следовательно, существуют двумерные гетероклинические связи от X_1 к X_2 и от X_1 к X_3 , также существуют двумерные гетероклинические связи от X_4 к X_2 и X_3 .

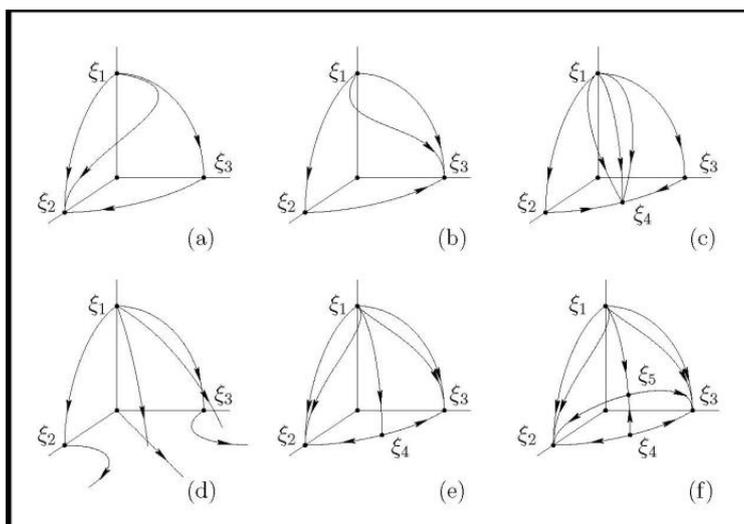


Рисунок 38. Фазовые портреты рассматриваемой трехмерной системы Лотки-Вольтерры.

Полученные результаты могут быть использованы для выявления двумерных гетероклинических связей в некоторой системе Лотки-Вольтерры, а следовательно, для ответа на вопрос о существовании в ней гетероклинических циклов или сетей с такими связями. Также, они позволят построить систему, в которых реализованы цикл или сеть, соответствующую произвольному заданному графу, в котором отсутствуют циклы длины один и два. Результат опубликован в [84].

6. Задачи теории упругости

(1) Впервые построено точное решение задачи об изгибе тонкой упругой плиты прямоугольной формы, у которой два противоположных края свободны, а на третьем известны внутренние силовые факторы: самоуравновешенные изгибающий момент и поперечная сила. Полученное решение описывает сброс остаточных напряжений при изгибе литосферных плит вследствие образования разрыва и физические проявления этого явления: остаточные деформации и перемещения фрагментов плиты как абсолютно жестких. Рассмотрены основные этапы построения точных решений краевых задач изгиба тонких упругих прямоугольных плит. В основе решения лежит теория разложения функций в ряды по собственным функциям Папковича–Фадля, развиваемая авторами. Показано, что сброс сопровождается перемещением концов разрыва на величину w_0 и поворотом на угол φ_0 . Указаны условия, при которых $w_0 = 0$ или $\varphi_0 = 0$, либо $w_0 = \varphi_0 = 0$.

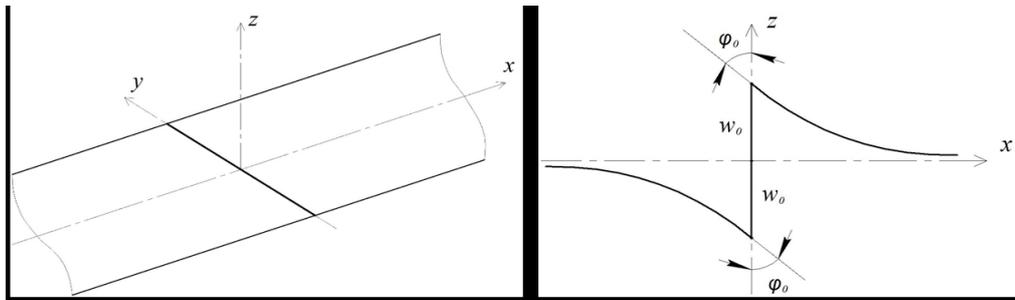


Рисунок 39. Положение плит: слева – до разрыва, а справа – после разрыва и сброса остаточных напряжений.

(2) Разработана математическая теория трещин для конечных областей типа прямоугольника. Построены примеры точных решений. Граничные условия на сторонах прямоугольника могут быть любыми. Полученное решение описывает зарождение и развитие разрывов в земной коре. Сброс остаточных напряжений происходит в результате образования разрыва. Решение представляется в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля. Коэффициенты разложений (коэффициенты Лагранжа) имеют вид простых интегралов Фурье. Окончательные формулы просты и легко могут быть использованы в инженерных приложениях. Результаты представлены в работах [18-20].

(3) Получено точное решение краевой задачи теории упругости для тонкой прямоугольной плиты (прямоугольника), у которой горизонтальные стороны жестко защемлены, а торцы свободны. В центре плиты проведен вертикальный разрез, на котором задан разрыв продольных перемещений. Решение задачи представлено в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых имеют вид простых интегралов Фурье от известной формы профиля разрыва. Сначала решается соответствующая краевая задача для бесконечной защемленной полосы, затем на это решение накладывается решение для прямоугольника, с помощью которого удовлетворяются граничные условия на его торцах. Приведены примеры, в которых рассмотрены разрывы трех типов, отличающиеся гладкостью контура разрыва вблизи его концов. Полученное решение описывает зарождение и развитие разрывов в тонких прямоугольных плитах. Сброс остаточных напряжений происходит в результате образования разрыва. Полученное решение также позволяет по форме разрыва восстановить поля остаточных напряжений, приведших к их образованию. Результаты были представлены на конференциях [48].

(4) Впервые построено точное решение однородной краевой задачи теории упругости для тонкой прямоугольной плиты, горизонтальные стороны которой защемлены, а на двух других заданы нормальные или касательные напряжения.

Рассмотрена только четно-симметричная деформация плиты относительно горизонтальной оси симметрии, а также четно-симметричная и нечетно-симметричная деформации относительно вертикальной оси симметрии (рис. 40 и 41). Все решения представляются в замкнутой форме – в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля. Сформулированы условия, которым должны удовлетворять граничные функции, для того чтобы решение было регулярным. В частности, если нормальные напряжения не самоуравновешены, то решение будет нерегулярным всегда, независимо от гладкости, описывающей эти напряжения функции и ее поведение в окрестности угловых точек области. Нерегулярность решения обусловлена эффектом Гиббса, который характерен и для рядов по собственным функциям Папковича–Фадля из-за равносходимости с тригонометрическими рядами. В полученных точных решениях в угловых точках нет степенной особенности для напряжений, в отличие от соответствующего решения для бесконечного клина, что продемонстрировано на примерах. Причина этого заключается в том, что угловые точки в полуполосе (прямоугольнике) устроены совсем не так, как угловая точка в бесконечном клине. То, что в точных решениях для полуполосы и прямоугольника угловая точка представляет собой бесконечно малый элемент, подобный другим точкам замкнутой области, вытекает из того, что при построении решений нужно указывать, во-первых, как граничные функции продолжаются вдоль торца за его пределы. Во-вторых, необходимо указывать, как решение через торцы продолжается в бесконечную полосу, например, из правой полуполосы в левую. Если оно продолжается с теми же граничными условиями, что и справа, то особенности в напряжениях не будет. Если же продолжение выполняется, например, в свободную полуполосу, то в этом случае будет степенная особенность в напряжениях, как раз та, что возникает в точке смены граничных условий в развернутом бесконечном клине. Полученные решения описывают, в том числе, остаточные напряжения в тонких прямоугольных плитах и те перемещения, которые возникают в результате их сброса, например, в результате образования трещин.

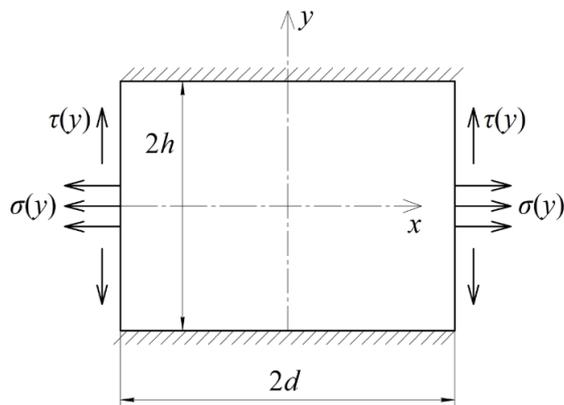


Рис. 40. Четно-симметричная деформация прямоугольной плиты относительно вертикальной оси симметрии.

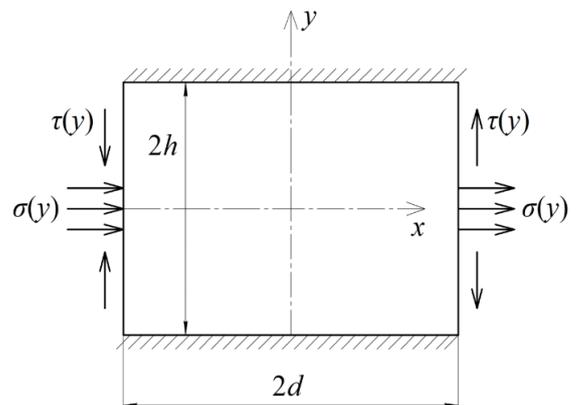


Рис. 41. Нечетно-симметричная деформация прямоугольной плиты относительно вертикальной оси симметрии.

Результаты опубликованы в [21].

(5) Построены точные решения краевых задач теории упругости для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты (полосы) и неограниченной плоскости с центральным разрезом, на котором задан разрыв перемещений. В задаче для полосы рассмотрены три варианта однородных граничных условий на длинных сторонах (рис. 42 и 43): 1) свободные стороны, 2) жестко защемленные стороны, 3) на сторонах плиты имеются одинаковые ребра жесткости. Форма разрыва перемещений (эллипс) выбрана таким образом, что нормальные напряжения на оси разреза становятся постоянными (четно-симметричная деформация). Решения всех задач представляются в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых имеют вид простых интегралов Фурье от известной формы профиля разрыва. Графически проиллюстрировано влияние граничных условий на характер решения в плите. Была рассмотрена упрощенная модель подкрепленной полосы с поперечной трещиной, у которой ребра жесткости работают только на растяжение-сжатие. Для решения задачи для плоскости с разрывом перемещений применяется метод начальных функций в пространстве преобразований Фурье. Рассмотрены четно- и нечетно-симметричная деформации относительно оси трещины. Окончательные решения всех задач представляются в виде несобственных интегралов. Приведены примеры, в которых рассмотрены разрывы трех типов, отличающиеся гладкостью контура разрыва вблизи его концов. Решения получаются быстро, просто и, в отличие от классического решения, без использования теории функций комплексного переменного. Можно показать, что в первом случае, когда гладкость контура разрыва максимальна, что соответствует точке возврата, напряжения конечны при приближении к вершине разреза, во втором случае, когда кончик контура

разрыва острый, напряжения имеют логарифмическую особенность, а в третьем случае, когда вершина контура разрыва имеет характер эллиптической кривой, напряжения имеют степенную особенность. Полученные решения описывают зарождение и развитие разрывов в тонких прямоугольных плитах. Сброс остаточных напряжений происходит в результате образования разрыва. Полученные решения также позволяют по форме разрыва восстановить поля остаточных напряжений, приведших к их образованию.

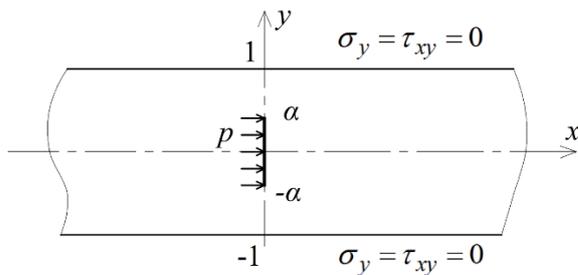


Рис. 42. Свободная плита с центральным разрезом.

