

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 550.3

№ госрегистрации 115080610012

Инв. № 2019-4



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

докт. физ.-мат. наук

А.И.Горшков

«30» января 2019 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ И ИЗУЧЕНИЕ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ  
(заключительный, 2016-2018 годы)

Заведующий лабораторией математических  
проблем нелинейной динамики  
канд. физ.-мат. наук

М.Г. Шнирман

Заведующий лабораторией  
геодинамики  
докт. физ.-мат. наук

В.А. Желиговский

Москва 2019

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
директор ИТПЗ РАН  
докт. физ.-мат.наук

А.И. Горшков

Ответственные исполнители:

ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

И.А. Воробьева

гл. науч. сотр., зав. лаб.  
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

Подписи сотрудников ИТПЗ РАН  
заверяю.

Ученый секретарь ИТПЗ РАН к. ф.-м. н.



А.К. Некрасова

**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 550.3  
№ госрегистрации 115080610012  
Инв. № 2019-4

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИТПЗ РАН

докт. физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ А.И.Горшков

«    »

2019 г.

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ И ИЗУЧЕНИЕ**  
**ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**  
**(заключительный, 2016-2018)**

Заведующий лабораторией математических  
проблем нелинейной динамики  
канд. физ.-мат. наук

М.Г. Шнирман

Заведующий лабораторией  
геодинамики  
докт. физ.-мат. наук

В.А. Желиговский

Москва 2019

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
директор ИТПЗ РАН  
докт. физ.-мат. наук

А.И. Горшков

Ответственные исполнители:

ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

И.А. Воробьева

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 35 с., 8 рис., 62 источника

ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ, МАГНИТНОЕ ДИНАМО, ГЕТЕРОКЛИННЫЕ ЦИКЛЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЛОКОВЫХ СТРУКТУР, НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКИЙ РЕГИОН, МЕТОДЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ, МАНТИЙНАЯ КОНВЕКЦИЯ

Исследования, проводимые по теме с 2016г. по 2018 г., включали разработку метода статистической инверсии для палеомагнитных данных; анализ расхождений между данными геомагнитных наблюдений и моделями; изучение моделей магнитного динамо и гетероклинных циклов, возникающих в конвекции; моделирование динамики блоковых структур в Гималаях и применение результатов моделирования для оценки сейсмической опасности; проведение морфоструктурного районирования внутриплитовых территорий северо-востока Египта и Французского Центрального Массива для определения мест возможного возникновения землетрясений; изучение рельефа и тектоники океанического дна Норвежско-Гренландского региона (Северная Атлантика); разработку методов теории упругости, применимых к изучению напряженного состояния земной коры; построение и анализ моделей мантийной конвекции; моделирование мантийной конвекции; изучение строения континентальной коры.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Анализ палеомагнитных данных	7
2.2. Исследование моделей магнитного динамо и гетероклинных циклов, возникающих в конвекции	9
2.3. Моделирование динамики блоковых структур	13
2.4. Прямые и обратные задачи геодинамики	15
2.5. Морфоструктурное районирование сейсмоактивных регионов	16
2.6. Изучение рельефа и тектоники океанического дна Норвежско-Гренландского региона	18
2.7. Применение методов теории упругости к решению задач, имеющих отношение к изучению напряженного состояния земной коры	21
2.8. Моделирование мантийной конвекции	24
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	29

## 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 разработку метода статистической инверсии для палеомагнитных данных и анализ расхождений между данными геомагнитных наблюдений и моделями в ситуации, когда эти расхождения демонстрируют негауссовское поведение.

Продолжены работы по исследованию моделей магнитного динамо, в частности, закончена работа по изучению кинематической генерации магнитного поля течениями электропроводной жидкости с кинематической спиральностью, равной 0 в каждой точке пространства. Обнаружено длинномасштабное кинематическое динамо, работа которого основана на совместном функционировании двух важнейших механизмов генерации длинномасштабного магнитного поля:  $\alpha$ -эффекта и анизотропной отрицательной вихревой диффузии.

Исследована устойчивость так называемых псевдопростых гетероклиных циклов. Проведено исследование простых гетероклиных сетей в  $R^4$ . Исследована устойчивость гетероклиной сети, состоящей из трех гетероклиных циклов, в динамической системе, полученной ограничением уравнений конвекции Буссинеска на 6-мерное инвариантное подпространство 12-мерного центрального многообразия.

Опровергнуто распространенное мнение физической теории магнитного динамо, согласно которому способность течения электропроводной жидкости генерировать магнитное поле связано с наличием у него ненулевой средней кинематической спиральности.

В результате численных экспериментов с моделью блоковой структуры Гималаев впервые с помощью такой модели получены долгосрочные сценарии накопления упругих напряжений и возникновения сильнейших землетрясений. Разработан подход к анализу сейсмической опасности, основанный на инструментально зарегистрированных, исторических и модельных землетрясениях, получаемых в модели блочно-разломной динамики, и приведены оценки сейсмической опасности.

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.

Построены схемы морфоструктурного районирования северо-восточной части Африки, Французского Центрального массива и Эллинид, которые использованы для определения мест возможного возникновения

сильных землетрясений в этих регионах. Результаты МСР внутриплитовых областей северо-востока Африки и Французского Центрального Массива показали, что в этих районах как и в высокосейсмичных молодых горных поясах, положение эпицентров землетрясений контролируется узлами пересечения морфоструктурных линеаментов.

