

Федеральное агентство научных организаций
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.3
№ государственной регистрации 115080610012
Инв. № 2017-4



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН
член-корреспондент РАН
А.А.Соловьев
«20» января 2017 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ И ИЗУЧЕНИЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
(промежуточный, за 2016 год)

Заведующий лабораторией № 3
канд. физ.-мат. наук

М.Г. Шнирман

Заведующий лабораторией № 4
докт. физ.-мат. наук

А.И. Горшков

Москва 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,

зав. лаб.

докт. физ.-мат. наук



А.И. Горшков

Ответственные исполнители:

гл. науч. сотр.

докт. физ.-мат. наук



В.А. Желиговский

гл. науч. сотр.

докт. физ.-мат. наук



А.Т. Исмаил-Заде

вед. науч. сотр.

докт. физ.-мат. наук



М.Д.Коваленко

ст. науч. сотр.

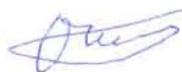
канд. физ.-мат. наук



И.В. Меньшова

вед. науч. сотр.

докт. физ.-мат. наук



О.М. Подвигина

ст. науч. сотр.

канд. геол.-мин. наук



С.В. Усенко

гл. науч. сотр.

докт. физ.-мат. наук



А.В. Хохлов

РЕФЕРАТ

Отчет 25 с., 10 рис., 23 источника

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОДИНАМИКИ, КОНВЕКТИВНОЕ МАГНИТНОЕ ДИНАМО, ГЕОДИНАМИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ, МОРФОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ, ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ, ВЕКОВЫЕ ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Исследования, проводимые по теме в 2016 году, включали анализ оценок точности определения направлений магнитного поля из палеомагнитных данных; изучение моделей магнитных динамо и гетероклинных циклов, возникающих в конвекции; разработку методов решения прямых и обратных задач геодинамики; изучение рельефа и тектоники океанического дна Норвежско-Гренландского региона (Северная Атлантика); морфоструктурное районирование северо-восточной части Африки и Эллинид; разработку методов теории упругости, применимых к изучению напряженного состояния земной коры; построение и анализ моделей мантийной конвекции.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Анализ палеомагнитных данных и наблюдение магнитного поля Земли	7
2.2. Исследование моделей магнитного динамо и гетероклинных циклов, возникающих в конвекции	7
2.3. Прямые и обратные задачи геодинамики	13
2.4. Изучение рельефа и тектоники океанического дна Норвежско-Гренландского региона	15
2.5. Морфоструктурное районирование	17
2.6. Применение методов теории упругости к изучению напряженного состояния земной коры	18
2.7. Моделирование мантийной конвекции	20
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	22
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	23

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках направлений фундаментальных исследований 128 "Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы" и 136 "Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий" Раздела IX "Науки о Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

Исследования по теме включают сравнительный анализ оценок точности определения характеристик магнитного поля по палеомагнитным данным, что имеет большое значение при формировании соответствующих баз данных. В работы по теме также входит участие в развертывании геомагнитной обсерватории "Климовская" на юге Архангельской области, которая должна стать в будущем важным элементом российской части сети INTERMAGNET.

Продолжены работы по исследованию моделей магнитного динамо и гетероклиных циклов, возникающих в конвекции. Построены аналитические семейства соленоидальных пространственно-периодических течений с поточечно нулевой спиральностью, способные генерировать не только короткомасштабные, но и длинномасштабные магнитные поля. Доказаны необходимые и достаточные условия на группу симметрий динамической системы для существования псевдо-простых гетероклиных циклов в R^4 . Исследована асимптотическая устойчивость гетероклиных циклов в R^6 .

Исследования по теме включают разработку методов решения прямых и обратных задач геодинамики, основой для которых является уникальный опыт российских ученых в создании аналитических и численных моделей, численных алгоритмов и программ для решения проблем геодинамической эволюции. В 2016 г. рассмотрена задача восстановления температуры и поля скоростей жидкости внутри некоторой плоской области изменения пространственной переменной в модели естественной стационарной тепловой конвекции вязкой жидкости по заданным условиям на части границы модельной области. Полученные результаты применимы для решения задачи восстановления температурного и динамического режима вулканической лавы по измерениям температуры на поверхности лавы.

Исследования по теме включают изучение неоднородности рельефа океанического дна Норвежско-Гренландского региона с использованием данных батиметрии и одноканальной сейсмоки отраженными волнами (single seismic reflection).

Построены схемы морфоструктурного районирования северо-восточной части Африки и Эллинид, которые применимы для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений в этих регионах.

В ряде статей Yoshimitsu Okada были опубликованы собранные им из разных источников, отредактированные и исправленные аналитические

решения теории упругости для полупространства с разрывом сплошности (трещиной). Эти решения весьма ценны, в силу того, что они записываются в замкнутом виде. Строгие, в рамках классической теории упругости, решения для полупространства имеют один существенный недостаток (впервые на это было указано Д.И. Шерманом в 1940 г.). Он заключается в следующем. Плоская до деформации свободная поверхность полупространства останется свободной от внешних напряжений и после образования разрыва только в том случае, если она по-прежнему будет плоской. В противном случае (теперь уже неплоская после образования разрыва) дневная поверхность не будет свободной. Возникающие на ней (а фактически отсутствующие) напряжения будут сопоставимы с напряжениями на разрыве, если трещина расположена достаточно близко к поверхности полупространства. Это приводит к существенному (до 100%) искажению истинной картины напряженно-деформированного состояния. С целью преодоления этого недостатка разработаны новые математические модели теории упругости для конечных канонических областей, которые могут быть использованы для описания напряженного состояния земной коры.

Выполнены исследования по моделированию мантийной конвекции. Рассчитана модель мантийной конвекции с фазовыми переходами и неньютоновской вязкостью с внутренними источниками тепла для двумерной декартовой модели. Построены модели пространственного распределения вязкости во всей мантии с учетом литосферных плит.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Анализ палеомагнитных данных и наблюдение магнитного поля Земли

При формировании любых баз данных важнейшим вопросом является декларация точности соответствующих измерений. Для палеомагнитных данных с 1980 года (начало регулярного сбора данных в глобальном масштабе) до наших дней в базах данных употребляют одну из двух оценок точности направлений магнитного поля. Для этих двух оценок ранее не было сформулировано каких-либо правил сравнения, что порождало и порождает множество спорных и неверных интерпретаций при использовании баз данных. Выполнено исследование, которое решает эту проблему: эти две оценки точности оказались различающимися по величине (в статистическом смысле) приблизительно в три раза. Полученные результаты опубликованы в статье [8].

Было принято участие в работах Геофизического центра РАН по развертыванию геомагнитной обсерватории “Климовская” на юге Архангельской области на территории Института физиологии природных адаптаций УрО РАН. В настоящее время получены первые результаты оценки качества регистрируемых данных и сделан вывод о перспективности включения обсерватории “Климовская” в сеть INTERMAGNET. Ценность обсерватории для мониторинга и оценки геомагнитной активности обусловлена не только ее высокоширотным расположением, но и оперативностью предоставления данных научному сообществу через сайт Российско-украинского центра геомагнитных данных. Роль наземных обсерваторий, таких как “Климовская”, остается критической как для долгосрочных наблюдений векового хода, так и для комплексного мониторинга магнитного поля Земли в комбинации с данными низкоорбитальных спутников. Описание работ по развертыванию обсерватории содержится в статье [11].