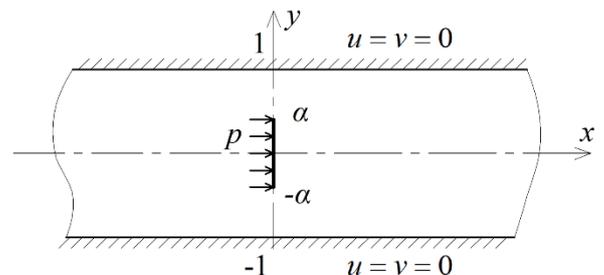


Рис. 43. Защемленная плита с центральным разрезом.

Результаты опубликованы в [17, 49].

(6) Впервые построено точное решение краевой задачи теории упругости для тонкой полубесконечной плиты со смешанными граничными условиями на ее торце. Часть торца нагружена, а на другой части граничные условия соответствуют скользящей заделке (рис. 44). Граничные условия на длинных сторонах отвечают периодическому продолжению решения в полуплоскость, т.е. решение представляется в виде тригонометрических рядов Фурье. На примере этой задачи показана техника решения собственно-смешанных краевых задач теории упругости, когда тип граничных условий меняется на прямолинейном участке границы, а не в угловых точках. Решение основано на использовании сопряженных, в частности, сопряженных тригонометрических, рядов. Оно не сводится (как обычно) к интегральным уравнениям или к бесконечным системам алгебраических уравнений. Окончательные формулы имеют вид двойных рядов по собственным функциям краевой задачи. Аналогично решаются более сложные задачи, например, когда часть торца плиты жестко защемлена, а на другой части действуют нагрузки, когда на торце плиты имеются одномерные упругие накладки, через которые передается нагрузка, и т.д. Метод применим для любых однородных граничных условий на длинных сторонах плиты (свободные стороны, жестко защемленные и т.д.). В общем случае вместо тригонометрических функций в представлении решений будут фигурировать собственные функции Папковича–Фадля. В частности, рассмотрен случай,

когда длинные стороны плиты свободны, а торец жестко зашпелен. Установлено, что в этом случае напряжения не имеют интегрируемой степенной особенности в заделке, как это считается в некоторых работах с приближенными решениями, но в них есть логарифмическая особенность. Полученный результат может быть полезен при численном моделировании НДС литосферных плит в окрестности угловых точек границы, т.к. в действительности нет необходимости использовать конечно-элементные решения, в которые «вшиты» особые конечные элементы со степенной особенностью, поскольку такой особенности фактически нет.

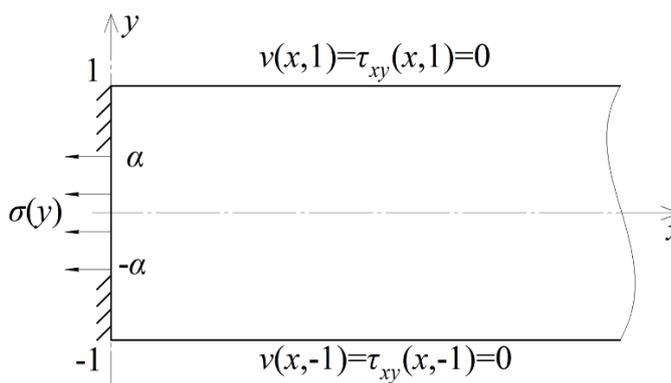


Рисунок 44. Полубесконечная плита со смешанными граничными условиями на ее торце.

Результат представлен на международных конференциях [64].

(7) Впервые построено точное решение неоднородной задачи для достаточно длинной тонкой плиты со свободными противоположными сторонами. Внешняя нагрузка действует внутри плиты в направлении вертикальной оси (четно-симметричная деформация) (рис. 45). Решение неоднородной задачи в плите впервые строится с использованием так называемого соотношения ортогональности Папковича, что быстро приводит к цели. Это решение представляется в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля. Соотношение ортогональности Папковича остается справедливым и для других типов однородных граничных условий, в частности, когда стороны плиты жестко зашпелены. Поэтому рассмотренным методом можно находить простые точные решения для широкого круга неоднородных краевых задач с различными однородными граничными условиями. Эти решения также будут представляться рядами по собственным функциям Папковича–Фадля, соответствующими рассматриваемым однородным граничным условиям. Полученное решение описывает, в том числе, остаточные напряжения в тонких прямоугольных плитах с учетом массовых сил и те перемещения, которые возникают в результате их сброса с образованием разрывов.

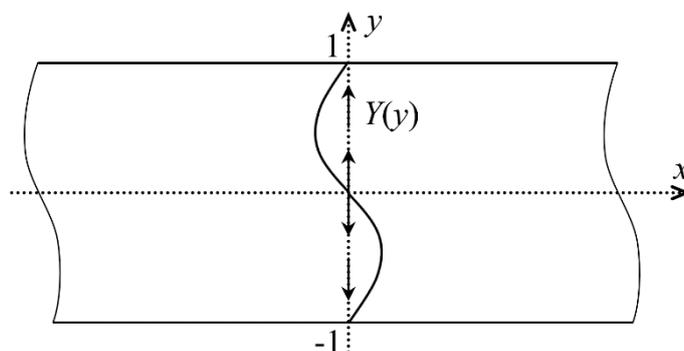


Рисунок 46. Плита со свободными длинными сторонами под действием внешней нагрузки.

По результатам исследования был сделан доклад на международной конференции [50].

(8) Построено точное решение неоднородной задачи для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты со свободными сторонами (четно-симметричная деформация). Вдоль ее вертикальной оси имеется прослойка (ребро жесткости), к которой приложена нагрузка (рис. 47). Прослойка характеризуется жесткостью на растяжение-сжатие EF (E – модуль упругости материала прослойки, F – площадь поперечного сечения прослойки). Метод решения базируется на соотношении ортогональности Папковича и развитой авторами теории разложений по собственным функциям Папковича–Фадля в однородных краевых задачах теории упругости в прямоугольнике (бигармоническая проблема). Вначале строится решение неоднородной задачи для тонкой прямоугольной плиты со свободными длинными сторонами, в которой внешняя нагрузка действует вдоль оси y . Затем из условия равновесия элементарного участка ребра с помощью разложений в ряд Лагранжа по собственным функциям Папковича–Фадля определяются контактные напряжения между ребром жесткости и плитой, которые необходимо подставить в решение неоднородной задачи для плиты. Наконец, к решению неоднородной задачи для длинной плиты с ребром жесткости добавляется соответствующее решение однородной задачи для прямоугольной плиты, с помощью которого удовлетворяются граничные условия на торцах. Таким образом, решения на каждом из трех этапов представляются рядами по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых определяются в явном виде. Благодаря этому удается построить точное решение задачи. Полученное решение описывает, в том числе, остаточные напряжения в тонких прямоугольных плитах с учетом массовых сил и те перемещения, которые возникают в результате их сброса с образованием разрывов. В зависимости от соотношения жесткостей плиты и прослойки связь между сбрасываемыми напряжениями и возникающими при этом деформациями будет различной. Из полученного решения легко

получаются предельные случаи: когда прослойки нет и когда она абсолютно жесткая. Результаты получены впервые и могут быть использованы при анализе напряженно-деформированного состояния горных пород.

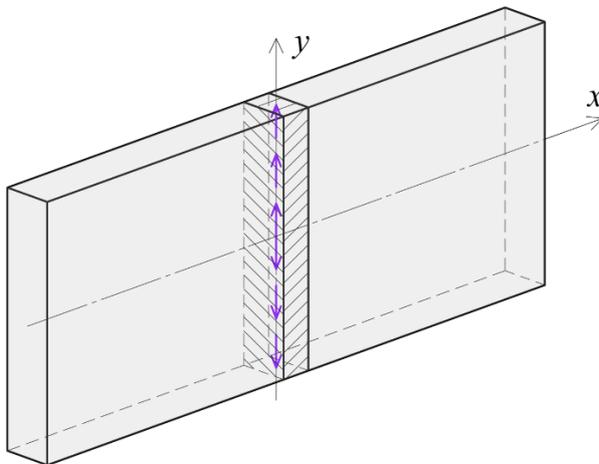


Рисунок. 47. Прямоугольная плита со свободными сторонами и прослойкой, к которой приложена нагрузка.

Результат опубликован в [78, 88].

(9) Получено решение задачи о перераспределении остаточных напряжений в прямоугольной плите со свободными сторонами в результате образования разрыва. Рассматривается плита, в которой имеется четно-симметричное относительно центральных координатных осей (x, y, z) поле остаточных напряжений. Предполагается, что напряженно-деформированное состояние плиты близко к плоской деформации, а изменение граничных условий на сторонах плиты привело к тому, что нормальные и касательные напряжения в плоскостях $(\pm d, y, z)$ стали близкими к нулю, что вызвало образование достаточно длинного разрыва, расположенного в плоскости (O, y, z) (рис. 48). Форма разрыва не зависит от координаты z и может быть любой, например, он может выходить (не выходить) на дневную поверхность плиты, его длина вдоль оси y может быть различной, а сам разрыв может располагаться на большей или меньшей глубине и т.д. Все эти факторы принципиально могут быть учтены в математической модели. Задача решается следующим образом. Вместо плоской деформации рассматривается плоское напряженное состояние, что практически не скажется на точности решения. Берутся две горизонтальные деформированные полуполосы: правая и левая с симметрично искривленными длинными сторонами и торцами, форма которых (т.е. торцов) известна. Левая полуполоса является зеркальным отображением правой. К ним прикладываются некоторые массовые нагрузки такие, что деформированные полуполосы станут

полуполосами с прямолинейными сторонами. Затем полуполосы непрерывно склеиваются по торцам. В результате получается бесконечная полоса с остаточными напряжениями. Далее из полосы с остаточными напряжениями вырезается прямоугольник. К торцам прямоугольника прикладываются напряжения, равные по величине и обратные по знаку тем, что есть в полосе. Наконец, суперпозиция решений для полосы и прямоугольника дает решение для свободного прямоугольника с остаточными напряжениями. Остаточные напряжения (перемещения) представляются в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых имеют вид простых интегралов Фурье от известной формы профиля разрыва. Получены критерии образования разрыва в результате сброса остаточных напряжений. Найденное решение позволяет оценить изменение напряженно-деформированного состояния прямоугольных плит в результате образования разрыва, а также по форме разрыва восстановить поля остаточных напряжений, приведших к его образованию. Результаты получены впервые и могут быть использованы при анализе самонапряженного состояния горных пород.

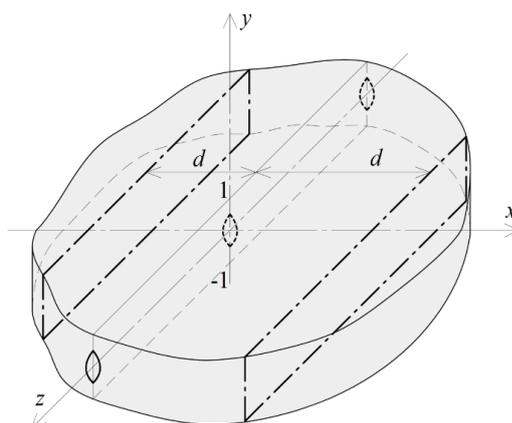


Рисунок 48. Плита, в которой поле остаточных напряжений сбрасывается с образованием разрыва в плоскости (O, y, z) .

Результат опубоикова в [77] По результатам исследования были сделаны доклады на конференциях:

7. Прямые и обратные задачи

В работе [28] установлено, что акустические параметры Солнца могут быть определены по оптическим наблюдениям с солнечных спутников. Более точно, в рамках сферической модели показано, что наблюдения на двух высотах над фотосферой и на двух частотах выше акустической частоты среза однозначно определяют такие акустические параметры Солнца, как скорость звука, плотность и коэффициент поглощения (Рис. 49).

Проведено численное моделирование, которое подтверждает этот теоретический результат.