Изучены неоднородности рельефа океанического дна Норвежско-Гренландского региона. Севернее хребта Мона в рельефе дна выделены линейно вытянутые субширотные морфоструктуры (MS), представляющие собой горстовые хребты разделенные прогибами, даны их характеристики.

Выполнен ряд исследований по получению и анализу точных решений задач теории упругости, которые могут быть использованы для изучения напряженного состояния земной коры. В частности, получены точные решения различных основных и смешанных задач двумерной теории упругости и теории изгиба тонких плит в конечных канонических областях, включая прямоугольные пластины с разрывами сплошности.

В рамках исследований по моделированию мантийной конвекции выполнено численное моделирование конвекции в мантии, воспроизводящие принципиальные структуры её глобального строения и конвективных течений. Показано, что пульсации плюмов могут возникать и при простой тепловой конвекции в однородной мантии. Выяснена природа мантийных плюмов и их эволюция. Показано, что континентальная литосфера также росла при остывании под объединившимися протоконтинентами.

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Анализ палеомагнитных данных

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 статьях [8, 27].

Разработан метод статистической инверсии для палеомагнитных данных, использующий кубические сплайны для описания поведения поля во времени, и выполнена его реализация в виде общедоступной компьютерной программы на языке C++. Программа отлажена и снабжена описанием. Получено Свидетельство о государственной регистрации этой программы [62]. Она может работать с набором любых палеомагнитных данных с указанием их точности, то есть набором данных вида: время  $T$ ; точность  $T$ ; координаты сайта; склонение  $D$ ; точность  $D$ ; наклонение  $I$ ; точность  $I$ ; интенсивность  $F$ ; точность  $F$ . Причем в каждой записи необходимы лишь указания координат и времени и одного или нескольких параметров из IDF с указанием точности или без оной. Решения ищутся либо в виде кубического сплайна на данном интервале времен с заданной (необязательно равномерной) сегментацией, либо в виде кусочно-постоянных функций. Далее применяется метод бутстрапа варьирования доступных параметров в пределах ошибки и оценивается облако всех возможных решений в терминах квантилей. Соответствующая технология позволяет работать как с реальными данными, так и оценивать эффекты влияния на точность ответа различных характеристик базы данных. Основная трудность при программировании была связана с оптимизацией времени, необходимого для набора достаточных статистик решений, ранее подобные проекты требовали для реальных баз данных существенных затрат времени.

Для описания ошибок в данных обычно используются гауссовские распределения, которые, действительно, уместны во многих практических случаях. Однако в широкой области наблюдений геомагнетизма неоднократно отмечалось, что расхождения между данными наблюдений и моделями часто демонстрируют гораздо более резкие распределения, иногда лучше описываемые распределением Лапласа. Исследована ситуация, когда предполагается, что такое негауссовское поведение, скорее всего, является результатом того, что известно в статистической литературе как смесь распределений. Смеси возникают, когда данные не согласуются с общим

распределением или неправильно нормализованы должным образом, а итоговое глобальное распределение представляет собой смесь различных распределений, за которыми стоят подмножества данных или даже отдельные данные. Приведены примеры того, как такие смеси могут привести к распределениям намного более резким, чем гауссовы распределения, и изучены причины, по которым такие смеси, вероятно, являются причиной негауссовых распределений, в наблюдениях геомагнетизма. Показано также, что при правильном подборе наборов данных, основанном на геофизических критериях, в некоторых случаях можно избежать статистической смеси и получить в большей степени гауссовское поведение. Сформулированы некоторые общие рекомендации и обнаружено, что хотя статистическая смесь всегда стремится заострить полученное распределение, это не обязательно приводит к распределению Лапласа.

Данные палеомагнитной интенсивности были рассмотрены в контексте палеомагнитных вариаций эпохи Брюнес. Аналогичное сравнение ранее было подготовлено по данным палеомагнитных направлений. Получены поправки (в терминах спектрального по пространству разложения) к широко известной гипотезе осевого диполя. Эти поправки с одной стороны говорят об информации, которую можно извлечь из палеомагнитных интенсивностей вулканитов, с другой стороны, эти поправки несколько отличаются от аналогичных поправок, полученных по данным направлений. Тем самым получается оценка точности палеоинтенсивностей в терминах точности палеонаправлений. Кроме того прояснена роль и тех и других в реальных оценках гипотезы осевого диполя для последнего примерно миллиона лет.

Путем анализа статистических характеристик геомагнитного поля, генерируемого в численных моделях геодинамо, показано, что распределение сферических гармонических коэффициентов в ряде случаев не является гауссовым, а сходно с распределением Лапласа. Форма соответствующих гистограмм зависит от масштаба времени, что позволяет дать интерпретацию полученных данных в терминах смеси гауссовых распределений. Аналогичные эффекты, связанные с перемежаемостью, экспериментально наблюдались в турбулентных потоках жидкости. Таким образом, поведение вековых вариаций магнитного поля Земли, возможно, следует описывать в терминах смеси нескольких гауссовских стационарных процессов, отвечающих переключениям разных режимов генерации геодинамо. Полученные результаты опубликованы в статье [26].

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

Закончена работа по изучению кинематической генерации магнитного поля течениями электропроводной жидкости с кинематической спиральностью равной 0 в каждой точке пространства. Показано на большом числе численных примеров, что бездивергентные пространственно-периодические стационарные течения способны генерировать как короткомасштабные поля, так и длинномасштабные поля, причем длинномасштабная кинематическая генерация поточно неспиральными течениями может быть с использованием механизма как магнитного  $\alpha$ -эффекта, так и отрицательной магнитной вихревой (турбулентной) вязкости.