2.2. Исследование моделей магнитного динамо и гетероклинных циклов, возникающих в конвекции

Найдены собственные значения и соответствующие соленоидальные пространственно-периодические функции $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{b} e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{x}}$ оператора α -эффекта:

$$\text{rot } \mathbf{A}\mathbf{V} = \lambda\mathbf{V}, \text{ div } \mathbf{V} = 0,$$

обобщающие ABC-поток В.И. Арнольда. Здесь \mathbf{b} и \mathbf{q} - трехмерные векторы-константы, $\mathbf{b}\cdot\mathbf{q}=0$, \mathbf{A} - постоянный тензор α -эффекта. Собственные значения λ удовлетворяют равенствам

$$\lambda_{\pm}(\mathbf{q}) = ((\mathbf{A}_{12} - \mathbf{A}_{21})q_3 + (\mathbf{A}_{23} - \mathbf{A}_{32})q_1 + (\mathbf{A}_{31} - \mathbf{A}_{13})q_2) i/2 \pm \sqrt{a},$$

$$a = (\mathbf{A}_{11}\mathbf{A}_{22} - {}^s\mathbf{A}_{12}^2)q_3^2 + (\mathbf{A}_{22}\mathbf{A}_{33} - {}^s\mathbf{A}_{23}^2)q_1^2 + (\mathbf{A}_{11}\mathbf{A}_{33} - {}^s\mathbf{A}_{13}^2)q_2^2 +$$

$$2({}^s\mathbf{A}_{13} {}^s\mathbf{A}_{23} - {}^s\mathbf{A}_{12} {}^s\mathbf{A}_{33})q_1q_2 + ({}^s\mathbf{A}_{12} {}^s\mathbf{A}_{23} - {}^s\mathbf{A}_{13} {}^s\mathbf{A}_{22})q_1q_3 + ({}^s\mathbf{A}_{12} {}^s\mathbf{A}_{13} -$$

$${}^s\mathbf{A}_{23} {}^s\mathbf{A}_{11})q_2q_3),$$

где ${}^s\mathbf{A}$ - симметризованный тензор α -эффекта с элементами ${}^sA_{ij}=(A_{ij}+A_{ji})/2$. Если матрица ${}^s\mathbf{A}$ обратима, имеем более компактное представление $\mathbf{a}=\mathbf{q}\cdot(\det {}^s\mathbf{A})^{-1} {}^s\mathbf{A}^{-1}\mathbf{q}$. Соответственно, максимальный инкремент роста длинномасштабного магнитного поля вследствие действия α -эффекта есть $\max_{|\mathbf{q}|=1} \operatorname{Re} \lambda_{\pm}(\mathbf{q})=(\max(\alpha_1\alpha_2, \alpha_2\alpha_3, \alpha_1\alpha_3))^{1/2}$, где α_i - собственные значения симметризованного тензора α -эффекта ${}^s\mathbf{A}$.

Показано, что в пространственно-периодических течениях несжимаемой электропроводной жидкости, антисимметричных по одной декартовой переменной, в условиях разделения пространственных масштабов присутствует ненулевой α -эффект, но при этом структура α -тензора такова, что оператор α -эффекта имеет чисто мнимый спектр, т.е. такой α -эффект не может вызвать ни генерацию, ни затухание магнитного поля. Для этого случая построено разложение магнитных мод по отношению пространственных параметров, и проводятся исследования магнитной вихревой диффузии, которая при этих условиях отвечает в главном за временное поведение поля.

Построены три аналитические семейства соленоидальных пространственно-периодических течений с нулевой спиральностью в каждой точке пространства:

- "Косинусные потоки":

$$v_1=n(b_1 \sin(\mathbf{a}\cdot\mathbf{x})+a_1 \sin(\mathbf{b}\cdot\mathbf{x}))\cos nx_3,$$

$$v_2=n(b_2 \sin(\mathbf{b}\cdot\mathbf{x})+a_2 \sin(\mathbf{b}\cdot\mathbf{x}))\cos nx_3,$$

$$v_3=-\mathbf{a}\cdot\mathbf{b}(\cos(\mathbf{a}\cdot\mathbf{x})+\cos(\mathbf{b}\cdot\mathbf{x}))\sin nx_3,$$

где $\mathbf{a}=(a_1,a_2,0)$ и $\mathbf{b}=(b_1,b_2,0)$ - постоянные горизонтальные векторы.

- Потоки с разделением переменных 1 типа:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x})=(C_1u_1\dot{u}_2\dot{u}_3, C_2\dot{u}_1u_2\dot{u}_3, C_3\dot{u}_1\dot{u}_2u_3),$$

где u_i - произвольная гладкая 2π -периодическая функция переменной x_i , точка обозначает производную по x_i , C_i - произвольные константы, такие, что $C_1+C_2+C_3=0$.

- Потоки с разделением переменных 2 типа:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x})=(C_1u_2u_3, C_2u_1u_3, C_3u_1u_2),$$

где u_i - произвольная гладкая 2π -периодическая функция переменной x_i , C_i - произвольные константы.

Еще 3 семейства таких течений построено с помощью смешанных численно-аналитических процедур.

Для этих семейств проведены расчеты тензора магнитного α -эффекта, действующего в кинематическом динамо с разделением пространственных масштабов (рис. 1), а для центрально-симметричных течений - тензора вихревой (турбулентной) магнитной диффузии (рис. 2, 3). Вычисления проведены псевдоспектральным методом с разрешением 128^3 гармоник Фурье и проконтролированы расчетами с разрешением 256^3 гармоник. Эти расчеты показали, что короткомасштабные течения электропроводной жидкости с поточечно нулевой спиральностью могут генерировать не только короткомасштабные магнитные поля (что было известно ранее), но и длинномасштабные посредством механизмов α -эффекта и отрицательной

магнитной вихревой диффузии. При этом наличие динамо трех указанных типов в течениях нулевой спиральности при достаточной малости коэффициента молекулярной не носит исключительный характер.

Тем самым, построен класс контрпримеров, опровергающих широко распространенные мнения, что генерация магнитного поля требует ненулевую спиральность генерирующих течений, или что интенсивность α -эффекта в ламинарных потоках как-то связана с их спиральностью.

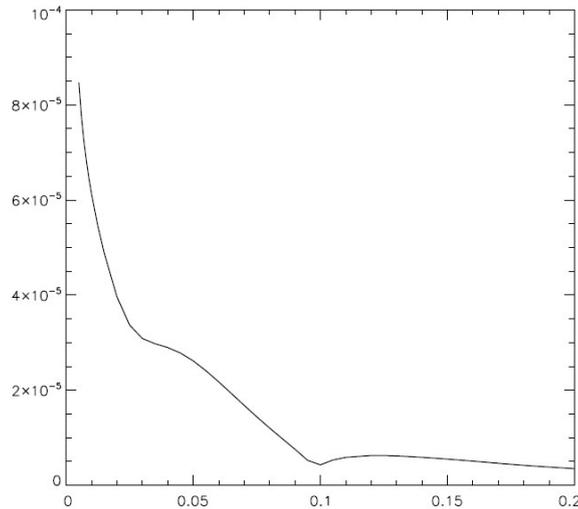


Рисунок 1. Максимальный инкремент роста длинномасштабного магнитного поля, генерируемого посредством α -эффекта, (вертикальная ось) как функция коэффициента магнитной молекулярной диффузии электропроводной жидкости (горизонтальная ось) в модельном потоке с поточечно нулевой спиральностью с разделением переменных 2 типа для $u_1(x_1)=\exp(\sin(x_1)/4-\cos^2 x_1)+\cos(x_1)/2-U_1$, $u_2(x_2)=(\exp(\sin(x_2)/4+\cos(3x_2)/3)+\cos(2x_2)/6)^2-U_2$, $u_3(x_3)=\exp(\sin(x_3)+4 \cos(3x_3))+5 \sin(2x_3)-U_3$ (константы U_i выбраны из условия, что среднее функции $u_i(x_i)$ по периоду равно нулю).

Продолжено исследование гетероклиных циклов в R^4 . Гетероклиный цикл – это инвариантное множество динамической системы, состоящее из стационарных состояний и гетероклиных траекторий, соединяющих эти стационарные состояния. В симметричных системах гетероклиные циклы могут быть структурно устойчивы, если гетероклиные траектории, соединяющие стационарные состояния, принадлежат инвариантным подпространствам. Гетероклиный цикл называется псевдопростым, если все инвариантные пространства имеют размерность два и выполнены некоторые дополнительные условия на собственные значения оператора линеаризации вблизи стационарных состояний.