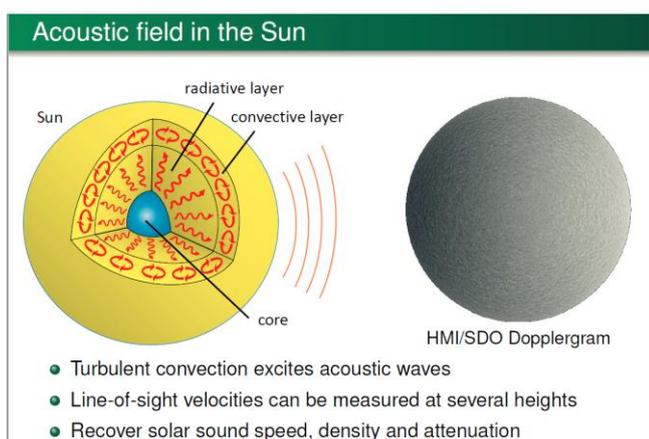


Рисунок 49. Акустическое поле Солнца.

В работах [27, 35, 36] продолжены исследования по обратной задаче рассеяния без фазовой информации. Такие задачи наиболее важны, когда в качестве зондирующего инструмента используются элементарные частицы (например, рентгеновские фотоны).

В работе [34] предложен новый тип сверх-явных асимптотических формул для решения некоторых прямых и обратных задач рассеяния. Этот подход демонстрируется на примере нахождения дальнего рассеянного поля при фиксированных частоте и направлениях по n замерам волнового поля в относительной близости от рассеивающего объекта. Результаты используют, в частности, теорию матриц Вандермонда.

В работе [39] разработан новый метод оценки изменений глобального уровня моря на масштабах в 50-100 лет. Как известно, изменения уровня моря, вычисленные в разных точках пространства существенно неоднородны. Поэтому мы используем медиану локальных по пространству изменений уровня моря для построения их среднего. Предложена процедура корректной обработки тяжелых «хвостов». Использование нашего подхода даёт оценку изменений глобального уровня моря в 1.7-1.9 мм/год за последние 60-70 лет.

В работе [40] установлена близость двух процедур восстановления связи между полярными магнитными полями Солнца, которые представлены солнечными факелами. В основе процедур лежат модели связанных осцилляторов записанные с помощью уравнений Ван дер Поля и Курамото. Показано, что пока полярные магнитные поля Солнца синхронизированы, обе процедуры восстановления согласованы друг с другом.

В работе [62] развиты методы восстановления функции с компактным носителем (или очень быстрым убыванием на бесконечности) по её преобразованию Фурье,

ограниченному на шар фиксированного радиуса. Наши формулы восстановления и оценки устойчивости используют, в частности, теорию полиномов Чебышева. При этом наши результаты являются новыми уже в одномерном случае.

В работе [67] развиваются методы восстановления функции с компактным носителем (например, индекса рефракции) по модулю (абсолютному значению) её преобразованию Фурье и далее по бесфазовым данным рассеяния. Мы используем, в частности, метод опорных рассеивателей (background information). Численная реализация находится в процессе подготовки.

В работе [66] продолжены исследования по восстановлению фазы по бесфазовым данным рассеяния. Такие задачи наиболее важны, когда в качестве зондирующего инструмента используются элементарные частицы (например, рентгеновские фотоны).

В работе [65] получены сверх-явные асимптотические формулы для решения обратной задачи рассеяния в случае замеров при нескольких высоких энергиях. Результаты используют, в частности, теорию матриц Вандермонда.

В работе [61] продолжены исследования по вопросу невидимости (invisibility) в обратных задачах. Более точно, мы изучаем этот вопрос для многоточечных рассеивателей типа Бете-Пайерлса-Ферми-Зельдовича-Березина-Фаддеева.

8. Палеомагнитные исследования

Изучена возможность при помощи обычного трехкомпонентного магнитометра получать информацию о локальной геометрии слоев осадочных пород за счет специальной статистической обработки достаточного большого объема минутных данных. В принципе для электроразведки методом пассивного источника магнитотеллурических токов подобная информация необходима как нулевое приближение для модели среды, далее приближение уточняется за счет обработки магнитовариационных данных в широком диапазоне частот. Создание довольно простого нелинейного фильтра и применение его к рутинному потоку данных от стандартного низкочастотного магнитометра, по-видимому, является новым результатом, позволяющим без высоких затрат извлекать геологическую информацию из рутинных наблюдений за магнитным полем. Полученные результаты представлены в статьях [14-16].

Решалась также следующая практическая задача: в рамках сегодняшних методик размагничивания палеомагнитных образцов изверженных пород исследовать возможность разделения ошибок ориентации образца при полевых работах и неизбежных ошибок при физическом процессе реконструкции вектора древнего магнитного поля,

запечатленного в образце. Теоретический подход к задаче, разработанный ранее, позволяет оценить конус неопределенности ошибки реконструкции, при некоторых предположениях на ошибку ориентации ее можно частично скомпенсировать, если иметь несколько образцов одного возраста из одного лавового потока. Теоретические результаты до публикации нуждаются в проверке на значительном числе реальных палеомагнитных данных, причем речь идет о тех лабораторных характеристиках образцов вулканических пород, которые ранее вообще не было принято публиковать. Проверка будет проведена на основе большой коллекции образцов, собранных в ИФЗ РАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Предложен подход к решению проблемы оценки сейсмоопасности внутриплитовых территорий, являющейся одной из актуальных задач современной сейсмологии. Подход основан на морфоструктурном районировании и использовании методов распознавания образов. Сейсмоопасные морфоструктурные узлы, в которых возможны землетрясения с $M \geq 5.0$, определены в пределах северо-восточного Египта – внутриплитового региона, который включает также Синайский полуостров. Результаты позволили существенно уточнить оценку сейсмической опасности северо-восточного Египта, в частности, для ответственных инженерных сооружений (туннель Исмаилия) и объектов культурного наследия, расположенных в долине Нила. Морфоструктурное районирование ряда внутриплитовых областей показало, что МСР изначально разработанное для выявления высокосейсмичных мест в тектонически подвижных областях, применимо для идентификации потенциально сейсмичных мест во внутриплитовых регионах, характеризующихся меньшим уровнем тектонических деформаций.

Морфоструктурное районирование горной системы Эллинид и Болгарского региона позволило установить связь сильных землетрясений в этих регионах с морфоструктурными узлами, что позволило распознать потенциально сейсмоопасные узлы в этих областях. На основе морфоструктурного районирования литосферного блока Корсика-Сардиния, традиционно считающегося практически асейсмичным, проведена оценка сейсмического потенциала этого региона с использованием критериев сейсмичности для $M5+$, полученных ранее в других близких по тектонической структуре регионах Средиземноморья. В результате выявлены потенциальные морфоструктурные узлы, в которых могут происходить землетрясения с $M5+$.

На основе данных морфоструктурного районирования Греции предложен подход для определения локальных цунамигенных источников. Этот подход может быть применен для проведения цунамирайонирования в цунамиопасных областях.

На примере горно-складчатых сооружений Кавказа и Алтай-Саянского региона показана приуроченность крупных месторождений металлов к морфоструктурным узлам. Показана возможность выявления потенциально рудоносных узлов методами распознавания образов.

Полученные результаты моделирования блоковой динамики и сейсмичности Закавказья. Индо-Бирманской дуги и Алтайско-Саянского региона вносят вклад в разработку оценок сейсмоопасности в этих областях. Так моделирование блоковой динамики Индо-Бирманской дуги, маркирующую границу Индийской и Бирманской плит, показало, что эта граница, представленная меганадвигом, находится в состоянии сцепления и может генерировать сильнейшие землетрясения с магнитудой более 8, с длительным периодом повторения, превышающим тысячу лет. Это важно учитывать при оценке сейсмоопасности столь густонаселенного региона.

Проведены анализ и обобщение современных представлений о геологии и геодинамике Кавказа, включая его палеозойско-палеогеновую и постколлизийную эволюцию до современных деформаций, магматизм и тепловой поток, активную тектонику и тектонические напряжения. Сформулированы нерешенные проблемы геодинамики Кавказа и предложены пути их решения.

Решена задача численного моделирования сферической мантийной конвекции на основе данных сейсмической томографии, позволившая определить структуру мантийных течений в современной Земле.

На основе статистического анализа сейсмологических данных изучена сейсмическая реакция литосферы Земли на долговременную периодическую гравитационную нагрузку.

Проведены расчеты вертикальных и горизонтальных напряжений для модели термохимической мантийной конвекции с фазовыми переходами и плавающими континентами. Изучены разные стадии суперконтинентального цикла с точки зрения изменения напряжений в мантии и в континентах. Показано, что время жизни суперконтинента зависит от его размера.

Построены геодинамические модели для расчета напряжений в мантии и суперконтиненте в процессе суперконтинентального цикла для двумерной декартовой модели мантии. Предложен сейсмогенно-триггерный механизм активизации эмиссии метана на Арктическом шельфе и рассмотрено его влияние на климат.

В исследовании подвижности разломов острова Сахалин по данным спутниковой геодезии смоделировано распределение сцепления на контакте плит, согласующееся с наблюдаемыми скоростями смещения пунктов на земной поверхности. Показано, что результаты моделирования могут быть полезны для оценки сейсмогенного потенциала отдельных сегментов подвижных разломов острова.

В исследованиях по магнитогидродинамике получены новые результаты по проблемам генерации магнитного поля тепловой конвекцией в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси, блоховских возмущений трехмерных пространственно-периодических стационарных магнитогидродинамических (МГД) состояний. Разработан алгоритм решения задачи о тепловой конвекции в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси, в присутствии магнитного поля. Алгоритм позволяет значительно быстрее вычислять такие решения по сравнению с другими подобными методами. Изучены пространственная аналитичность и глобальные априорные оценки соболевских норм решений системы уравнений диффузионной магнитогидродинамики и их производных по времен; Блоховские возмущения трехмерных пространственно-периодических стационарных МГД состояний; генерация магнитного поля тепловой конвекцией в горизонтальном плоском слое электропроводной жидкости, вращающейся относительно вертикальной оси. Полученные результаты предполагают, что в природных гидромагнитных динамо присутствует непрерывная шкала масштабов, слабо разделенных между собой, турбулентное течение данного пространственного масштаба генерирует магнитное поле несколько (но незначительно) большего масштаба, и поля разных масштабов, составляющих эту шкалу, нелинейно взаимодействуют между собой. Тем самым, классические понятия α -эффекта и вихревой (турбулентной) диффузии, основанные на гипотезе существенного разделения пространственных масштабов, по-видимому, требуют определенной ревизии.

Исследована эволюция угла наклона оси вращения экзо-Земли в поле притяжения звезды (экзо-Солнца), ближайшего ее спутника (экзо-Луны) и экзо-планет, входящих в планетную систему, в предположении, что экзо-Земля является динамически симметричным твердым телом, а экзо-планеты движутся по кеплеровским эллипсам вокруг звезды. Проведены расчеты размаха колебаний по углу нутации и возмущенного периода прецессии для частного случая планетной системы, состоящей из звезды и двух планет с симметрично расположенными орбитами, плоскости которых пересекаются под некоторым углом. Получены новые теоретические результаты по влиянию луны на эволюцию оси вращения планеты. Аналитически показано, что влияние экзо-Луны может быть как стабилизирующим, так и дестабилизирующим. Приведены примеры простых систем, в которых при добавлении спутника размах колебаний изменяется желаемым образом. Для более сложных систем численно изучена зависимость изменения размаха

колебаний угла нутации экзо-Земли от эксцентриситета и больших полуосей орбит, угла наклона плоскостей орбит, а также начального значения угла нутации.

Доказано существование двумерных гетероклинических связей в обобщенной системе Лотки-Вольтерры. Эти результаты могут быть использованы для выявления двумерных гетероклинических связей в некоторой системе Лотки-Вольтерры, а следовательно, для ответа на вопрос о существовании в ней гетероклинических циклов или сетей с такими связями.

Разработан новый метод оценки изменений глобального уровня моря на масштабах в 50-100 лет. Использование этого подхода даёт оценку изменений глобального уровня моря в 1.7-1.9 мм/год за последние 60-70 лет.