Выведены формулы для магнитных мод вида гармоник Фурье для оператора  $\alpha$ -эффекта общего вида (т.е., не обязательно симметричного), обобщающих ABC-поток В.И. Арнольда, и их собственные значения. Показано, что максимальный (относительно направления единичного волнового вектора) инкремент роста (в масштабе медленного времени  $T_1 = \varepsilon t$ , где малый параметр  $\varepsilon$  – отношение пространственных масштабов,  $t$  – быстрое время порядка времени оборота вихря в жидкости) равен

$$(\max(\alpha_1\alpha_2, \alpha_2\alpha_3, \alpha_1\alpha_3))^{1/2},$$

где  $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3$  – собственные значения симметризованного тензора  $\alpha$ -эффекта; он неотрицателен и равен 0 только, когда  $\alpha_2 = 0$ .

С целью создания достаточного запаса течений для численного экспериментирования было построено 6 семейств поточно неспиральных полей, 4 из которых задаются формулами, а для еще одного – полоидального – предложена аналитически-вычислительная процедура. Например, т.н. "косинусные" течения ("семейство С") имеют вид

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = (n(\mathbf{b}_1 \sin(\mathbf{a} \cdot \mathbf{x}) + a_1 \sin(\mathbf{b} \cdot \mathbf{x})) \cos n x_3, n(\mathbf{b}_2 \sin(\mathbf{a} \cdot \mathbf{x}) + a_2 \sin(\mathbf{b} \cdot \mathbf{x})) \cos n x_3, -(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})(\cos(\mathbf{a} \cdot \mathbf{x}) + \cos(\mathbf{b} \cdot \mathbf{x})) \sin n x_3).$$

где скаляр  $n$  и векторы  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  – константы; семейства  $V_1$  –

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = (C_1 S_1 \dot{S}_2 \dot{S}_3, C_2 \dot{S}_1 S_2 \dot{S}_3, C_3 \dot{S}_1 \dot{S}_2 S_3),$$

где  $C_j$  – произвольные константы, сумма которых равна 0,  $S_j$  – произвольная функция, аргумент которой – декартова переменная  $x_j$ , точка обозначает производную по нему; семейства  $V_2$  –

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = (C_1 S_2 S_3, C_2 S_1 S_3, C_3 S_1 S_2),$$

где  $C_j$  - произвольные константы,  $S_j$  - как и для  $V_1$ .

В процессе выполнения описанных выше исследований обнаружено длинномасштабное кинематическое динамо, работа которого основана на совместном функционировании двух важнейших механизмов генерации длинномасштабного магнитного поля:  $\alpha$ -эффекта и анизотропной отрицательной вихревой диффузии. Оно реализуется в потоках, антисимметричных по некоторой координате (иными словами, зеркально-антисимметричных относительно соответствующей декартовой координатной плоскости). Эти механизмы отвечают за гармонические колебания магнитного поля с конечным периодом в масштабе медленного времени  $T_1 = \varepsilon t$  и его рост в масштабе медленного времени  $T_1 = \varepsilon^2 t$ , соответственно.

Изучена структура тензоров  $\alpha$ -эффекта и вихревой диффузии при наличии такой антисимметрии. Выведено выражение для инкремента роста длинномасштабных магнитных мод в этом динамо через элементы тензоров  $\alpha$ -эффекта и вихревой диффузии. Как функция азимутального угла сферической системы координат, ось которой совпадает с декартовой осью, относительно которой поток антисимметричен, инкремент роста сингулярен при любой магнитной молекулярной диффузии. При пересечении точки сингулярности инкремент меняет знак. Соответственно, это динамо работает при любых коэффициентах магнитной молекулярной диффузии  $\eta$  (в малом интервале длины порядка  $\eta^{-3}$  вокруг точки сингулярности для больших  $\eta$ ) при достаточно сильном разделении масштабов. При этом оно саморазрушается из-за роста магнитного поля и действия силы Лоренца на временах порядка  $\varepsilon^{-2}$ , а не  $\varepsilon^{-1}$ , как при действии  $\alpha$ -эффекта.

Астрофизические динамо характеризуются магнитными числами Прандтля  $R_m$ , изменяющимися в очень широком диапазоне, от очень малых (например, в межзвездной среде) до очень больших (например, геодинамо). Динамо при больших  $R_m$  особенно сложны для теоретического анализа. Поэтому указанный вид динамо может представлять непосредственный интерес для астрофизических приложений. Проведено численное исследование для двух течений с антисимметрией указанного типа при разных коэффициентах молекулярной диффузией.

Перечисленные работы по длинномасштабным кинематическим динамо призваны моделировать процессы генерации астрофизических средних магнитных полей посредством короткомасштабной турбулентности. Такое моделирование более точно, если рассматриваются периодические по времени поля скорости. Разработка математического обеспечения для проведения таких вычислительных экспериментов показала, что такие коды существенно более ресурсоёмки, поскольку кроме трехмерных преобразований Фурье по пространственным переменным они включают в себя преобразования Фурье по четвертой переменной – быстрому времени.