Для псевдопростых гетероклиных циклов в R^4 получены следующие результаты:

- найдены все подгруппы Γ группы $SO(4)$ такие, что в Γ -эквивариантных динамических системах могут существовать псевдопростые гетероклинные циклы;
- доказано, что псевдопростые гетероклинные циклы в R^4 всегда асимптотически неустойчивы;
- найдены условия, при которых от псевдопростого гетероклинного цикла может бифурцировать асимптотически устойчивая периодическая орбита (рис. 4);
- численно показано, что в окрестности псевдопростого гетероклинного цикла возможно существование хаотических траекторий (рис. 5).

По полученным результатам подготовлена к публикации статья.

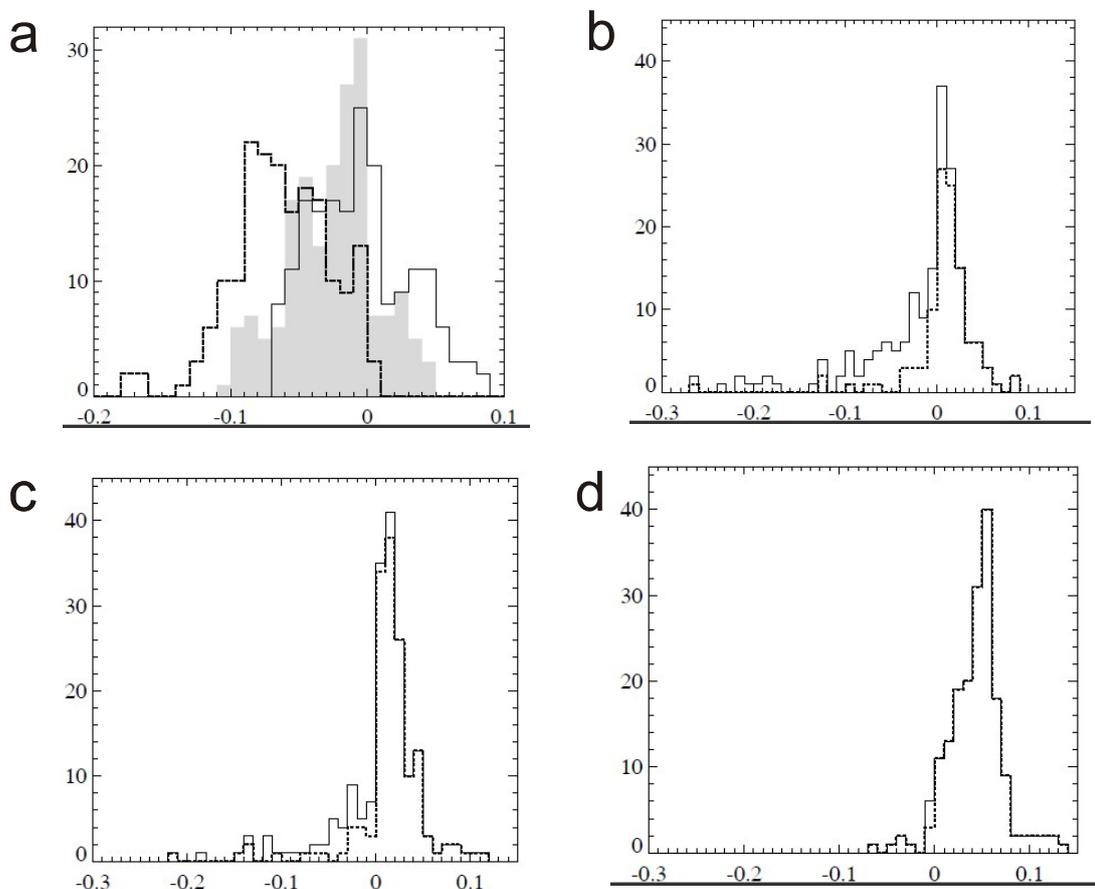


Рисунок 2. Гистограмма доминирующих инкрементов роста короткомасштабных магнитных мод 183 фундаментальных косинусных потоков с волновыми числами не более 3 (а) для трех коэффициентов магнитной молекулярной диффузии $\eta=0.01$ (черная сплошная линия), 0.02 (серая сплошная линия, область под графиком закрашена серым цветом), 0.05 (черная штриховая линия). Гистограммы минимальной вихревой (турбулентной) магнитной диффузии для тех же 183 косинусных потоков (сплошная линия), а также для тех из них, которые при данном η не являются короткомасштабными динамо (штриховая линия) для $\eta=0.01$ (b), 0.02 (c) и 0.05 (d).

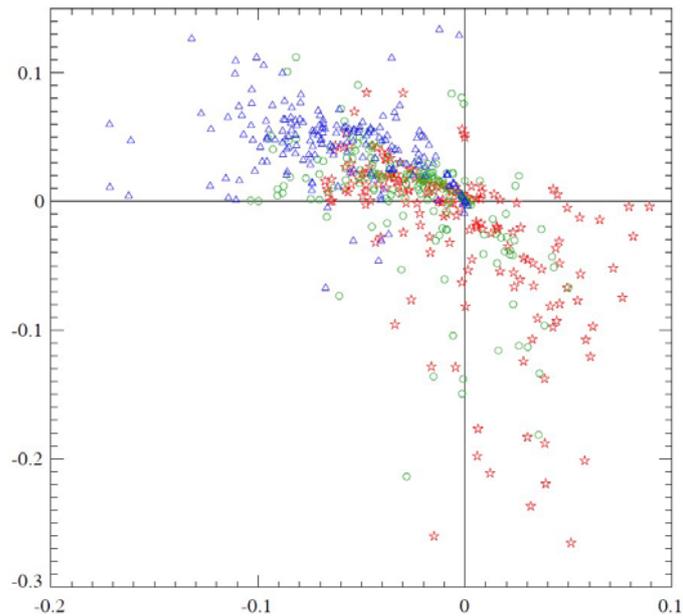


Рисунок 3. Распределение пар величин минимальной вихревой (турбулентной) магнитной диффузии (вертикальная ось) и максимального инкремента роста короткомасштабного магнитного поля (горизонтальная ось) в 183 фундаментальных косинусных потоках с волновыми числами не более 3 для трех коэффициентов магнитной молекулярной диффузии $\eta=0.01$ (красные звезды), 0.02 (зеленые круги) и 0.05 (синие треугольники).

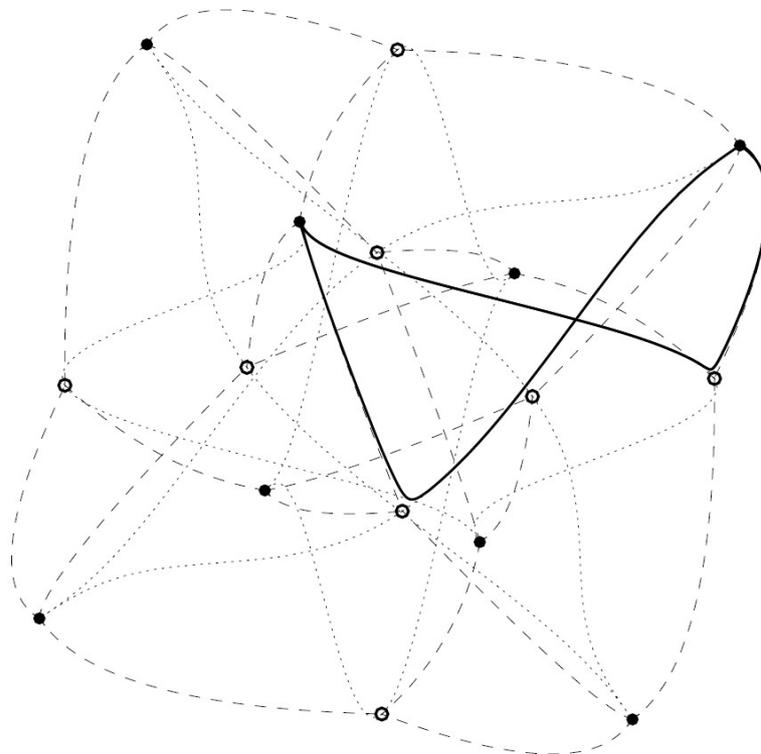


Рисунок 4. Проекция псевдопростого гетероклинного цикла и асимптотически устойчивой периодической орбиты (сплошная линия) на плоскость.