Установлено, что акустические параметры Солнца могут быть определены по оптическим наблюдениям с солнечных спутников. В рамках сферической модели показано, что наблюдения на двух высотах над фотосферой и на двух частотах выше акустической частоты среза однозначно определяют такие акустические параметры Солнца, как скорость звука, плотность и коэффициент поглощения

Впервые построено точное решение задачи об изгибе тонкой упругой плиты прямоугольной формы, у которой два противоположных края свободны, а на третьем известны внутренние силовые факторы: самоуравновешенный изгибающий момент и поперечная сила. Полученное решение описывает сброс остаточных напряжений при изгибе литосферных плит вследствие образования разрыва и физические проявления этого явления: остаточные деформации и перемещения фрагментов плиты как абсолютно жестких.

Решены новые задачи теории упругости. В частности, впервые построено точное решение краевой задачи теории упругости для тонкой полубесконечной плиты со смешанными граничными условиями на ее торце. Также впервые построено точное решение неоднородной задачи для достаточно длинной тонкой плиты со свободными противоположными сторонами.

Предложены новые подходы к решению прямых и обратных задач, открывающие возможность применения этих подходов к решению геофизических задач.

Исследована возможность при помощи обычного трехкомпонентного магнитометра получать информацию о локальной геометрии слоев осадочных пород за счет специальной статистической обработки достаточного большого объема минутных данных. Подобная информация необходима для электроразведки методом пассивного источника магнитотеллурических токов как нулевое приближение для модели среды.

Создание довольно простого нелинейного фильтра и применение его к рутинному потоку данных от стандартного низкочастотного магнитометра является новым результатом, позволяющим без высоких затрат извлекать геологическую информацию из рутинных наблюдений за магнитным полем.

По результатам исследований в 2019-2023 гг. опубликовано 75 статей в рецензируемых журналах, а также сделано 78 докладов на международных и российских научных конференциях. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации баз данных и 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Andrievsky A., Chertovskih R., Zheligovsky V. Pointwise vanishing velocity helicity of a flow does not preclude magnetic field generation. *Phys. Rev. E*, 99, 2019, 033204, arxiv.org/abs/1811.00859.
2. Gama S.M.A., Chertovskih R., Zheligovsky V. Computation of kinematic and magnetic α -effect and eddy diffusivity tensors by Padé approximation. *Fluids*, 4, 2019, 110, arxiv.org/abs/1906.01423, <https://www.mdpi.com/2311-5521/4/2/110>.
3. Andrievsky A., Chertovskih R., Zheligovsky V. Negative magnetic eddy diffusivity due to oscillogenic α -effect. *Physica D*, 399, 2019, 58-72, arxiv.org/abs/1711.02390.
4. Podvigina O., Castro S.B.S., Labouriau I.S. Stability of a heteroclinic network and its cycles: a case study from Boussinesq convection. *Dynamical systems*, 34, 2019, 157-193.
5. Podvigina O., Lohse A. Simple heteroclinic networks in \mathbb{R}^4 . *Nonlinearity*, 32, 2019, 3269-3293.
6. Podvigina O., Krasilnikov P.S. Evolution of the obliquity of an exoplanet: A non-resonant case. *Icarus*, 335, 2020, 113371, [<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.07.005>].
7. Трубицын В.П. Проблемы глобальной геодинамики//Физику Земли. - 2019. - №1. -С. 108-198.
8. Bobrov, A., M., Baranov A., A. Thermochemical Mantle Convection with Drifting Deformable Continents: Main Features of Supercontinent Cycle. *Pure and Applied Geophysics*, 2019. Vol.176, No.8. P.3545–3565.
9. Vorovieva, I., Ismail-Zadeh, A., and Gorshkov, A. 2019. Nonlinear dynamics of crustal blocks and faults and earthquake occurrences in the Transcaucasian region, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 297, 106320.
10. Gorshkov A., Hassan H., Novikova O. 2019. Seismogenic nodes ($M \geq 5.0$) in north-east of Egypt and implication for seismic hazard assessment. *Pure Appl. Geophys.* 176(2): 593–610 <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2012-9>
11. Gorshkov A., Novikova O., Livinsky A. (2019) Recognition of ore-bearing nodes in the Altai-Sayan region. Proceedings of the V International Conference «Information Technologies in Earth Sciences and Applications for Geology, Mining and Economy ITES&MP-2019. Moscow 14-18 October 2019. - Moscow: VNIIGeosystem, 2019. P.39.
12. Ливинский А.И., Новикова О.В., Горшков А.И. (2019). Определение характерных геолого-геофизических признаков мест локализации крупных месторождений металлов в Алтае-Саянском регионе с помощью алгоритмов распознавания образов. // Современные методы оценки сейсмической опасности и

прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2019.С.60-61.

13. Усенко С.В., Прохорова Т.В. Структура и развитие Восточно-Гренландской континентальной окраины и до начала спрединга на хребте Колбейнсей // Вулканология и сейсмология, 2020 (принято в печать)

14. Shcherbakov V. P., Khokhlov A. V., Sycheva and N. K. Analysis of the hypothesis of a giant gaussian process as a means for describing secular variations of the geomagnetic field vector. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55(1):182–194, January 2019.

15. Щербаков В.П., Хохлов А.В., Сычева Н.К. Анализ гипотезы большого Гауссова процесса как способа описания вековых вариаций вектора геомагнитного поля // Физика Земли. - 2019. - №1.-С.214-228. doi:10.31857/S0002-333720191214-228.

16. Khokhlov, A., R. Krasnoperov, B. Nikolov, J. Nikolova, M. Dobrovolsky, V. Petrov, D. Kudin, and I. Belov, On the directions and structure of the short-term magnetic variations. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2019, **19**, 2: Article ES2002, doi:10.2205/2019ES000656.

17. Kovalenko M.D., Abruks D.A., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. Exact solutions of boundary value problems in the theory of plate bending in a half-strip: basics of the theory. *Z. Angew. Math. Phys.* **70**, 98 (2019). DOI: 10.1007/s00033-019-1139-6.

18. Yu G., Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. Two problems for a strip with a transverse crack: Exact solutions. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1215, 012037 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1215/1/012037.

19. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. On some properties of exact solutions in the form of series in Papkovitch–Fadle eigenfunctions. *AIP Conference Proceedings* 2116, 380008 (2019). DOI: 10.1063/1.5114389.

20. Guangming Yu, Yingnian Yu, Daning Wang, Irina V. Menshova and Xiankun Zeng. Risk Analysis and Treatment on Seepage and Breaking of Tailings Dam. *International Journal of Engineering and Technology* 11(4), 224–229 (2019). DOI: 10.7763/IJET.2019.V11.1151.

21. Guangming Yu, Daning Wang, Xiankun Zeng, Mikhail D. Kovalenko, Irina V. Menshova, Alexander P. Kerzhaev, Chunguang Wang, Yuezheng Yang and Chunsheng Wang (2020) Failure Forecast Warning Research and In-Situ Online Monitoring of Tailings Dam Engineering. In: Correia A., Tinoco J., Cortez P., Lamas L. (eds) *Information Technology in Geo-Engineering. ICITG 2019. Springer Series in Geomechanics and Geoenvironmental Engineering*. Springer, Cham. pp 96–105. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_8

22. Горшков А.И., Новикова О.В., Гаудемер И. Потенциальные места сильных ($M \geq 7.0$) землетрясений в Эллинидах (Греция) // Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 53—61, doi:10.1134/S0002333720010032. (Перевод на английский язык – Gorshkov, A.I., O.V. Novikova, and I. Gaudemer, Strong ($M \geq 7.0$) earthquake-prone areas in Hellenides, Greece. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, 56, 1: 45-52, doi:10.1134/S1069351320010036)
23. Баранов А. А., Бобров А. М., Чуваев А.В. Влияние реологии мантии на поле скоростей течений и динамическую топографию поверхности для трехмерной сферической модели Земли. ПЯТАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “К СТОЛЕТИЮ М.В. ГЗОВСКОГО”. 5-9 ОКТЯБРЯ 2020 (<https://ifz.ru/novosti/videotranslyaczii-pyatoj-tektonofizicheskoj-konferenczii-v-ifz-ran-k-stoletiyu-mv-gzovskogo>)
24. Бирючева Е.О., Трубицын В.П., Деформации и напряжения в океанических плитах. ПЯТАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “К СТОЛЕТИЮ М.В. ГЗОВСКОГО”. 5-9 ОКТЯБРЯ 2020 (<https://ifz.ru/novosti/videotranslyaczii-pyatoj-tektonofizicheskoj-konferenczii-v-ifz-ran-k-stoletiyu-mv-gzovskogo>)
25. Желиговский В.А., Подвигина О.М. Численный алгоритм интегрирования по времени задач идеальной магнитогидродинамики, опирающийся на аналитичность их решений. Физика Земли №2, 2020, 148-160
26. Желиговский В.А., Чертовских Р.А. О кинематической генерации магнитных мод блоховского типа. Физика Земли №1, 2020, 118-132.
27. Agaltsov A.D., Novikov R.G., Error estimates for phaseless inverse scattering in the Born approximation at high energies, *Journal of Geometric Analysis* 30(3), 2340-2360 (2020)
28. Agaltsov A.D., Hohage T., Novikov R.G. (2020). Global uniqueness in a passive inverse problem of helioseismology, *Inverse Problems* 36(5), 055004 (21pp)
29. Grinevich P.G., Novikov R.G., Creation and annihilation of point-potentials using Moutard-type transform in spectral variable, *Journal of Mathematical Physics* 61(9), 093501 (2020)
30. Ismail-Zadeh, A., Adamia, S., Chabukiani, A., Chelidze, T., Cloetingh, S., Floyd, M., Gorshkov, A., Gvishiani, A., Ismail-Zadeh, T., Kaban, M. K., Kadirov, F., Karapetyan, J., Kengerli, T., Kiria, J., Koulakov, I., Mosar, J., Mumladze, T., Müller, B., Sadradze, N., Safarov, R., Schilling, F., and Soloviev, A. (2020). Geodynamics, seismicity and seismic hazards of the Caucasus, *Earth Sci. Rev.*, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
31. Kuiper, N. H. (1960). Tests concerning random points on a circle, *Proc. of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Series A, Vol. 63*, 38–47.

32. Kolmogorov, A. (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione, *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari* 4, 83–91(in Italian).
33. Kossobokov, V. G., and G. F. Panza (2020). A Myth of Preferred Days of Strong Earthquakes? *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–8, doi: 10.1785/0220190157.
34. Novikov R.G., Multipoint formulas for scattered far field in multidimensions. 2020. *Inverse Problems* 36(9) 095001
35. Novikov R.G., Sivkin V.N., Error estimates for phase recovering from phaseless scattering data, *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications* 8(1), 44-61 (2020)
36. Novikov R.G., Multipoint formulas for phase recovering from phaseless scattering data, *Journal of Geometric Analysis*, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12220-019-00329-6>
37. Podvigina O., Castro S.B.S., Labouriau I.S. Asymptotic stability of robust heteroclinic networks. *Nonlinearity*, 33, 2020, 1757-1788.
38. Petrescu, L., Borleanu, F., Radulian, M., Ismail-Zadeh, A., and Matenco, L. Tectonic regimes and stress patterns in the Vrancea Seismic Zone: insights into intermediate-depth seismic nests in locked collisional settings, *Tectonophysics*, 2020.
39. Shapoval A., Le Mouel J.-L., Courtillot V., Shnirman M., Influence of Very Large Spatial Heterogeneity on Estimates of Sea-Level Trends, *Applied Mathematics and Computation*, 2020, V. 386, 125485, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125485>
40. Savostianov A., Shapoval A., Shnirman M., Dynamics of Phase Synchronization between Solar Polar Magnetic Fields Assessed with Van Der Pol and Kuramoto Models, *Entropy*, 2020, V. 22, 945, <https://doi.org/10.3390/e22090945>
41. Smirnov, N. (1948). Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions, *Ann. Math. Stat.* 19, 279–281, doi: 10.1214/aoms/1177730256.
42. Горшков А.И., Новикова О.В., Димитрова С., Димова Л., Райкова Р. (2021a) Сейсмоопасные (М6+) узлы Болгарского региона. Тезисы докладов II всероссийской конференции с международным участием «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ» Москва, 29-30 сентября, 2021. С. 38-39. Издательство: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (Москва)
43. Горшков А. И., Ливинский А.И., Новикова О. В. Положение крупномасштабных рудных месторождений в линеаментно-блоковой структуре Алтае-

Саянского региона. Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы. Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана, Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. Иркутск: ИГУ, 2021б. С. 144-145.