Инвариантное множество динамической системы, состоящее из стационарных состояний и гетероклинных траекторий между этими стационарными состояниями, называется гетероклинный циклом. Связное

множество, являющееся объединением конечного числа гетероклинических циклов, называется гетероклинической сетью. В системе общего положения гетероклинические циклы не являются структурно устойчивыми, однако в симметричных системах это возможно. Инвариантное множество динамической системы называется асимптотически устойчивым, если оно притягивает все начальные значения из некоторой своей малой окрестности. Множества, не являющиеся асимптотически устойчивыми, могут быть устойчивыми в более слабом смысле, а именно, существенно асимптотически устойчивыми, или фрагментарно асимптотически устойчивыми. Инвариантное множество динамической системы называется фрагментарно асимптотически устойчивым, если его область притяжения имеет положительную меру. Если при этом вблизи такого множества мера его области притяжения асимптотически велика, то такое множество называется существенно асимптотически устойчивым.

Исследована устойчивость так называемых псевдопростых гетероклинических циклов. Найдены все конечные подгруппы  $\Gamma \subset O(4)$  такие, что в  $\Gamma$ -эквивариантных динамических системах могут существовать псевдопростые гетероклинические циклы. Доказано, что в случае  $\Gamma \subset SO(4)$  такие циклы всегда неустойчивы, даже в самом слабом смысле. Найдены примеры подгрупп  $O(4)$ , для которых возможно существование фрагментарно асимптотически устойчивых циклов. Исследованы бифуркации, в которых от цикла ответвляется периодическая орбита.

Проведено исследование простых гетероклинических сетей в  $\mathbb{R}^4$ . Показано, что в  $\mathbb{R}^4$  возможно существование пяти различных типов простых гетероклинических сетей. Найдены все конечные подгруппы  $\Gamma \subset O(4)$  такие, что в  $\Gamma$ -эквивариантных динамических системах могут существовать простые гетероклинические сети, и определен тип такой сети для каждой из подгрупп. Доказаны условия фрагментарной асимптотической устойчивости циклов в таких сетях.

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. 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 опубликованы статьи [10].

Доказано, что эта сеть не является асимптотически устойчивой, однако она может быть существенно или фрагментарно асимптотически устойчива. Показано, что один из этих циклов всегда неустойчив, а из двух оставшихся устойчивым может быть не более чем один. Для этих двух циклов получены условия для фрагментарной и существенной асимптотической устойчивости

в терминах собственных значений оператора линеаризации вблизи стационарных состояний. Доказано, что гетероклиная сеть фрагментарно асимптотически устойчива только, если устойчив один из составляющих ее циклов. Исследовано поведение траекторий вблизи гетероклиной сети в 6-мерной динамической системе, полученной из уравнений конвекции Буссинеска ограничением на центральное многообразие. Доказано, что сеть частично асимптотически устойчива только, если устойчив один из гетероклиных циклов, образующих эту сеть. Также доказано, что такая гетероклиная сеть не является асимптотически устойчивой. Доказательство отсутствия асимптотической устойчивости обобщено для гетероклиных сетей более общего вида. Результаты опубликованы в статьях [30, 50].

Широко распространено мнение, что для генерации магнитного поля стационарное течение должно иметь ненулевую кинетическую спиральность. Построено 6 семейств стационарных течений несжимаемой жидкости, у которых плотность спиральности поля вихря равна нулю в каждой точке пространства. Течения четырех семейств представлены аналитическими выражениями, а течения пятого могут быть найдены комбинированной численно-аналитической процедурой. Течения четырех из этих пяти семейств имеют нулевой спектр спиральности. Для пробных течений из этих пяти семейств вычислены инкременты роста короткомасштабного магнитного поля, а также тензоры магнитного  $\alpha$ -эффекта (для не центрально-симметричных течений) и вихревой магнитной диффузии (для центрально-симметричных). Показано, что при умеренных магнитных числах Рейнольдса (менее 200) существенная часть рассмотренных течений генерируют как короткомасштабные поля, так и – механизмами  $\alpha$ -эффекта или вихревой диффузии – длинномасштабные. Таким образом, миф о важности для генерации магнитного поля спиральности течений в любых ее инкарнациях исчерпывающе опровергнут. Рис. 1 иллюстрирует результаты исследования, по которым опубликована статья [51] и сделан доклад [59].

Асимптотическими методами изучена генерация длинномасштабного магнитного поля стационарными короткомасштабными течениями, имеющими зеркальную антисимметрию. Показано, что в таких течениях возникает магнитный  $\alpha$ -эффект, поддерживающий гармонические колебания длинномасштабного магнитного поля во времени с частотой порядка отношения  $\varepsilon$  малого и большого характерных пространственных масштабов. Взаимодействие флуктуирующей части колеблющегося магнитного поля с потоком создает анизотропную магнитную диффузию, зависимость которой от направления волнового вектора при любой величине молекулярной магнитной диффузии имеет сингулярность. Вследствие этого, в таких потоках развивается отрицательная магнитная диффузия, и при любой молекулярной диффузии они способны генерировать длинномасштабное магнитное поле, инкремент роста которого порядка  $\varepsilon^2$ . Когда направление волнового вектора совпадает с направлением, при котором вихревая диффузия сингулярна, инкремент роста длинномасштабного магнитного поля оказывается порядка  $\varepsilon^{3/2}$ . Указанный механизм длинномасштабного динамо

исследован численно. Результаты опубликованы в статье [41] и вошли в доклады [57, 58]. На программу для ЭВМ, созданную в рамках этих работ, получено Свидетельство о государственной регистрации [40].