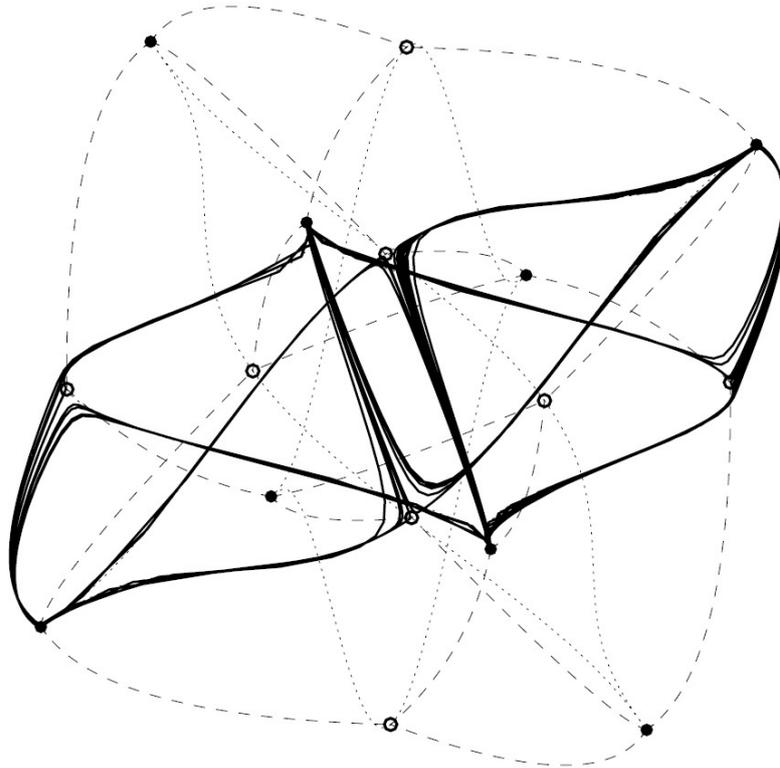


Рисунок 5. Проекция псевдопростого гетероклинического цикла и хаотической траектории (сплошная линия) на плоскость.

Исследована асимптотическая устойчивость гетероклинических циклов, возникающих в конвекции Буссинеска в плоском слое, с гексагональной ячейкой периодичности в горизонтальной плоскости для случая взаимодействия мод, когда для данного размера ячейки потеря устойчивости состояния покоя жидкости относительно двух семейств двумерных возмущений (валов), пространственные периоды которых относятся как $2:\sqrt{3}$, происходит при одном и том же критическом числе Рэлея.

Ранее было показано (Castro, S., I. Labouriau, and O. Podvigina, A heteroclinic network in mode interaction with symmetry, *Dynamical Systems*, 2010, **25**: 359-396), что в динамической системе, полученной ограничением уравнений конвекции Буссинеска на 6-мерное инвариантное подпространство 12-мерного центрального многообразия, возможно сосуществование до трех гетероклинических циклов (рис. 6). Поведение траекторий в малой окрестности гетероклинического цикла описывается матрицей перехода. Для каждого из этих трех циклов выписаны матрицы перехода. Для двух циклов из их свойств выведены условия асимптотической устойчивости; доказано, что третий цикл всегда неустойчив. По полученным результатам готовится статья.

Реализован алгоритм решения задач идеальной магнитогидродинамики, обобщающий предложенный ранее алгоритм Коши-Лагранжа для решения уравнения Эйлера. Методические расчеты показали, что алгоритм очень сильно подвержен воздействию ошибок округления.

Полученные результаты опубликованы в статье [10].

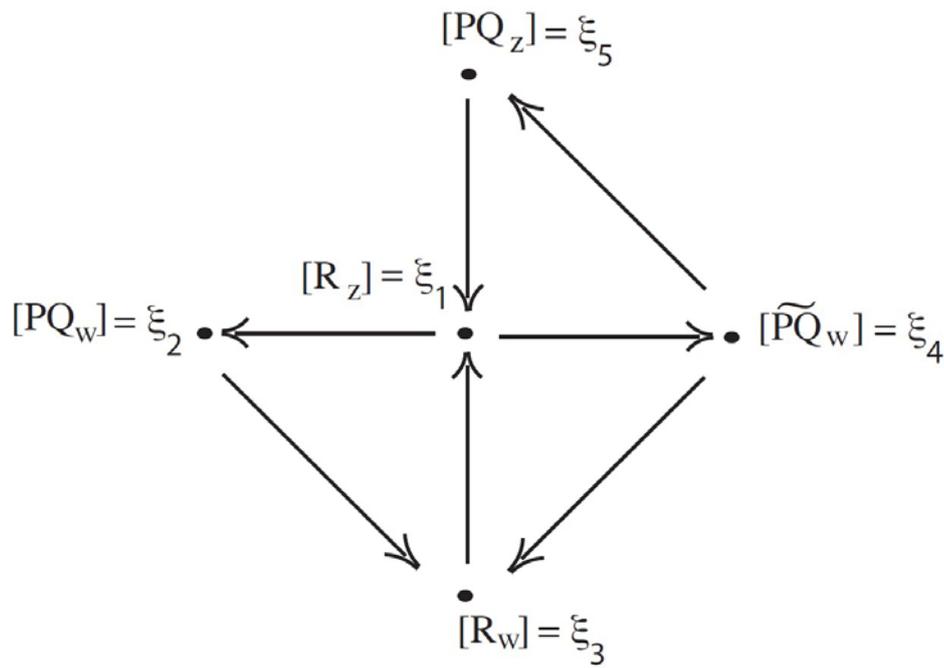


Рисунок 6. Схематическое изображение гетероклинической сети, объединяющей три гетероклинических цикла.

2.3. Прямые и обратные задачи геодинамики

В рамках этого направления исследований в сотрудничестве с Институтом математики и механики УрО РАН и МГУ им. М.В.Ломоносова рассмотрена задача восстановления температуры и поля скоростей жидкости внутри некоторой плоской области изменения пространственной переменной в модели естественной стационарной тепловой конвекции вязкой жидкости по заданным условиям на части границы модельной области. Вязкость считалась зависящей от температуры и количества образующихся кристаллов. Эта задача относится к классу обратных граничных задач и обладает свойством неустойчивости по отношению к возмущению исходных граничных данных. Модель стационарной тепловой конвекции вязкой жидкости включает в себя уравнение Стокса вместе с уравнением несжимаемости для определения поля скоростей жидкости и уравнение теплового баланса для определения температуры. На границе пространственной области задаются граничные условия для скорости и температуры, характерные для вулканической лавы. При этом граничные данные для температуры задаются только на той части границы, где температура и тепловой поток можно вычислить с помощью аэрозамеров абсолютной температуры поверхности лавы.

Предложен численный метод и построены алгоритмы устойчивого численного решения рассматриваемой задачи. Численный метод основан на

сведении исходной задачи к некоторой экстремальной задаче на минимум подходящего целевого функционала и минимизации этого функционала каким-либо методом (например, одним из градиентных методов). При минимизации целевого функционала градиентными методами организуется итерационный процесс, который фактически сводит исходную задачу к серии устойчивых корректно поставленных задач граничного управления. Проведены серии вычислительных экспериментов, показавших работоспособность метода и алгоритмов. Были исследованы следующие прямая и обратная задачи. Прямая задача решалась в модельной области, имитирующей склон вулкана. В результате решения обратной задачи были восстановлены распределение температуры, поля скоростей и лавовая корка в модельной области. Проведенные расчеты модельных примеров показали надежность результатов по восстановлению лавовой температуры и скорости, как для гладких (рис. 7), так и для зашумленных исходных данных.