44. Желиговский В.А., Чертовских Р.А. О кинематической генерации магнитных мод блоховского типа. Физика Земли № 1, 118-132, 2020.

45. Желиговский В.А. Пространственная аналитичность и глобальные априорные оценки соболевских норм решений системы уравнений диффузионной магнитогидродинамики и их производных по времени. Тезисы докладов и программа Всероссийской научной конференции с международным участием "Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений", Москва 29-30 сентября 2021.

46. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Определение потенциально рудоносных узлов методом распознавания образов. Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях» Том II. 2021а. С. 325.

47. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Распознавание рудоносных узлов на Кавказе. Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче. Сборник тезисов докладов II Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. 2021б. С. 86.

48. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Точное решение для частично защемленного прямоугольника с трещиной // IX Поляховские чтения: Материалы международной научной конференции по механике, 9-12 марта 2021г., Санкт-Петербург, Россия. СПб.: Издательство ВВМ, 2021. С. 320–322.

49. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П., Шуляковская Т.Д. Точное и балочное решения для узкого защемленного прямоугольника // Актуальные проблемы механики сплошной среды: Материалы VII международной конференции, 4-8 октября 2021 г., Цахкадзор, Армения. Ер.: «Гитутюн» НАН РА, 2021. С. 135–139.

50. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П., Yu G. Примеры точных решений краевых задач теории упругости для усеченного клина // Актуальные проблемы механики сплошной среды: Материалы VII международной конференции, 4-8 октября 2021 г., Цахкадзор, Армения. Ер.: «Гитутюн» НАН РА, 2021. С.130–134.

51. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Определение потенциально рудоносных узлов методом распознавания образов. Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях» Том II. 2021а. С. 325.

52. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Распознавание рудоносных узлов на Кавказе. Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче. Сборник тезисов докладов II Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. 2021б. С. 86.
53. Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В., Гатинский Ю.Г., Вишневская Н.А. База данных и металлогеническая карта крупных и суперкрупных месторождений мира: принципы составления и предварительный анализ результатов // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С.391-422.
54. Р.А. Чертовских, В.А. Желиговский. О разделении масштабов в задаче о кинематической генерации магнитного поля. Тезисы докладов и программа Всероссийской научной конференции с международным участием "Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений", Москва 29-30 сентября 2021 г.
55. Chertovskih R., Zheligovsky V. (2015) Large-scale weakly nonlinear perturbations of convective magnetic dynamos in a rotating layer. *Physica D*, 313, 99-116.
56. Chertovskih R., Gama S.M.A., Podvigina O., Zheligovsky V. (2010) Dependence of magnetic field generation by thermal convection on the rotation rate, *Physica D* 239, 1188-1209, 2010.
57. Donzis D.A., Gibbon J.D., Gupta A., Kerr R.M., Pandit R., Vincenzi D. (2013) Vorticity moments in four numerical simulations of the 3D Navier-Stokes equations. *J. Fluid Mech.*, 732, 316-331.
58. Gorshkov A., Novikova O., Dimitrova S., Dimova L., Raykova R. Identifying the Possible Locations of Earthquakes M6+ in the Bulgarian Region // Conference Proceedings, 11th Congress of the Balkan Geophysical Society. Oct 2021. V. 2021. P. 1 – 5. Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers DOI:10.3997/2214-4609.202149BGS65.
59. Foias C., Guillopé C., Temam R. New a priori estimates for Navier-Stokes equations in dimension 3 // *Comm. Partial Diff. Equations*, 1981, 6, 329-359.
60. Gorshkov, A., Panza, G.F., Soloviev, A. et al. On the seismic potential of the Corsica–Sardinia block. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 32, 715–728 (2021). DOI:10.1007/s12210-021-01014-z.
61. Grinevich P.G., Novikov R.G. Transmission eigenvalues for multipoint scatterers // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2021. V. 9. № 4, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03326122v1>.

62. Isaev M.I., Novikov R.G. Stability estimates for reconstruction from the Fourier transform on the ball // *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*. 2021. V. 29. № 3. P. 421-433. DOI:10.1515/jiip-2020-0106.
63. Kontar Y.Y., Ismail-Zadeh A., Berkman P.A., Duda P.I., Gluckman S.P., Kelman I., Murray V. 2021. Knowledge exchange through science diplomacy to assist disaster risk reduction. *Progress in Disaster Science*, 11, Article no: 100188. DOI:10.1016/j.pdisas.2021.100188
64. 23. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. An exact solution for a partially clamped rectangle with a crack // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1959. № 1. Article 012031. DOI:10.1088/1742-6596/1959/1/012031
65. Novikov R.G. Multipoint formulas for phase recovering from phaseless scattering data // *Journal of Geometric Analysis*. 2021. V. 31. № 2. P. 1965-1991. DOI:10.1007/s12220-019-00329-6
66. Novikov R.G. Multipoint formulae for inverse scattering at high energies // *Russian Mathematical Surveys*. 2021. V. 76. № 4. P. 723–725. DOI:10.1070/RM9994 [Новиков Р.Г. Многоточечные формулы для обратного рассеяния при высоких энергиях // *Успехи математических наук*. 2021. Т. 76. № 4 (460). С. 177-178. DOI:10.4213/rm9994]
67. Novikov R.G., Sivkin V.N. Phaseless inverse scattering with background information // *Inverse Problems*. 2021. V. 37. № 5. Article 055011 (20pp). DOI:10.1088/1361-6420/abf36c
68. Petrescu, L., Borleanu, F., Radulian, M., Ismail-Zadeh, A., and Matenco, L. Tectonic regimes and stress patterns in the Vrancea Seismic Zone: insights into intermediate-depth earthquake nests in locked collisional settings, *Tectonophysics*, 799, 228688, 2021. DOI:10.1016/j.tecto.2020.228688
69. Podvigina O. Behaviour of trajectories near a two-cycle heteroclinic network arXiv:2107.09982 (подано в SIAM Journal on Applied Dynamical Systems)
70. Podvigina O.M. and P.S. Krasilnikov Impact of a moon on the evolution of a planet's rotation axis: a non-resonant case. arXiv:2101.03429
71. Soloviev A.A., Gorshkov A.I. Modeling the Seismicity of the Altai–Sayan–Baikal Region // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 501, № 2. P. 1070–1074. DOI:10.1134/S1028334X21120138 [Соловьев А.А., Горшков А.И. Моделирование сейсмичности региона Алтай–Саяны–Прибайкалье // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 2021, Т. 501, № 2, стр. 204-209]

72. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P., Evseev M.N., Evseev A.N. (2021) The Processes of Heat and Mass Transfer in the Earth's Mantle. In: Svalova V. (eds) Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-63571-8_1
73. Zheligovsky V. Space analyticity and bounds for derivatives of solutions to the evolutionary equations of diffusive magnetohydrodynamics. *Mathematics*, 2021, 9, 1789 [arxiv.org/abs/2108.02746, DOI:10.3390/math9151789]
74. Vorobieva I, Gorshkov A, & Mandal P. Modelling the seismic potential of the Indo-Burman megathrust. *Scientific Reports* 11, 2021, Article 21200. DOI:10.1038/s41598-021-00586-y
75. Аникеева И. А., Андреев В. К., Вдовин В. С., Стеблов Г. М.. Методы геодезического обеспечения комплекса высокоточного широкозонного функционального дополнения системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ-КФД) // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2023. Т. 10. № 4. С. 67–71. <https://elibrary.ru/swyhdo>
76. Гридчина М.С., Стеблов Г.М., Владимирова И.С., Басманов А.В.. Исследование зоны сочленения литосферных плит в пределах о. Сахалин по данным спутниковой геодезии // *Геофизические исследования*. 2023.Т. 24. № 4. С.81-96. DOI: 10.21455/gr2023.4-5
77. Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Меньшова И.В., Карнет Ю.Н. Точные решения неоднородных краевых задач теории упругости в прямоугольнике // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. 2023. Т. 514. С. 64–69. <https://elibrary.ru/htmbly>
78. Кержаев А.П., Меньшова И.В., Никитин А.В. Неоднородная задача для полосы с разными граничными условиями // *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2023. № 2 (56). С. 65–75. (ВАК, РИНЦ). <https://elibrary.ru/sjazcy>
79. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Алексеев Д.А. Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике и разрушения ледников в Антарктике // *Вестник РАН*. 2023. Т. 93. № 6. С. 526-538. <https://elibrary.ru/qvpjvy>
80. Стеблов Г.М., Агибалов А.О., Белобородов Д.Е., Зайцев В.А., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Сенцов А.А., Фадеева К.В. Анализ современных деформаций

северо-западного Кавказа и Предкавказья по данным ГНСС // Физика Земли. 2023. № 4. С. 65-74. DOI: 10.31857/S0002333723040117 <https://elibrary.ru/tmkuhm>

81. 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 <https://elibrary.ru/htmbzlz>

82. Gorshkov A.I., Novikova O. (2023) 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 DOI:10.48303/jsee.2023.2010510.1071

83. Lobkovsky, L.I.; Baranov, A.A.; Ramazanov, M.M.; Vladimirova, I.S.; Gabsatarov, Y.V.; Alekseev, D.A, Semiletov, I (2023) Large earthquakes in subduction zones around the Polar Regions as a possible reason for rapid climate warming in the Arctic and glacier's collapse in West Antarctica. Geosciences, 13, (6), 171. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060171>

84. Podvigina O. Two-dimensional heteroclinic connections in the generalized Lotka–Volterra system. *Dynamical Systems*, Volume 38, 2023, 163-178. DOI: 10.1080/14689367.2022.2162371

85. Podvigina O. Behaviour of trajectories near a two-cycle heteroclinic network. *Dynamical Systems*, Volume 38, 2023, 576–596. DOI: 10.1080/14689367.2023.2225463

86. Steblov G.M., Vladimirova I.S.. Geodetic Inversions and Applications in Geodynamics / Applications of Data Assimilation and Inverse Problems in the Earth Sciences. P. 278-292. (Eds. A. Ismail-Zade, F. Castelli, D. Jones, S. Sanchez). United Kingdom: Cambridge University Press. 2023. 356 p.

87. Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Эволюция полей тектонофизических напряжений и динамической топографии в процессе суперконтинентального цикла // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2023. Материалы LIV Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2023. С. 24-28.