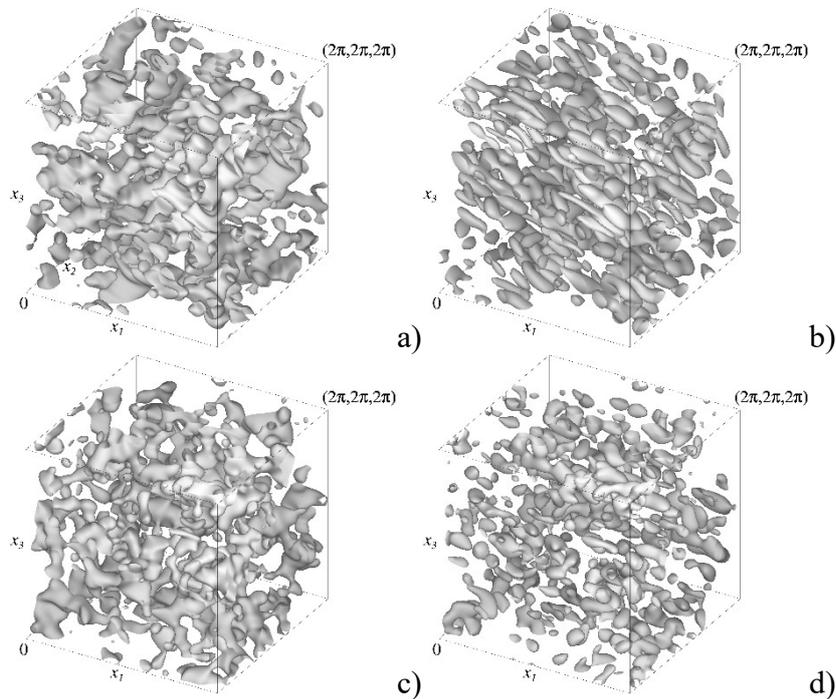


Рисунок 1. Изоповерхности плотности кинетической энергии  $|v|^2$  (a,c) и энергии завихренности  $|\text{rot}v|^2$  (b,d) на уровне  $1/3$  соответствующего максимума для двух пробных течений с поточечно нулевой спиральностью и ненулевым спектром спиральности, для которых генерация короткомасштабного магнитного поля начинается в четном (a,b) и нечетном (c,d) инвариантном подпространствах.

### 2.3. Моделирование динамики блоковых структур

В результате численных экспериментов с моделью блоковой структуры Гималаев впервые с помощью такой модели получены долгосрочные сценарии накопления упругих напряжений и возникновения сильнейших землетрясений. Моделирование адекватно воспроизводит основные свойства сейсмичности Гималаев: локализация, максимальные магнитуды модельных землетрясений, а также длительность сейсмических циклов (рис. 2), варьирующая от 700 до 2100 лет на различных сегментах Гималайской дуги хорошо согласуются с данными сейсмической истории региона и результатами палеосейсмологических исследований. Моделирование показало зависимость накопления упругих напряжений не только от относительных скоростей и реологии на конкретных разломах, но и от геодинамики окружающих литосферных блоков. Результаты моделирования указывают на высокую вероятность сильных событий в западном Непале и меньшую их вероятность в Ассаме и Кашмире. Полученные результаты опубликованы в статье [31].

Понимание динамики литосферы, локализации тектонических напряжений, землетрясений и сейсмических опасностей значительно продвинулось в последние десятилетия. Хотя землетрясения в основном связаны со значительной уязвимостью общества, всеобъемлющие оценки сейсмических опасностей и прогнозирование землетрясений могут способствовать принятию превентивных мер, направленных на снижение воздействия землетрясений. Моделирование динамики литосферы и моделирование землетрясений в сочетании с анализом сейсмической опасности может обеспечить лучшую оценку возможных сотрясений грунта вследствие землетрясений. На основе модели блочно-разломной динамики (МБРД), были смоделированы землетрясения как результат динамики литосферы и изучены свойства разломов и региональных движений. Представленные модели анализировались с точки зрения воспроизводства особенностей наблюдаемой сейсмичности, таких как частотно-магнитудная зависимость, кластеризация землетрясений, возникновения крупных событий, скорость сдвигов по разломам и механизмы землетрясений. Показано применение МБРД для нескольких сейсмоопасных регионов. Разработан подход к анализу сейсмической опасности, основанный на инструментально зарегистрированных, исторических и модельных землетрясениях, и приведены оценки сейсмической опасности. Полученные результаты представлены в докладе [34].