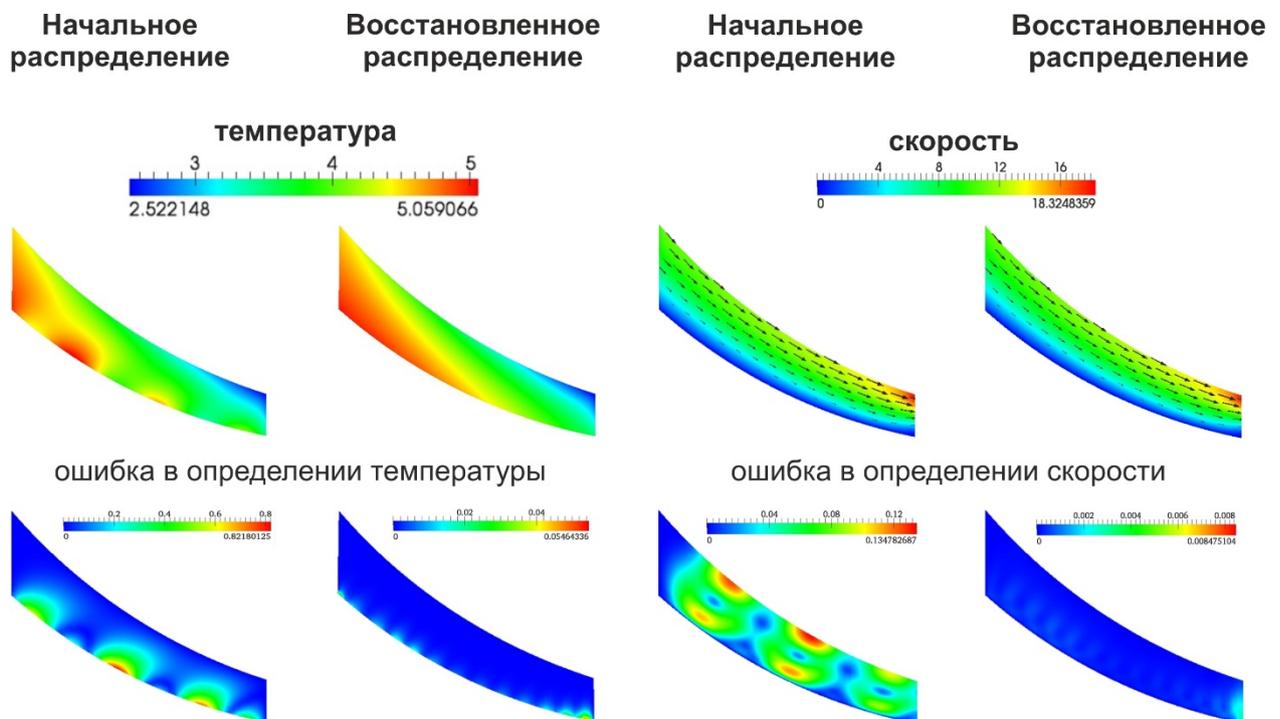


Рисунок 7. Определение лавовой температуры и скорости течений (в безразмерных величинах) в результате применения разработанного метода анализа.

По результатам исследований опубликованы статьи [2, 9, 12], и они вошли в доклады [18-20].

В 2016 г. опубликована монография [1], содержащая полученные ранее результаты в области численного моделирования при решении прямых и обратных задач геодинамики.

2.4. Изучение рельефа и тектоники океанического дна Норвежско-Гренландского региона

По данным батиметрии и одноканальной сейсмики отраженными волнами (single seismic reflection) изучены неоднородности рельефа океанического дна Норвежско-Гренландского региона (рис. 8). К северу от хребта Мона в рельефе дна выделены субширотные структурные формы (СФ), представляющие собой горстовые хребты разделенные прогибами, даны их морфоструктурные характеристики. Выполнен сейсмостратиграфический анализ строения кайнозойского осадочного чехла и условий его формирования. Показано, что выделенные СФ в рельефе морского дна сформировались после образования осадочного чехла (в постчетвертичное время), т.е. являются молодыми образованиями, они не отображаются в структуре магнитных аномалий Гренландского бассейна. На основании анализа батиметрических характеристик и механизмов очагов землетрясений в пределах хребта Мона намечены поперечные разломы, вероятно имеющие сбросо-сдвиговую природу и определяющие его блоковое строение.

В результате выполненных исследований линейно-вытянутых горстовых СФ L1-L6 (рис. 9) можно отметить их феноменальность. Их расположение в плане с юга на север имеет эшелонированный характер. При этом наблюдается: 1 – увеличение глубин расположения поднятий в северном направлении; 2 – уменьшение с юга на север относительных амплитуд поднятий; 3 – сохранение соизмеримых расстояний между грядами поднятий при среднем значении 25 км.

Изучение латеральных особенностей рельефа океанского дна по региональным профилям показало блоковый характер его строения. В пределах рифтовой долины выделяются глубокие поперечные впадины, которые делят хребет на блоки. Фокальные механизмы землетрясений, приуроченных к этим впадинам, позволяют предположить сбросо-сдвиговый характер тектонических движений.

Сейсмостратиграфический анализ сейсмических временных разрезов в регионе показал: линейно-вытянутые СФ L1-L6 в рельефе океанского дна являются образованиями акустического фундамента подстилающего кайнозойский осадочный чехол, их образование происходило после формирования осадочного комплекса; молодые (постчетвертичные) тектонические движения в пределах Гренландского континентального склона имели амплитуду сбросов, достигающую 800 м.

По полученным результатам подготовлена статья.

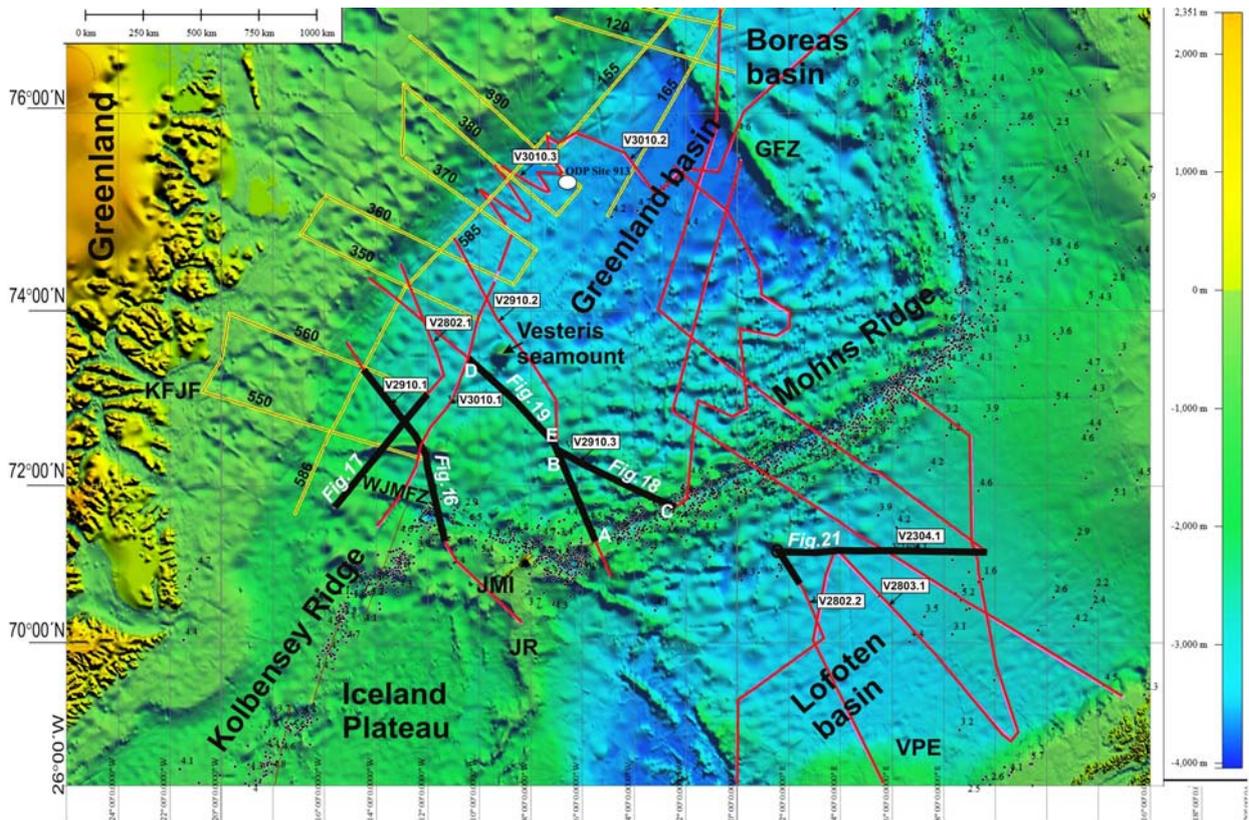


Рисунок 8. Обзорная карта района исследований с батиметрической основой SRTM-30.4 (Becker, J.J., D.T. Sandwell, W.H.F. Smith, J. Braud, et al. (2009), Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS, *Marine Geodesy*, 32, 355-371).