88. 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, 2023.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР ««НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОДИНАМИКИ, РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ»»

2023 год

Статьи

1. Анিকেева И. А., Андреев В. К., Вдовин В. С., Стеблов Г. М. Методы геодезического обеспечения комплекса высокоточного широкозонного функционального дополнения системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ-КФД) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2023. Т. 10. № 4. С. 67–71. <https://elibrary.ru/swyhdo>
2. Гридчина М.С., Стеблов Г.М., Владимирова И.С., Басманов А.В.. Исследование зоны сочленения литосферных плит в пределах о. Сахалин по данным спутниковой геодезии // Геофизические исследования. 2023.Т. 24. № 4. С.81-96. DOI: 10.21455/gr2023.4-5
3. Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Меньшова И.В., Карнет Ю.Н. Точные решения неоднородных краевых задач теории упругости в прямоугольнике // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2023. Т. 514. С. 64–69. <https://elibrary.ru/htmbly>
4. Кержаев А.П., Меньшова И.В., Никитин А.В. Неоднородная задача для полосы с разными граничными условиями // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2023. № 2 (56). С. 65–75. (ВАК, РИНЦ). <https://elibrary.ru/sjazey>
5. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Алексеев Д.А. Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике и разрушения ледников в Антарктике //Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 6. С. 526-538. <https://elibrary.ru/qvpjvy>
6. Стеблов Г.М., Агибалов А.О., Белобородов Д.Е., Зайцев В.А., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Сенцов А.А., Фадеева К.В. Анализ современных деформаций северо-западного Кавказа и Предкавказья по данным ГНСС // Физика Земли. 2023. № 4. С. 65-74. DOI: 10.31857/S0002333723040117 <https://elibrary.ru/tmkuhm>
7. 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 <https://elibrary.ru/htmbly>

8. Gorshkov A.I., Novikova O. (2023) 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 DOI:10.48303/jsee.2023.2010510.1071

9. Lobkovsky, L.I.; Baranov, A.A.; Ramazanov, M.M.; Vladimirova, I.S.; Gabsatarov, Y.V.; Alekseev, D.A, Semiletov, I (2023) Large earthquakes in subduction zones around the Polar Regions as a possible reason for rapid climate warming in the Arctic and glacier's collapse in West Antarctica. Geosciences, 13, (6), 171. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060171>

10. Podvigina O. Two-dimensional heteroclinic connections in the generalized Lotka–Volterra system. Dynamical Systems, Volume 38, 2023, 163–178. DOI: 10.1080/14689367.2022.2162371

11. Podvigina O. Behaviour of trajectories near a two-cycle heteroclinic network. Dynamical Systems, Volume 38, 2023, 576–596. DOI: 10.1080/14689367.2023.2225463

12. Steblou G.M., Vladimirova I.S.. Geodetic Inversions and Applications in Geodynamics / Applications of Data Assimilation and Inverse Problems in the Earth Sciences. P. 278-292. (Eds. A. Ismail-Zade, F. Castelli, D. Jones, S. Sanchez). United Kingdom: Cambridge University Press. 2023. 356 p.

Статьи в сборниках

13. Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Эволюция полей тектонофизических напряжений и динамической топографии в процессе суперконтинентального цикла // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2023. Материалы LIV Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2023. С. 24-28.

14. 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, 2023.

15. Кержаев А.П., Меньшова И.В. Перераспределение остаточных напряжений в результате образования разрыва // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти корр. РАН, д.м.н. Александра Анатольевича Соловьева. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2023. С. 106-110. <https://elibrary.ru/yifqlh>

16. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Распознавание потенциальных мест локализации рудных месторождений в горно-складчатых областях

России на основе геолого-геофизических данных // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти корр. РАН, д.м.н. Александра Анатольевича Соловьева. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2023. С. 141-144. <https://elibrary.ru/qdkfav>

17. Подольская Е. С., Некрасова А. К., Прохорова Т. В., Трубенков А. В., Селюцкая О. В., Горшков А. И., Новикова О. В., Кособоков В. Г. Развитие веб-ГИС-проектов ИТПЗ РАН в 2021-2023 гг. // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти корр. РАН, д.м.н. Александра Анатольевича Соловьева. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2023. С. 196-199. <https://elibrary.ru/enqqfq>

18. Семка М.А., Горшков А.И. Геолого-геофизические особенности мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса и Яванского желоба // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти корр. РАН, д.м.н. Александра Анатольевича Соловьева. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2023. С. 236-240. <https://elibrary.ru/qohyua>

19. Ливинский А. И. Горшков А. И., Новикова О. В. Определение характерных признаков мест локализации крупных рудных месторождений в горно-складчатых областях России // Науки о Земле. Современное состояние : материалы VI Всерос. молодежной науч.-практ.школы-конф. Геологический полигон «Шира», Республика Хакасия, Россия. 30 июля — 5 августа 2023 г. / Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2023. С.195-197.

Доклады

20. Гридчина М.С. Исследование зоны сочленения литосферных плит в пределах о. Сахалин по данным спутниковой геодезии. Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 25-26 октября 2023 г., Москва, ИТПЗ РАН.

21. Кержаев А.П., Меньшова И.В. Перераспределение остаточных напряжений в результате образования разрыва. III Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 25-26 октября 2023 г., Москва, Россия.

22. Kovalenko M.D., Kerzhaev A.P., Menshova I.V., Shulyakovskaya T.D. An exact solution to the inhomogeneous problem for an elastic strip with mixed boundary conditions. In: 15th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'23), June 21-26, 2023; Albena, Bulgaria. <http://2023.eac4amitans.eu/resources/amitansabsbook.pdf>

23. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П., Шуляковская Т.Д. Трещина в бесконечной упругой свободной полосе. Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики», 5-8 декабря 2023 г., Москва, Россия

24. Ливинский А. И. Горшков А. И., Новикова О. В. (2023). ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ПРИЗНАКОВ МЕСТ ЛОКАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЯХ РОССИИ. Наука о Земле. Современное состояние : материалы VI Всерос. молодежной науч.-практ. школы-конф. Геологический полигон «Шира», Республика Хакасия, Россия. 30 июля — 5 августа 2023 г. / Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, С.195-197.

25. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. (2023) Распознавание потенциальных мест локализации рудных месторождений в горно-складчатых областях России на основе геолого-геофизических данных // Материалы III Всероссийской конференции с международным участием "СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ" 25-26 октября 2023 года ИТПЗ РАН, Москва

26. Мельник Г.Э. Исследование стабильности платформенных областей на территории Северной Евразии. Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 25-26 октября 2023 г., Москва, ИТПЗ РАН.

27. Подольская Е. С., Некрасова А. К., Прохорова Т. В., Трубенков А. В., Селюцкая О. В., Горшков А. И., Новикова О. В., Кособоков В. Г. Развитие веб-ГИС-проектов ИТПЗ РАН в 2021-2023 гг. III Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 25-26 октября 2023 г., Москва, ИТПЗ РАН.

28. Семка М.А., Горшков А.И. (2023) Геолого-геофизические особенности мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса и Яванского желоба // Материалы III Всероссийской конференции с международным участием "СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ" 25-26 октября 2023 года, ИТПЗ РАН, Москва

29. Толмачев Д.С. Численное моделирование нелинейного конвективного магнитного динамо во вращающемся плоском слое электропроводной жидкости. Шестая Всероссийская конференция молодых учёных-механиков, посвященная 100-летию со дня рождения академика Г.Г. Черного. 4-14 сентября 2023, пансионат МГУ "Буревестник", г. Сочи.

30. Хасаева Т.Т. Исследование влияния магниторотационной неустойчивости на генерацию галактических магнитных полей. Шестая Всероссийская конференция молодых учёных-механиков, посвященная 100-летию со дня рождения академика Г.Г. Черного. 4-14 сентября 2023, пансионат МГУ "Буревестник", г. Сочи.

РИДы

31. Подольская Е. С., Горшков А. И., Новикова О. В., Трубенков А. В. База геоданных линеаментов и сейсмогенных узлов Центрального Французского Массива и Иберии (Юго-западная Европа) для ГИС. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. № 2023623873. 2023.

32. Подольская Е. С., Горшков А. И., Новикова О. В., Трубенков А. В. База геоданных линеаментов и сейсмогенных узлов Болгарии и Греции (Юго-восточная Европа) для ГИС. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. № 2023624052. 2023.

2022 год

Публикации в российских и международных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus, РИНЦ.

33. Podvigina O.M., Krasilnikov P.S. Impact of a moon on the evolution of a planet's rotation axis: a non-resonant case // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2022. V. 134. Article 21. DOI:10.1007/s10569-022-10077-5.

34. Kovalenko M.D, Menshova I.V, Kerzhaev A.P, Yu G. Exact solutions of the theory of elasticity for a clamped rectangle // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2022. V. 27. № 12. P. 2551-2566. DOI:10.1177/10812865221075360. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. A temperature problem for a square: An exact solution // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2022. V. 27. № 2. P. 250-261. DOI:10.1177/10812865211020496.

35. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. A strip with constant stresses on the cut: exact solutions // *ZAMM Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2022. V. 102. № 10. Article e202100431. DOI:10.1002/zamm.202100431.

Кержаев А.П., Меньшова И.В., Никитин А.В., Самсонов А.М. Метод начальных функций и интегральное преобразование Фурье в задаче для плоскости с разрывами

перемещений // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2022. № 1 (51). С. 96-109. DOI:10.37972/chgpru.2022.51.1.009.

36. Bobrov A., Baranov A., Tenzer R. Evolution of stress fields during the supercontinent cycle // *Geodesy and Geodynamics*. 2022. V. 13. № 4. P. 363-375. DOI:10.1016/j.geog.2022.01.004.

37. Gorshkov A., Hassan H.M., Mandal P., Novikova O. Identifying Potential Earthquake Sources in Continental Environments // *Surveys in Geophysics*. 2022. V. 43. № 2. P. 529-559. DOI:10.1007/s10712-021-09683-z.

38. Novikova O.V., Gorshkov A.I. Local tsunamigenic sources in Greece, identified by pattern recognition // *Natural Hazards*. 2022. V. 113. № 2. P. 1335-1348. DOI:10.1007/s11069-022-05349-0.

39. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Semiletov I.P., Alekseev D.A. Trigger Mechanisms of Gas Hydrate Decomposition, Methane Emissions, and Glacier Breakups in Polar Regions as a Result of Tectonic Wave Deformation // *Geosciences*. 2022. V. 12. № 10. Article 372. DOI:10.3390/geosciences12100372.

40. Короткий А.И., Цепелев И.А., Исмаил-Заде А.Т. Ассимиляция данных о свободной поверхности потока жидкости для нахождения ее вязкости // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2022. Т. 28. № 2. С. 143-157. DOI:10.21538/0134-4889-2022-28-2-143-157.

41. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G., Zeng X. A mixed boundary value problem of the theory of elasticity for a half-strip // *AIP Conference Proceedings*. 2022. V. 2522. Article 060008. DOI:10.1063/5.0100767.

42. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Shulyakovskaya T.D. Exact and beam solutions for a narrow clamped rectangle // *Journal of Physics*. 2022. V. 231. Article 012027. DOI:10.1088/1742-6596/2231/1/012027.

43. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. Examples of exact solutions to boundary value problems of the theory of elasticity for a truncated wedge // *Journal of Physics*, 2022. V. 2231. Article 012011. DOI:10.1088/1742-6596/2231/1/012011.

44. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. Expansions in Papkovitch–Fadle eigen functions in the polar coordinate system // *AIP Conference Proceedings*. 2022. V. 2522. Article 060007. DOI:10.1063/5.0100780.

45. Gorshkov A., Soloviev A. Morphostructural zoning for identifying earthquake-prone areas // Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather Than Cure / G. Panza, V.G. Kossobokov, E. Laor, B. DeVivo (Eds.). (1st ed., pp. 637). Elsevier, 2022. Chapter 7. P. 135-149. DOI:10.1016/B978-0-12-823503-4.00009-9.

46. Soloviev A. Modeling the block-and-fault structure dynamics with application to studying seismicity and geodynamics // Earthquakes and Sustainable Infrastructure: Neodeterministic (NDSHA) Approach Guarantees Prevention Rather Than Cure / G. Panza, V.G. Kossobokov, E. Laor, B. DeVivo (Eds.). (1st ed., pp. 637). Elsevier, 2022. Chapter 6. P. 113-133. DOI:10.1016/B978-0-12-823503-4.00004-X.

Материалы конференций

47. Podolskaia E., Nekrasova A., Prokhorova T., Trubenkov A., Selyutskaya O. Web-gis projects at the Institute of Earthquake prediction theory and mathematical geophysics, Russian Academy of Sciences (IEPT RAS) // e-Proceedings of 8th Conference on Cartography and GIS. V. 2. Sofia: Bulgarian Cartographic Association, 2022. P. 237-243. ISSN: 1314-0604.

48. Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В. Разложения по функциям Папковича–Фадля в задаче для полуполосы с защемленным торцом // Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2022), 4–13 сентября 2022 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2022. С. 194-196.

49. Власов Д.А., Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В. Неоднородная задача для упругой полосы и ее обобщения // Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2022), 4–13 сентября 2022 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2022. С. 179-181.

50. Qimeng Shi, Pengfei Song, Zhiwen Tan, Qiong Qiu, Hao Liu, Bin Peng, Alexander P. Kerzhaev, Guangming Yu, Ze Chen, Mikhail D. Kovalenko, Gang Li, Binghong Shi, Irina V. Menshova. GA-BP neural network prediction model for tunneling speed of shield machine with composite formation dual mode (TBM-EPB) // CIUP '22: Proceedings of the 2022 International Conference on Computational Infrastructure and Urban Planning, June 2022, pp. 1–4. DOI:10.1145/3546632.3546633 <https://doi.org/10.1145/3546632.3546633>.