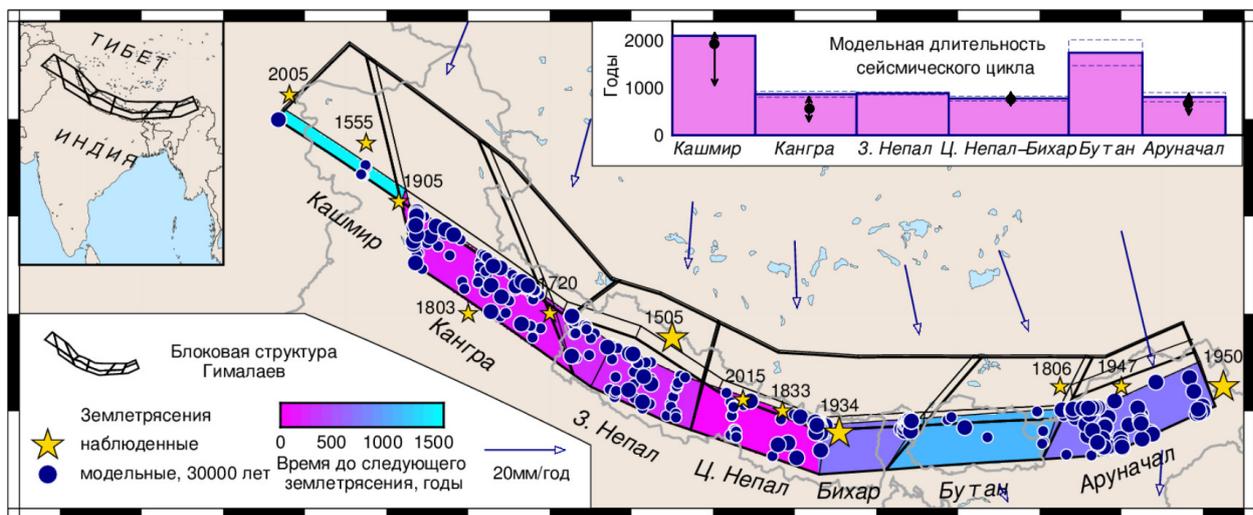


Рисунок 2. Основные результаты моделирования сейсмичности и геодинамики Гималаев. Зарегистрированные землетрясения показаны желтыми звездочками, а модельные – синими кружками. Модельные землетрясения  $M7.5+$  показаны маленькими кружками, а землетрясения  $M8.0+$  большими. Скорости тектонических движений показаны стрелками. Время до следующего сильного землетрясения показано цветом. На верхней врезке показана модельная длительность сейсмического цикла; черные символы показывают данные палеосейсмологических исследований в Гималаях.

## 2.4. 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.

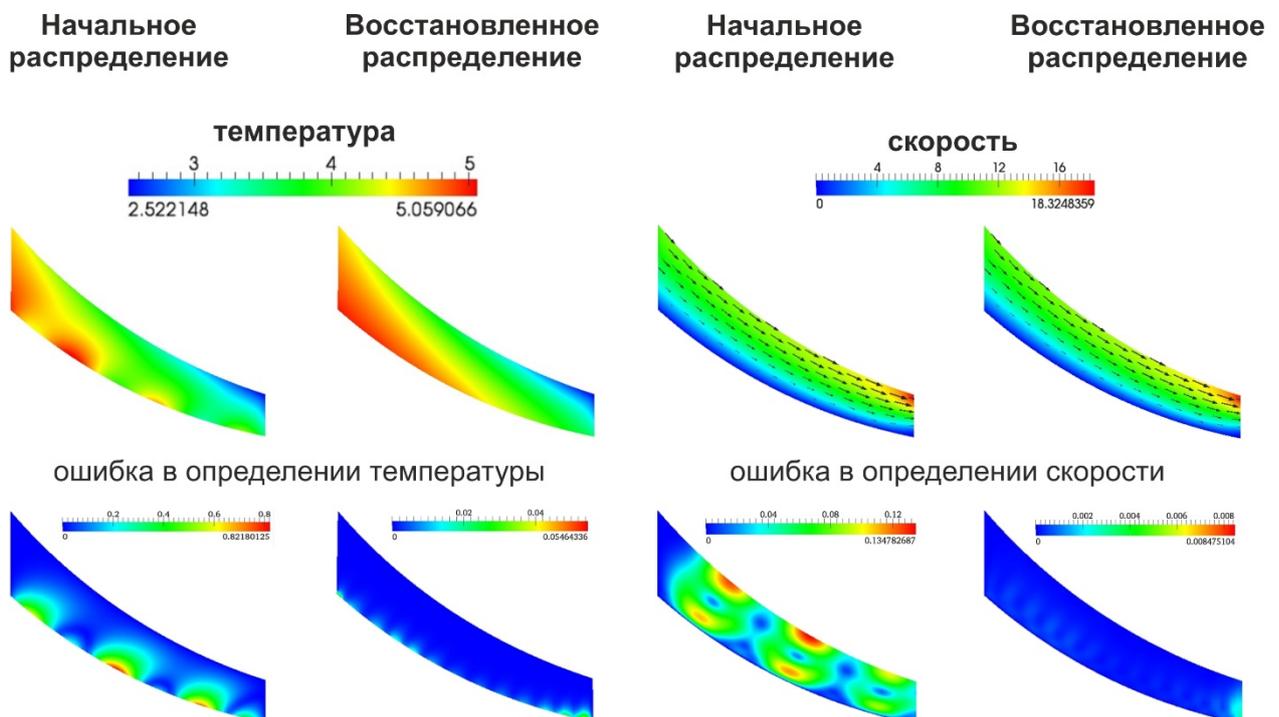


Рисунок 3. Определение лавовой температуры и скорости течений (в безразмерных величинах) в результате применения разработанного метода анализа.

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. 3), так и для зашумленных исходных данных. 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.

## 2.5. Морфоструктурное районирование

Морфоструктурное районирование (МСР) сейсмоактивных территорий проводилось с целью изучения их блокового строения и выделения сейсмоконтролирующих структур - морфоструктурных узлов. Модели блокового строения использовались для моделирования блоковой динамики и сейсмичности Гималаев [31]. На основе схем МСР северо-восточной части Африки, Горной системы Эллинид, Французского Центрального Массива и Каспийско-Черноморского региона было проведено распознавание мест возможного возникновения землетрясений. На рис. 4-5 представлены результаты МСР этих территорий. Результаты представлены в статьях [42, 47-49] и в докладах [16, 17, 23, 60, 61].

На рис. 4 представлена схема морфоструктурного районирования северо-восточной части Африки, которая отображает 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  $M5+$ .

На рис. 5 показана схема МСР Каспийско-Черноморского региона.

На рис. 6 показана схема МСР Центрального Французского Массива и положение эпицентров землетрясений интенсивностью  $I \geq VII$ .