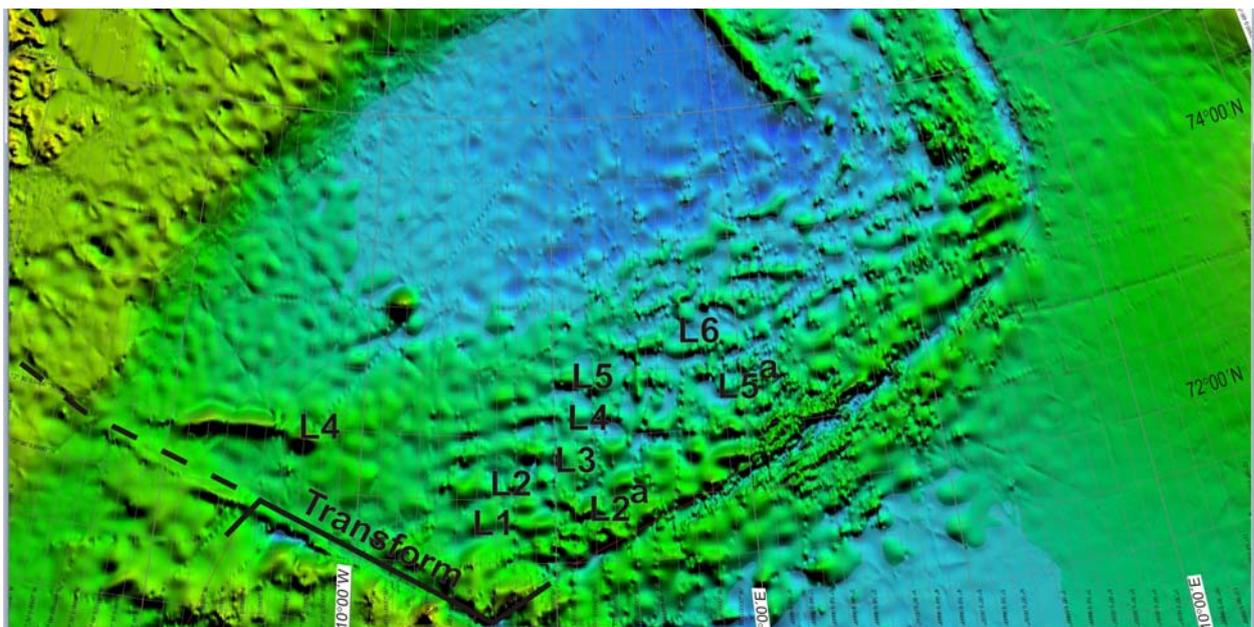


Рисунок 9. Рельеф океанического дна исследуемого региона в результате искусственного понижения (уменьшения) глубины океана на -3000 метров. (SRTM-30.4). L1-L6 – обсуждаемые линейно-вытянутые СФ.

2.5. Морфоструктурное районирование

Построена схема морфоструктурного районирования северо-восточной части Африки (рис. 10), отображающая иерархическую систему блоков земной коры и положение сейсмоконтролирующих структур – пересечений морфоструктурных линеаментов. На основе геолого-геофизических параметров пересечений алгоритмами распознавания образов определены те пересечения, в которых возможны землетрясения с $M5+$.

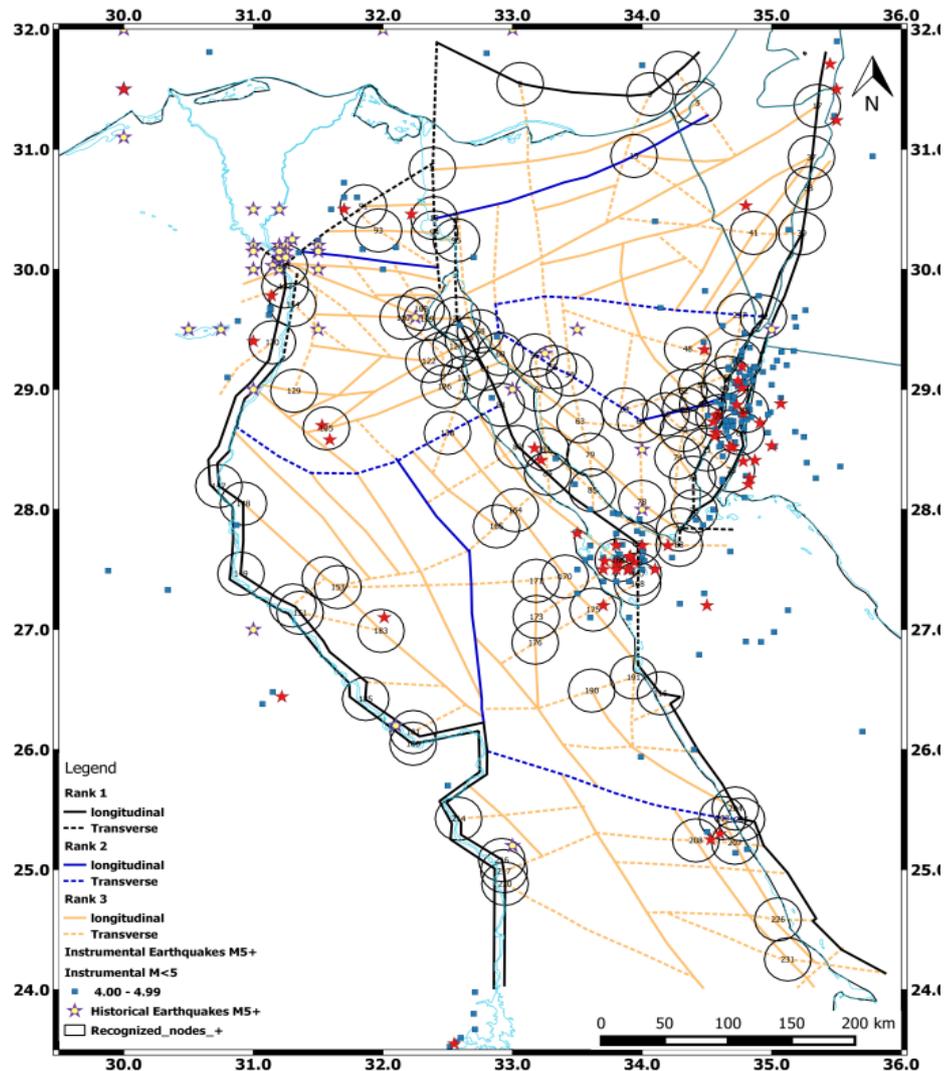


Рисунок 10. Схема морфоструктурного районирования северо-восточной части Африки и сейсмоопасные пересечения линеаментов для $M5+$. Толстыми линиями показаны линеаменты первого ранга, средними – второго ранга, тонкими – третьего ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, прерывистые – поперечные линеаменты. Кругами отмечены 25-километровые окрестности пересечений линеаментов, отнесенные в результате распознавания к высокосейсмичным для $M5+$.

Аналогичное исследование выполнено для Эллинид. Полученные результаты представлены в докладах [15-17, 23].