51. Gorshkov A., Vorobieva I., Mandal P., Novikova O. Potential earthquake locations in India determined by pattern recognition and seismicity modeling. India - Russia Scientific Webinar on “Seismology: Monitoring and Forecasting”, 30 June, 2022.

52. Dimitrova S., Vorobieva I., Gorshkov A., Dimova L., Raykova R. (2022) Modeling of seismicity on the territory of Bulgaria // XXII International Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association (CBGA), Plovdiv, Bulgaria, 7–11 September 2022, Abstracts. P. 178.

53. Dimova L., Gorshkov A., Novikova O., Dimitrova S., Raykova R. Seismogenic nodes in the Bulgarian territory, defined by pattern recognition // EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022. EGU22-11461. DOI:10.5194/egusphere-egu22-11461 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11461>.

54. Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Глубочайшие впадины на суше — новые данные и возможный механизм их образования // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022. Материалы LIII Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2022. С. 40-43. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48036803>.

55. Милюков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н., Горбатиков А.В., Ларьков А.С., Стеблов Г.М. Современная геодинамика Кавказа по ГНСС наблюдениям // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. С. 58.

56. Сидельникова И.А., Стеблов Г.М., Саяпина А.А. Перспективы развития Северо-Кавказского регионального геодинамического полигона // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. С. 82.

2021 год

Публикации в российских и международных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus, РИНЦ.

57. Gorshkov A., Novikova O., Dimitrova S., Dimova L., Raykova R. Identifying the Possible Locations of Earthquakes M6+ in the Bulgarian Region // Conference Proceedings, 11th Congress of the Balkan Geophysical Society. Oct 2021. V. 2021. P. 1 – 5. Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers. DOI:10.3997/2214-4609.202149BGS65.

58. Gorshkov, A., Panza, G.F., Soloviev, A. et al. On the seismic potential of the Corsica–Sardinia block. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 32, 715–728 (2021). DOI:10.1007/s12210-021-01014-z.

59. Grinevich P.G., Novikov R.G. Transmission eigenvalues for multipoint scatterers // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2021. V. 9. № 4. P. 17-25. DOI:10.32523/2306-6172-2021-9-4-17-25.
60. Isaev M.I., Novikov R.G. Stability estimates for reconstruction from the Fourier transform on the ball // Journal of Inverse and Ill-posed Problems. 2021. V. 29. № 3. P. 421-433. DOI:10.1515/jiip-2020-0106
61. Kontar Y.Y., Ismail-Zadeh A., Berkman P.A., Duda P.I., Gluckman S.P., Kelman I., Murray V. 2021. Knowledge exchange through science diplomacy to assist disaster risk reduction. Progress in Disaster Science, 11, Article no: 100188. DOI:10.1016/j.pdisas.2021.100188
62. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. An exact solution for a partially clamped rectangle with a crack // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1959. № 1. Article 012031. DOI:10.1088/1742-6596/1959/1/012031
63. Ismail-Zadeh A., Kumar A. Deterministic, Probabilistic, and Data-enhanced Models of Seismic Hazard Assessments with some Applications to Central Asian Regions // Journal of the Geological Society of India. 2021. V. 97. № 12. P. 1508-1513. DOI:10.1007/s12594-021-1906-9.
64. Novikov R.G. Multipoint formulae for inverse scattering at high energies // Russian Mathematical Surveys. 2021. V. 76. № 4. P. 723–725. DOI:10.1070/RM9994 [Новиков Р.Г. Многоточечные формулы для обратного рассеяния при высоких энергиях // Успехи математических наук. 2021. Т. 76. № 4 (460). С. 177-178. DOI:10.4213/rm9994].
65. Novikov R.G., Sivkin V.N. Phaseless inverse scattering with background information // Inverse Problems. 2021. V. 37. № 5. Article 055011 (20pp). DOI:10.1088/1361-6420/abf36c.
66. Petrescu, L., Borleanu, F., Radulian, M., Ismail-Zadeh, A., and Matenco, L. Tectonic regimes and stress patterns in the Vrancea Seismic Zone: insights into intermediate-depth earthquake nests in locked collisional settings, Tectonophysics, 799, 228688, 2021. DOI:10.1016/j.tecto.2020.228688.
67. Soloviev A.A., Gorshkov A.I. Modeling the Seismicity of the Altai–Sayan–Baikal Region // Doklady Earth Sciences. 2021. V. 501, № 2. P. 1070–1074. DOI:10.1134/S1028334X21120138. [Соловьев А.А., Горшков А.И. Моделирование сейсмичности региона Алтай–Саяны–Прибайкалье // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2021, Т. 501, № 2, стр. 204-209].

68. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P., Evseev M.N., Evseev A.N. (2021) The Processes of Heat and Mass Transfer in the Earth's Mantle. In: Svalova V. (eds) Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-63571-8_1.

69. Zheligovsky V. Space analyticity and bounds for derivatives of solutions to the evolutionary equations of diffusive magnetohydrodynamics. Mathematics, 2021, 9, 1789 [arxiv.org/abs/2108.02746, DOI:10.3390/math9151789].

70. Vorobieva I, Gorshkov A, Mandal P. Modelling the seismic potential of the Indo-Burman megathrust. Scientific Reports 11, 2021, Article 21200. DOI:10.1038/s41598-021-00586-y.

Материалы конференций

71. Горшков А.И., Новикова О.В., Димитровва С., Димова Л., Райкова Р. СЕЙСМООПАСНЫЕ (M6+) УЗЛЫ БОЛГАРСКОГО РЕГИОНА // Тезисы докладов и программа II Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», Москва, 29-30 сентября 2021 г. Москва. ИТПЗ РАН, 2021. С.38-39.

72. Горшков А. И., Ливинский А.И., Новикова О. В. Положение крупномасштабных рудных месторождений в линеаментно-блоковой структуре Алтае-Саянского региона. Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы. Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана, Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. Иркутск: ИГУ, 2021б. С. 144-145.

73. Желиговский В.А. Пространственная аналитичность и глобальные априорные оценки соболевских норм решений системы уравнений диффузионной магнитогидродинамики и их производных по времени // Тезисы докладов и программа II Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», Москва, 29-30 сентября 2021 г. Москва. ИТПЗ РАН, 2021. С.45-46.

74. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П., Шуляковская Т.Д. Точное и балочное решения для узкого защемленного прямоугольника // Актуальные проблемы механики сплошной среды: Материалы VII международной конференции, 4-8 октября 2021 г., Цахкадзор, Армения. Ер.: «Гитутюн» НАН РА, 2021. С. 135–139

75. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Примеры точных решений краевых задач теории упругости для усеченного клина // Актуальные проблемы механики

сплошной среды: Материалы VII международной конференции, 4-8 октября 2021 г., Цахкадзор, Армения. Ер.: «Гитутюн» НАН РА, 2021. С.130–134

76. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Определение потенциально рудоносных узлов методом распознавания образов. Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях» Том II. 2021а. С. 325

77. Ливинский А.И., Горшков А.И., Новикова О.В. Распознавание рудоносных узлов на Кавказе. Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче. Сборник тезисов докладов II Молодежной научно-образовательной конференции ЦНИГРИ. 2021б. С. 86

78. Чертовских Р.А., Желиговский В.А. О разделении масштабов в задаче о кинематической генерации магнитного поля // Тезисы докладов и программа II Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», Москва, 29-30 сентября 2021 г. Москва. ИТПЗ РАН, 2021. С.107-108.

79. Alexander Gorshkov, Olga Novikova, Sonia Dimitrova, Aleksander Soloviev, Maxim Semka, Dragomir Dragomirov, Milen Tsekov, Lyuba Dimova, Reneta Raykova (2021). Evaluation of the seismogenic (M6+) nodes for the territory of Bulgaria and adjacent areas REVIEW OF THE BULGARIAN GEOLOGICAL SOCIETY, vol. 82, part 3, 2021, p. 174–176 <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2021.82.3.174>

2020 год

Публикации в российских и международных журналах, индексируемых в WebofScience, Scopus, РИНЦ:

80. Горшков А.И., Новикова О.В., Гаудемер И. Потенциальные места сильных ($M \geq 7.0$) землетрясений в Эллинидах (Греция) // Физика Земли.— 2020.— № 1.— С. 53—61, doi:10.1134/S0002333720010032. (Перевод на английский язык – Gorshkov, A.I., O.V. Novikova, and I. Gaudemer, Strong ($M \geq 7.0$) earthquake-prone areas in Hellenides, Greece. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, 56, 1: 45-52, doi:10.1134/S1069351320010036)

81. Желиговский В.А., Подвигина О.М. Численный алгоритм интегрирования по времени задач идеальной магнитогидродинамики, опирающийся на аналитичность их решений. Физика Земли №2, 2020, 148-160

82. Желиговский В.А., Чертовских Р.А. О кинематической генерации магнитных мод блоховского типа. Физика Земли №1, 2020, 118-132.

83. Agaltsov A.D., Novikov R.G., Error estimates for phaseless inverse scattering in the Born approximation at high energies, *Journal of Geometric Analysis* 30(3), 2340-2360 (2020)
84. Agaltsov A.D., Hohage T., Novikov R.G. (2020). Global uniqueness in a passive inverse problem of helioseismology, *Inverse Problems* 36(5), 055004 (21pp)
85. Grinevich P.G., Novikov R.G., Creation and annihilation of point-potentials using Moutard-type transform in spectral variable, *Journal of Mathematical Physics* 61(9), 093501 (2020)
86. Ismail-Zadeh, A., Adamia, S., Chabukiani, A., Chelidze, T., Cloetingh, S., Floyd, M., Gorshkov, A., Gvishiani, A., Ismail-Zadeh, T., Kaban, M. K., Kadirov, F., Karapetyan, J., Kengerli, T., Kiria, J., Koulakov, I., Mosar, J., Mumladze, T., Müller, B., Sadradze, N., Safarov, R., Schilling, F., and Soloviev, A. (2020). Geodynamics, seismicity and seismic hazards of the Caucasus, *Earth Sci. Rev.*, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
87. Kossobokov, V. G., and G. F. Panza (2020). A Myth of Preferred Days of Strong Earthquakes? *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–8, doi: 10.1785/0220190157.
88. Novikov R.G., Multipoint formulas for scattered far field in multidimensions. 2020. *Inverse Problems* 36(9) 095001
89. Novikov R.G., Sivkin V.N., Error estimates for phase recovering from phaseless scattering data, *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications* 8(1), 44-61 (2020)
90. Novikov R.G., Multipoint formulas for phase recovering from phaseless scattering data, *Journal of Geometric Analysis*, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12220-019-00329-6>
91. Podvigina O., Castro S.B.S., Labouriau I.S. Asymptotic stability of robust heteroclinic networks. *Nonlinearity*, 33, 2020, 1757-1788.
92. Shapoval A., Le Mouel J.-L., Courtillot V., Shnirman M., Influence of Very Large Spatial Heterogeneity on Estimates of Sea-Level Trends, *Applied Mathematics and Computation*, 2020, V. 386, 125485, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125485>
93. Savostianov A., Shapoval A., Shnirman M., Dynamics of Phase Synchronization between Solar Polar Magnetic Fields Assessed with Van Der Pol and Kuramoto Models, *Entropy*, 2020, V. 22, 945, <https://doi.org/10.3390/e22090945>

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

94. Желиговский В.А., Подvigина О.М. Программа расчета решений трехмерных уравнений идеальной магнитогидродинамики (IDEALMHD3D). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663160 от 13 октября 2020г.

95. Желиговский В.А., Чертовских Р.А. Программа расчета максимального инкремента роста блоховской магнитной моды (INCBLOCHMM). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663135 от 13 октября 2020г.