Результаты МСР внутриплитовых областей северо-востока Африки и Французского Центрального Массива показали, что в этих районах как и в

высокосейсмичных молодых горных поясах, положение эпицентров землетрясений контролируется узлами пересечения морфоструктурных линеаментов.

Аналогичное исследование выполнено для Эллинид и представлено в докладе [15].

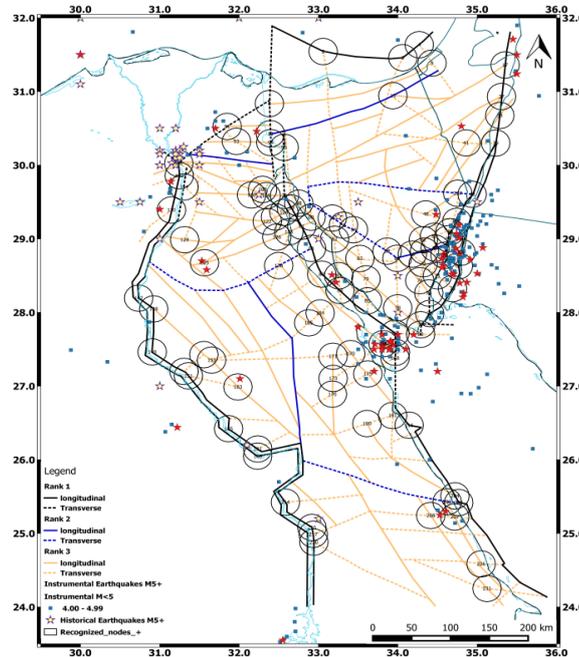


Рисунок 4. Схема морфоструктурного районирования северо-восточной части Африки и сейсмоопасные пересечения линеаментов для  $M5+$ . Толстыми линиями показаны линеаменты первого ранга, средними – второго ранга, тонкими – третьего ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, прерывистые – поперечные линеаменты. Кругами отмечены 25-километровые окрестности пересечений линеаментов, отнесенные в результате распознавания к высокосейсмичным для  $M5+$ .

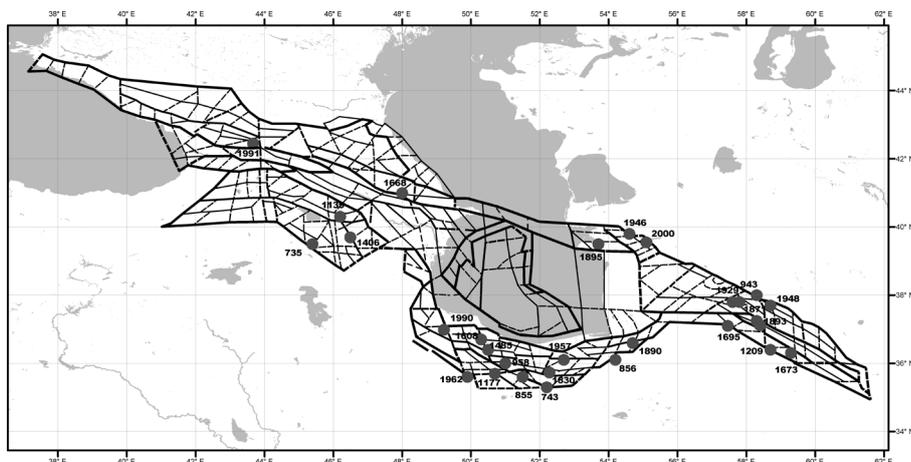


Рисунок 5. Схема морфоструктурного районирования Черноморско-Каспийского региона. Толстые линии – линеаменты первого ранга, средние – второго ранга, тонкие – третьего ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, прерывистые – поперечные линеаменты. Черными кружками показаны эпицентры землетрясений с  $M \geq 7,0$ .

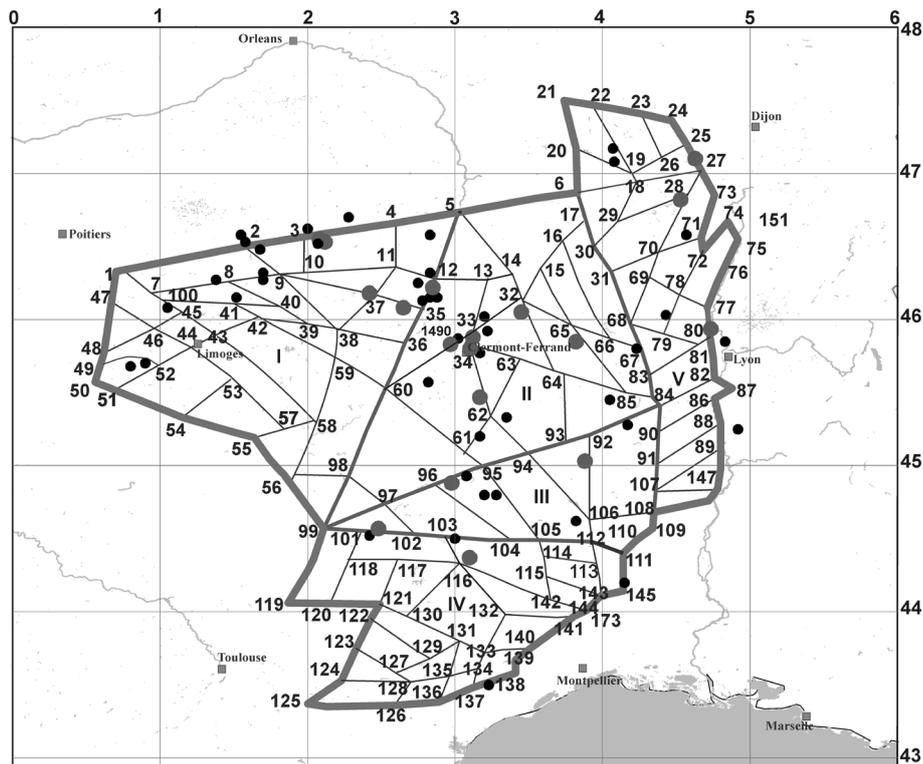


Рисунок 6. Схема МСР Центрального Французского Массива и эпицентры  $I \geq VII$  (крупные кружки).