2.6. Применение методов теории упругости к изучению напряженного состояния земной коры

В результате выполненных исследований получены точные решения для конечных областей (в виде рядов функций Фадля-Папковича), описывающие физически правдоподобную деформацию, при которой дневная поверхность, естественным образом деформируясь в результате образования трещины, остается свободной от внешних напряжений. Выполнен поиск примеров точных решений, симметричных относительно продольной оси, краевых задач теории упругости в прямоугольнике, продольные стороны которого подкреплены ребрами жесткости, работающими только на растяжение-сжатие. Относительно вертикальной оси рассматриваются как четно-симметричная, так и нечетно-симметричная деформации. Решение ищется в виде рядов по функциям Фадля-Папковича. Базисные свойства систем функций Фадля-Папковича исследовались ранее. Для них были построены соотношения биортогональности и найдены биортогональные функции, с помощью которых определяются искомые коэффициенты разложений. Это делается аналогично известным решениям Файлона-Рибьера в тригонометрических рядах. Окончательные выражения для коэффициентов разложений имеют вид интегралов Фурье от заданных граничных функций. Ряды для точных решений сходятся к раскладываемым функциям с той же скоростью, что и тригонометрические ряды для этих функций (равномерно равносходятся с ними). В то же время, приближенные решения в рядах по функциям Фадля-Папковича, как правило, сходятся плохо. Это обстоятельство не раз отмечалось в литературе. Рассмотрены примеры, когда на торцах прямоугольника приложены нормальная и касательная нагрузки, в том числе сосредоточенные силы, действующие на концах ребер. Получены численные результаты, иллюстрирующие влияние жесткости ребра на распределение напряжений и перемещений в прямоугольнике. Полученные формулы, описывающие напряженно-деформированное состояние прямоугольника, просты и удобны в приложениях.

Для этих решений не выполняется условие совместности деформаций, и они неединственные. Впервые на неединственность решения краевых задач теории упругости в конечных областях указал Е.И. Шемякин (1996 г.). Из неединственности, как следствие, вытекает существование собственных (остаточных, начальных) самоуравновешенных напряжений и соответствующих им деформаций, не обусловленных внешними нагрузками. Теория остаточных напряжений – одна из важнейших проблем теории упругости. Многолетние усилия построить ее оставались безуспешными. На самом деле, она является простым следствием неединственности решения краевых задач теории упругости в конечных областях. Невыполнение условий совместности деформаций означает лишь то, что свободная от нагрузок, плоская до образования разрыва граница полупространства, не

остается плоской после сброса остаточных напряжений, а каким-то образом искривляется, оставаясь при этом свободной, что полностью соответствует реальной физической картине.

Исследуемая задача ставится следующим образом. Допустим, что в конечной прямоугольной области имелось некоторое поле остаточных напряжений, которые затем сбрасываются (частично или полностью) с образованием разрыва. Граничные условия на сторонах прямоугольника могут быть разными: стороны могут быть свободны, часть сторон может быть жестко закреплена и т.д. Если известны смещения сторон прямоугольника после образования разрыва, его форма или величина сброшенных напряжений на разрыве, то можно восстановить исходное поле остаточных напряжений во всем прямоугольнике. Задачи в такой постановке, скорее всего, ранее не решались и, наверное, не ставились, поскольку теории остаточных напряжений практически нет, за исключением нескольких публикаций, в которых даются примеры подобранных определенным образом напряжений, равных нулю на сторонах прямоугольника, удовлетворяющих уравнениям равновесия, но не удовлетворяющим условию совместности деформаций.

Из результатов выполненных исследований вытекают несколько выводов, которые невозможно получить, основываясь на классических представлениях теории упругости. Эти выводы свидетельствуют о наличии остаточных напряжений в образце и состоят в следующем:

- а) имеется знакопеременность напряжений, являющаяся следствием их самоуравновешенности;
- б) присутствуют значительные, а иногда необъяснимо большие значения напряжений, которые могут, например, соответствовать субгоризонтальным напряжениям в земной коре;
- в) образуются значительные остаточные деформации свободных поверхностей, особенно вблизи поверхностей разрыва;
- г) фрагменты образца, образовавшиеся вследствие его разделения и сброса остаточных напряжений, перемещаются и поворачиваются, как абсолютно жесткие (аналог кинематической несовместности);
- д) фрагменты образца невозможно сложить вновь по поверхностям разрыва без зазоров (аналог геометрической несовместности).

Известны исследования, в которых на основе многолетних наблюдений (в естественных условиях) за горными работами и лабораторных экспериментов, делается вывод, что причиной горных ударов являются остаточные напряжения, имеющиеся в горной породе, а землетрясения рассматриваются, как горные удары большого масштаба. Причины возникновения остаточных напряжений могут быть разными. Однако высвобождение накопленной потенциальной энергии, как на микроуровне (горные удары), так и на макроуровне (землетрясения) проходят по одному сценарию – с образованием разрывов.

Опираясь на развиваемую теорию остаточных напряжений, можно предложить новые физико-математические модели очага землетрясения, в

которых образование разрывов в земной коре рассматривается, как результат сброса остаточных напряжений. Источником остаточных напряжений (с большой долей вероятности) могут быть тепловые процессы (нечто похожее можно наблюдать при сварке).

Полученные результаты опубликованы в статьях [3-5] и представлены в докладах [13, 14, 21, 22].

2.7. Моделирование мантийной конвекции

В сотрудничестве с Институтом физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН выполнены исследования по моделированию мантийной конвекции.

Рассчитана модель мантийной конвекции с фазовыми переходами и неньютоновской вязкостью с внутренними источниками тепла для двумерной декартовой модели. Зависимость вязкости от температуры представлена законом Аррениуса со скачком вязкости 50 на границе между верхней и нижней мантией. Полный перепад вязкости в модели составляет 4.5 порядка. Использование неньютоновской реологии позволило промоделировать процессы размягчения в зоне изгиба и субдукции океанических плит. Порог прочности в модели принимается равным 50 МПа. В результате моделирования изучена структура мантийных течений и пространственные поля напряжений σ_{xz} и σ_{xx} в мантии Земли. Модель демонстрирует скачкообразное перемещение зон субдукции и обнаруживает резкие изменения в полях напряжений в зависимости от стадии отделения слэба. По сравнению с ранее рассмотренной моделью наблюдается самосогласованное появление жестких движущихся литосферных плит на поверхности. При этом интенсивные течения в верхней мантии вызывают снос верхней части слэбов и их наклон, а также смещение плюмов. Получено, что при пересечении всплывающим плюмом границы между нижней и верхней мантией образуется характерная “двухъярусная” структура плюма: в верхней мантии восходящая струя вещества утоняется, а ее скорость возрастает. Эффект вызывается скачком вязкости на границе и усиливается действием эндотермической фазовой границы, препятствующей прохождению вещества плюма из нижней мантии в верхнюю. Рассчитаны величины и характер распределения сдвиговых напряжений σ_{xz} и надлитостатических горизонтальных напряжений σ_{xx} . В модели в области погружающихся слэбов напряжения составляют 60–80 МПа, превышая, таким образом, почти на порядок напряжения в других областях мантии. Рассмотрен характер полей напряжений в области прохождения плюмами и слэбами фазовых границ и скачка вязкости. Найдено, что влияние скачка вязкости, а также эндотермической фазовой границы на глубине 660 км выражается в существовании неоднородностей полей напряжений на границе верхней и нижней мантии. Влияние экзотермического фазового перехода на глубине 410 км на поля напряжений при взятых параметрах невелико. В полях напряжений области слэбов выражены значительно сильнее областей плюмов. Это численно показывает, что именно слэбы, а не плюмы, являются

основной движущей силой конвекции. Плюмы же частично являются движущей силой, а частично вовлекаются пассивно в конвекцию, организованную погружающимися слэбами. Полученные результаты опубликованы в статье [7].