Материалы конференций

96. Баранов А. А., Бобров А. М., Чуваев А.В. Влияние реологии мантии на поле скоростей течений и динамическую топографию поверхности для трехмерной сферической модели Земли. ПЯТАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “К СТОЛЕТИЮ М.В. ГЗОВСКОГО”. 5-9 ОКТЯБРЯ 2020 (<https://ifz.ru/novosti/videotranslyaczii-pyatoj-tektonofizicheskoy-konferenczii-v-ifz-ran-k-stoletiyu-mv-gzovskogo>)

97. Бирючева Е.О., Трубицын В.П., Деформации и напряжения в океанических плитах. ПЯТАЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “К СТОЛЕТИЮ М.В. ГЗОВСКОГО”. 5-9 ОКТЯБРЯ 2020 (<https://ifz.ru/novosti/videotranslyaczii-pyatoj-tektonofizicheskoy-konferenczii-v-ifz-ran-k-stoletiyu-mv-gzovskogo>)

98. Горшков А.И., Новикова О.В., Ливинский А.И. Распознавание рудоносных пересечений линеамента впо морфоструктурным и геофизическим данным в Алтайско-Саянском горном поясе. Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН. – М.: ИГЕМ РАН, 2020. С. 79-80. ISBN 978-5-88918-060-9

99. Горшков А.И., Новикова О.В., Ливинский А.И. Распознавание рудоносных морфоструктурных узлов в Алтайско-Саянском регионе. В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа конференции. 2020. С. 39-40.

100. Горшков А.И., Семка М.А. Геолого-геофизические особенности мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса. В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа конференции. 2020. С. 59.

101. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. Eigenfunction expansion for the elastic rectangle. In: 2020 10th International Conference on Applied Physics and Mathematics (ICAPM 2020), January 10-12, 2020; Tokyo, Japan.

102. Kerzhaev A.P. Two nonhomogeneous boundary value problems for a rectangle: Exact solutions. In: 2020 10th International Conference on Applied Physics and Mathematics (ICAPM 2020), January 10-12, 2020; Tokyo, Japan. Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Shulyakovskaya T.D., Zeng X. The boundary value problem of the theory of elasticity in a rectangle: An exact solution. In: 12th Conference of the Euro-American Consortium for

Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'20), June 24-29, 2020; Albena, Bulgaria.

103. Kerzhaev A.P. Nonhomogeneous boundary value problem for a clamped rectangle: Exact solution. In: 12th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'20), June 24-29, 2020; Albena, Bulgaria.

104. Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G., Zeng X. Exact solution for an elastic square plate loaded with tangential stresses. In: 9th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE 2020), September 7-10, 2020; Tinos island, Greece.

105. Kerzhaev A.P. Thermal stresses in an elastic clamped square: Exact solution. In: 9th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE 2020), September 7-10, 2020; Tinos island, Greece

106. Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G., Zeng X. Formation of discontinuities in rectangular plates as a result of residual stress relief. In: 2020 7th International Conference on Mechanical, Materials and Manufacturing (ICMMM 2020), September 24-26, 2020; Washington, USA.

2019 год

Публикации в российских и международных журналах, индексируемых в WebofScience, Scopus, РИНЦ:

107. Gorshkov A., Hassan H., Novikova O. (2019) Seismogenic nodes ($M \geq 5.0$) in north-east of Egypt and implication for seismic hazard assessment. *Pure Appl. Geophys.* 176(2): 593–610 <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2012-9> (WoS)

108. Andrievsky A., Chertovskih R., Zheligovsky V. Pointwise vanishing velocity helicity of a flow does not preclude magnetic field generation. *Phys. Rev. E*, 99, 2019, 033204, arxiv.org/abs/1811.00859.

109. Gama S.M.A., Chertovskih R., Zheligovsky V. Computation of kinematic and magnetic α -effect and eddy diffusivity tensors by Padé approximation. *Fluids*, 4, 2019, 110, arxiv.org/abs/1906.01423 , <https://www.mdpi.com/2311-5521/4/2/110> .

110. Andrievsky A., Chertovskih R., Zheligovsky V. Negative magnetic eddy diffusivity due to oscillogenic α -effect. *Physica D*, 399, 2019, 58-72, arxiv.org/abs/1711.02390 .

111. Podvigina O., Castro S.B.S., Labouriau I.S. Stability of a heteroclinic network and its cycles: a case study from Boussinesq convection. *Dynamical systems*, 34, 2019, 157-193.

112. Podvigina O., Lohse A. Simple heteroclinic networks in \mathbb{R}^4 . *Nonlinearity*, 32, 2019, 3269-3293.
113. Podvigina O., Krasilnikov P.S. Evolution of the obliquity of an exoplanet: A non-resonant case. *Icarus*, 335, 2020, 113371, [<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.07.005>].
114. Vorovieva, I., Ismail-Zadeh, A., and Gorshkov, A., 2019. Nonlinear dynamics of crustal blocks and faults and earthquake occurrences in the Transcaucasian region, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 297, 106320.
115. Kovalenko M.D., Abruikov D.A., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. Exact solutions of boundary value problems in the theory of plate bending in a half-strip: basics of the theory. *Z. Angew. Math. Phys.* **70**, 98 (2019). (Web of Science, Scopus, Q1). DOI: 10.1007/s00033-019-1139-6.
116. Yu G., Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. Two problems for a strip with a transverse crack: Exact solutions. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1215, 012037 (2019). (Web of Science, Scopus). DOI: 10.1088/1742-6596/1215/1/012037.
117. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. On some properties of exact solutions in the form of series in Papkovich–Fadle eigenfunctions. *AIP Conference Proceedings* 2116, 380008 (2019). (Web of Science, Scopus). DOI: 10.1063/1.5114389.
118. Guangming Yu, Yingnian Yu, Daning Wang, Irina V. Menshova and Xiankun Zeng. Risk Analysis and Treatment on Seepage and Breaking of Tailings Dam. *International Journal of Engineering and Technology* 11(4), 224–229 (2019). DOI: 10.7763/IJET.2019.V11.1151.
119. Guangming Yu, Daning Wang, Xiankun Zeng, Mikhail D. Kovalenko, Irina V. Menshova, Alexander P. Kerzhaev, Chunguang Wang, Yuezeng Yang and Chunsheng Wang (2020) Failure Forecast Warning Research and In-Situ Online Monitoring of Tailings Dam Engineering. In: Correia A., Tinoco J., Cortez P., Lamas L. (eds) *Information Technology in Geo-Engineering. ICITG 2019. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer, Cham. pp 96–105. (Web of Science, Scopus). https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_8.
120. Bobrov, A., M., Baranov A., A. Thermochemical Mantle Convection with Drifting Deformable Continents: Main Features of Supercontinent Cycle. *Pure and Applied Geophysics*, 2019. Vol. 176, No. 8. P. 3545–3565.
121. Трубицын В.П. Проблемы глобальной геодинамики//Физики Земли. - 2019. - №1. - С. 108-198.

122. Shcherbakov V. P., Khokhlov A. V., Sycheva and N. K.. Analysis of the hypothesis of a giant gaussian process as a means for describing secular variations of the geomagnetic field vector. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55(1):182–194, January 2019.

123. Щербakov В.П., Хохлов А.В., Сычева Н.К. Анализ гипотезы большого Гауссова процесса как способа описания вековых вариаций вектора геомагнитного поля // *Физика Земли*. - 2019. - №1.-С.214-228. doi:[10.31857/S0002-333720191214-228](https://doi.org/10.31857/S0002-333720191214-228).

124. Shcherbakov, V.P., A.V.Khokhlov, and N.K.Sycheva, Analysis of the Hypothesis of a Giant Gaussian Process as a Means for Describing Secular Variations of the Geomagnetic Field Vector. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2019, **55**, 1: 182-194, doi:[10.1134/S1069351319010099](https://doi.org/10.1134/S1069351319010099).

125. Khokhlov, A., R.Krasnoperov, B.Nikolov, J.Nikolova, M.Dobrovolsky, V.Petrov, D.Kudin, and I.Belov, On the directions and structure of the short-term magnetic variations. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2019, **19**, 2: Article ES2002, doi:[10.2205/2019ES000656](https://doi.org/10.2205/2019ES000656).

Материалы конференций

126. Gorshkov A., Novikova O., Gaudemer Y., Mandal P., Hassan H. (2019). Possible Locations of Earthquake Sources in the Continental Environments: Method and Applications. 27th IUGG 2019 General Assembly, 8-18 July 2019, Montreal, Canada https://www.czech-in.org/cmPortalV15/CM_W3_Searchable/iugg19/normal#!abstractdetails/0000697670

127. Gorshkov A., Novikova O. (2019) Potential earthquake sources M6+ in the Maghrebides 27th IUGG 2019 General Assembly, 8-18 July 2019, Montreal, Canada https://www.czech-in.org/cmPortalV15/CM_W3_Searchable/iugg19/normal#!abstractdetails/0000697670

128. Gorshkov A., Novikova O., Livinsky A. (2019) Recognition of ore-bearing nodes in the Altai-Sayan region. Proceedings of the V International Conference «Information Technologies in Earth Sciences and Applications for Geology, Mining and Economy ITES&MP-2019. Moscow 14-18 October 2019. - Moscow: VNIgeosystem, 2019. P.39.

129. Gorshkov A.I., Novikova O.V., Gaudemer Y. Mandal P., Hassan H. (2019) Identifying potential earthquake sources in the continental environments // All-Russian Scientific Conference with International Participation. Modern methods of seismic hazard assessment and earthquake prediction. 27-28 November 2019, IEPT RAS, Moscow, Book of Abstracts, p.97-98.

130. Ливинский А.И., Новикова О.В., Горшков А.И. (2019). Определение характерных геолого-геофизических признаков мест локализации крупных

месторождений металлов в Алтае-Саянском регионе с помощью алгоритмов распознавания образов. // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов и программа всероссийской научной конференции с международным участием. 27-28 ноября 2019 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2019.С.60-61.

131. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. The semi-strip with longitudinal stiffeners in tension-compression and bending: Exact solution. In: 17th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2019), Rhodes, Greece, 23-28 September 2019.

132. Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Shulyakovskaya T.D. Two problems for a half-strip with stiffeners: Exact solutions. In: 17th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2019), Rhodes, Greece, 23 - 28 September 2019.(Устный доклад, докладчик – Меньшова И.В.).

133. Guangming Yu, Daning Wang, Xiankun Zeng, Mikhail D. Kovalenko, Irina V. Menshova, Alexander P. Kerzhaev, Chunguang Wang, Yuezeng Yang and Chunsheng Wang. Failure Forecast Warning Research and In-Situ Online Monitoring of Tailings Dam Engineering. In: 3rd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG 2019), Guimarães, Portugal, September 29 – October 2, 2019.

134. Guangming Yu, Yingnian Yu, Daning Wang, Irina V.Menshova and Xiankun Zeng. Risk Analysis and Treatment on Seepage and Breaking of Tailings Dam. In: 2019 6th International Conference on Geological and Civil Engineering (ICGCE 2019), Osaka, Japan, 9-11 January 2019.

135. Желиговский В.А. Всё, что надо знать о геодинамо, за 15 минут. Доклад на юбилейной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» 27-28 ноября 2019 года, ИТПЗ РАН, Москва.

136. Подвигина О.М. Гетероклинические циклы в геофизике и гидродинамике. Доклад на юбилейной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» 27-28 ноября 2019 года, ИТПЗ РАН, Москва.

137. Баранов А.А. Бобров А. М.Эволюция полей напряжений в процессе суперконтинентального цикла: численное моделирование. 5-ая Международная конференция "Триггерные эффекты в геосистемах" (Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия, 4-7 июня 2019) <https://conf2019.idg.ras.ru/>

138. Krasnoperov, R.I., Khokhlov, A.V., Nikolova J., Analysis of Directions and Structure of Magnetic Variations from Geomagnetic Observatory and Station Measurements, IAGA 27 Conference.

139. А.В. Хохлов. Негауссовская форма кривых экспериментальных данных– кто виноват и что делать?” 25 сентября 2019, Международная Школа «Проблемы палеомагнетизма и магнетизма горных пород», Москва-Борок.