Вязкость является фундаментальным свойством мантии, определяющим глобальные геодинамические процессы. Согласно микроскопической теории дефектов и лабораторных экспериментов вязкость экспоненциально зависит от температуры и давления с параметрами, энергия активации и объем активации. Имеющиеся лабораторные измерения проводятся для скоростей деформации много больших, чем в мантии, и имеют значительную неопределенность. По данным о послеледниковых поднятиях удается восстановить распределение вязкости только по глубине. Поэтому в настоящее время пространственное распределение (по глубине и латерали) находится из моделей мантийной конвекции, которые рассчитываются при численном решении уравнений конвекции совместно с зависимостью вязкости от давления и температуры. Используемые в настоящее время при численном моделировании конвекции зависимости вязкости от давления и температуры дают большой разброс для нижней мантии до нескольких порядков. В результате выполненного исследования показано, что можно получить согласие между результатами расчета распределения вязкости по глубине во всей мантии и данными по послеледниковым поднятиям. С этой целью для верхней мантии значения энергии и объема активации можно взять по лабораторным измерениям, а для нижней мантии – значение объема активации уменьшить в 2 раза на фазовой границе 660 км. Далее, выявляемое по данным о послеледниковых поднятиях понижение вязкости на порядок на глубинах более 2000 км может быть объяснено наличием тяжелого горячего вещества на дне мантии в зонах *LLSVP*. Построены модели пространственного распределения вязкости во всей мантии с учетом литосферных плит. Полученные результаты опубликованы в статье [6].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования являются вкладом в изучение геодинамических процессов и сейсмической опасности. Анализ оценок точности результатов интерпретации палеомагнитных данных дает возможность получения на основе этих данных более адекватных представлений о реальной эволюции магнитного поля Земли. Теоретические исследования по проблеме магнитного динамо перспективны с точки зрения создания моделей происхождения и эволюции магнитного поля Земли. Изучение напряженного состояния земной коры с использованием новых методов теории упругости, применимых для конечных областей, может в перспективе привести к результатам, позволяющим создать новые алгоритмы прогноза землетрясений.

По результатам выполненных исследований опубликована монография и 11 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах, а также сделано 11 докладов на международных и российских научных конференциях.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Монография

1. Ismail-Zadeh, A., A. Korotkii, and I. Tsepelev, *Data-Driven Numerical Modelling in Geodynamics: Methods and Applications*. SpringerBriefs in Earth Sciences, 2016, 105 p., ISSN: 2191-5369, 2191-5377 (electronic), ISBN: 978-3-319-27800-1, 978-3-319-27801-8 (eBook), DOI 10.1007/978-3-319-27801-8.

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

2. Исмаил-Заде А.Т., Ковтунов Д.А., Короткий А.И., Мельник О.Э., Цепелев И.А. Определение распределения физических характеристик внутри лавового потока по тепловым измерениям на его поверхности // ДАН, 2016, т.467, № 4. С.458-462, doi:10.7868/S0869565216100182.
3. Меньшова И.В. Биортогональные функции и разложения Лагранжа по функциям Фадля-Папковича в первой основной задаче теории упругости // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, 2016, № 2(28). С.58-85.
4. Меньшова И.В., Ворокова М.Н. Примеры точных решений краевых задач теории упругости в прямоугольнике с ребрами жесткости // Механика композиционных материалов и конструкций, 2016, т.22, № 3. С.414-429 (ядро РИНЦ).
5. Меньшова И.В., Кержаев А.П., Никитин А.В. Метод начальных функций и преобразование Фурье в задаче для разномодульной полосы // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, 2016, № 3(29). С.74-93.
6. Трубицын В.П. Распределение вязкости в моделях мантийной конвекции // Физика Земли, 2016, № 5. С.3-12, doi:10.7868/S000233371605015X.
7. Bobrov, A.M., and A.A. Baranov, The mantle convection model with non-Newtonian rheology and phase transitions: The flow structure and stress fields. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2016, **52**, 1: 129-143, doi:10.1134/S1069351316010031.
8. Khokhlov, A., and G. Hulot, Principal component analysis of palaeomagnetic directions: converting a Maximum Angular Deviation (MAD) into an alpha(95) angle. *Geophys. J. Int.*, 2016, **204**, 1: 274-291, doi:10.1093/gji/ggv451.
9. Korotkii, A., D. Kovtunov, A. Ismail-Zadeh, I. Tsepelev, and O. Melnik, Quantitative reconstruction of thermal and dynamic characteristics of lava flow from surface thermal measurements, *Geophys. J. Int.*, 2016, **205**, 3: 1767-1779, doi:10.1093/gji/ggw117.
10. Podvigina, O., V. Zheligovsky, and U. Frisch, The Cauchy-Lagrangian method for numerical analysis of Euler flow. *Journal of Computational Physics*, 2016, **306**: 320-342, doi:10.1016/j.jcp.2015.11.045.

11. Soloviev, A.A., R.V. Sidorov, R.I. Krasnoperov, A.A. Grudnev, and A.V. Khokhlov, Klimovskaya: A new geomagnetic observatory. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, **56**, 3: 342-354, doi: 10.1134/S0016793216030154.
12. Tsepelev, I., A. Ismail-Zadeh, O. Melnik, and A. Korotkii, Numerical modeling of fluid flow with rafts: An application to lava flows. *Journal of Geodynamics*, 2016, **97**: 31-41, doi:10.1016/j.jog.2016.02.010.

Доклады на международных и российских научных конференциях

13. Коваленко М.Д., Меньшова И.В. Математическая теория остаточных напряжений // Материалы Первого Международного симпозиума «Прогноз и предупреждение тектонических горных ударов и землетрясений: измерение деформаций, остаточных и действующих напряжений в горных породах (г. Бишкек, 21-23 сентября 2016 г.). Бишкек: НАН КР, 2016. С.49-62.
14. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Теория остаточных напряжений на основе плоской теории упругости // Сборник докладов Международной конференции «Актуальные проблемы современной сейсмологии», посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз (12-14 октября 2016 г., г. Ташкент, Узбекистан). Ташкент: АН РУз Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова, 2016. С.89-97.
15. Gorshkov, A., Y. Gaudemer, and O. Novikova, Hellenides: possible locations of M7+ earthquakes defined by pattern recognition. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-299-1.
16. Gorshkov, A., H. Hassan, and O. Novikova, Seismogenic nodes defined in north-east Egypt by the pattern recognition approach. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 2016, ESC2016-262-1.
17. Hassan, H.M., A.I. Gorshkov, and O.V. Novikova, Recognition of seismogenic nodes ($M \geq 5.0$) in north-east Egypt. In Book of abstracts of the 1st general Assembly of the African Seismological Commission, 2-5 April, Luxor-Aswan, Egypt.
18. Ismail-Zadeh, A., A. Korotkii, I. Tsepelev, D. Kovtunov, and O. Melnik, Boundary condition optimal control problem in lava flow modelling. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-10076, 2016. EGU General Assembly 2016.
19. Ismail-Zadeh, A., O. Melnik, A. Korotkii, I. Tsepelev, and D. Kovtunov, Determination of thermal/dynamic characteristics of lava flow from surface thermal measurements. *Geophysical Research Abstracts*. Volume 18, EGU2016-10146, 2016. EGU General Assembly 2016.
20. Ismail-Zadeh, A., A. Korotkii, D. Kovtunov, O. Melnik, and I. Tsepelev, Boundary condition optimal control problem in lava flow modelling. In Abstract Book of the 31st Conference on Mathematical Geophysics, 6-10 June 2016, Paris, France: 132.
21. Kerzhaev, A.P., M.D. Kovalenko, and I.V. Menshova, The features of analytical solutions of boundary value problems of the elasticity theory for finite domains

- with angular points of a boundary. In ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Volume 2, 2016, pp. 3107-3112, EID: 2-s2.0-84995495434.
22. Kerzhaev, A.P. M.D. Kovalenko, and I.V. Menshova. On the analytical solutions of boundary value problems of the elasticity theory for finite domains with the angular points of a boundary and the changing points of the type of boundary conditions. In 40th Solid mechanics conference. 29.08 - 2.09 2016, Warsaw, pp. 1-2. Abstract ID P156.
23. Novikova, O., and A. Gorshkov, Seismogenic nodes defined by pattern recognition in the central part of the Alpine-Himalayan belt. In 14th International Conference of the Geological Society of Greece, 25-27 May, 2016, Thessaloniki, Greece.