## 2.6. Изучение рельефа и тектоники океанического дна Норвежско-Гренландского региона

Изучены неоднородности рельефа океанического дна Норвежско-Гренландского региона (рис. 7). Севернее хребта Мона в рельефе дна выделены линейно вытянутые субширотные морфоструктуры (MS), представляющие собой горстовые хребты разделенные прогибами, даны их характеристики. Показано, что выделенные MS 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. Образование этих MS свидетельствует об интенсивной тектонической активности в исследуемом регионе в недавнем геологическом прошлом. 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. Проведенный сейсмостратиграфический анализ позволяет предположить, что выделенные (Berger, D., and W. Jokat, A seismic study along the East Greenland margin from 72° N to 77° N. *Geophys. J. Int.*, 2008, **174**: 733–748) поднятия фундамента в пределах Восточно-Гренландской континентальной окраины в новейшую геологическую эпоху претерпели две фазы вертикальных

тектонических движений. Первая характеризовалась незначительным подъемом, вторая опусканием по сбросу восточного фланга поднятия с амплитудой вертикального смещения до 800 м. Своеобразным «очагом» этих тектонических движений, на наш взгляд, являлась зона Ян-Майенского трансформного разлома. Результаты представлены в докладах [36, 37].

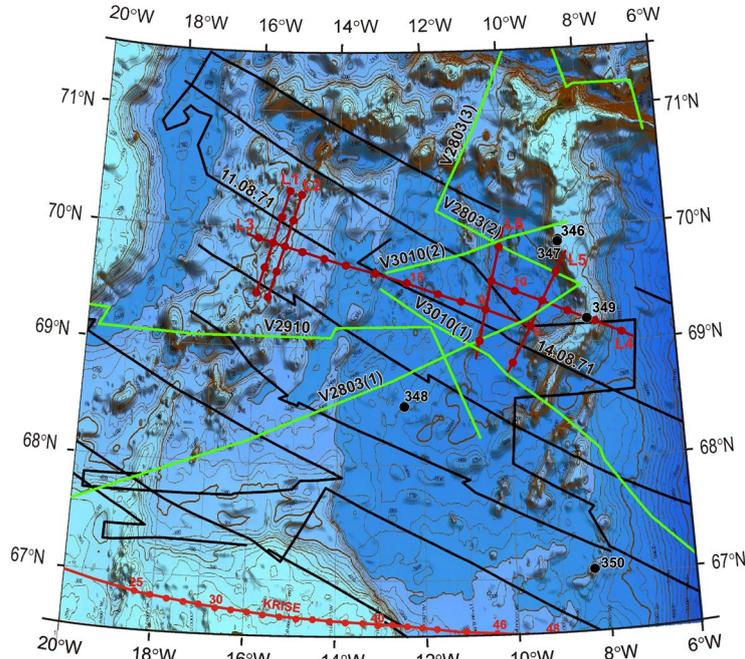


Рисунок 7. Обзорная карта района исследований. Батиметрическая основа SRTM30.v.4. Красные линии (L1-L6) и «KRISE» – глубинные сейсмические зондирования, черные линии (11.08.71) – непрерывное сейсмическое профилирование НСП, зеленые (V2910) – профили НСП судна Вима. Черные кружки с номером – скважины глубоководного бурения (Гломар Челленджер, рейс 38). Для контрастности рельефа дна глубина воды на SRTM30.v.4 уменьшена на 1500 м.

Намечены региональные субмеридиальные тектонические нарушения, представляющие сбросы, которые формируют ступенчатый характер Исландского плато. Ступени поступательно погружаются с запада на восток. К разломным зонам приурочены магматические образования в виде даек, в ряде случаев они прорывают осадочный чехол, что свидетельствует об их молодом возрасте. В центральной части Исландского плато по особенностям строения земной коры намечена рифтовая структура, приуроченная к магнитной аномалии С5b. Выполненный анализ результатов глубинных исследований свидетельствуют, что в пределах Исландского плато земная кора (верхняя и нижняя ее части) регионально наклонена с запада на восток. При этом в рельефе поверхности нижней части коры отмечается куполообразное поднятие (ДС-17-15), над которым мощность верхней части коры (слой 2) имеет наименьшее значение, а мощность слоя 3 повышена. К западу и востоку от поднятия в рельефе нижней части коры слой 2 имеет максимальные значения вдоль профиля ГСЗ, такое же повышенное значение

мощности приурочено и к рифтовой долине хр. Колбейнсей. В рельефе поверхности верхней части коры выделяются блоки, поступательно опускающиеся по сбросам в направлении с запада на восток и маркирующие обстановку растяжения земной коры. Куполообразное поднятие в рельефе поверхности нижней части коры расположено между магнитными аномалиями С5 и С5В (рис. 8).

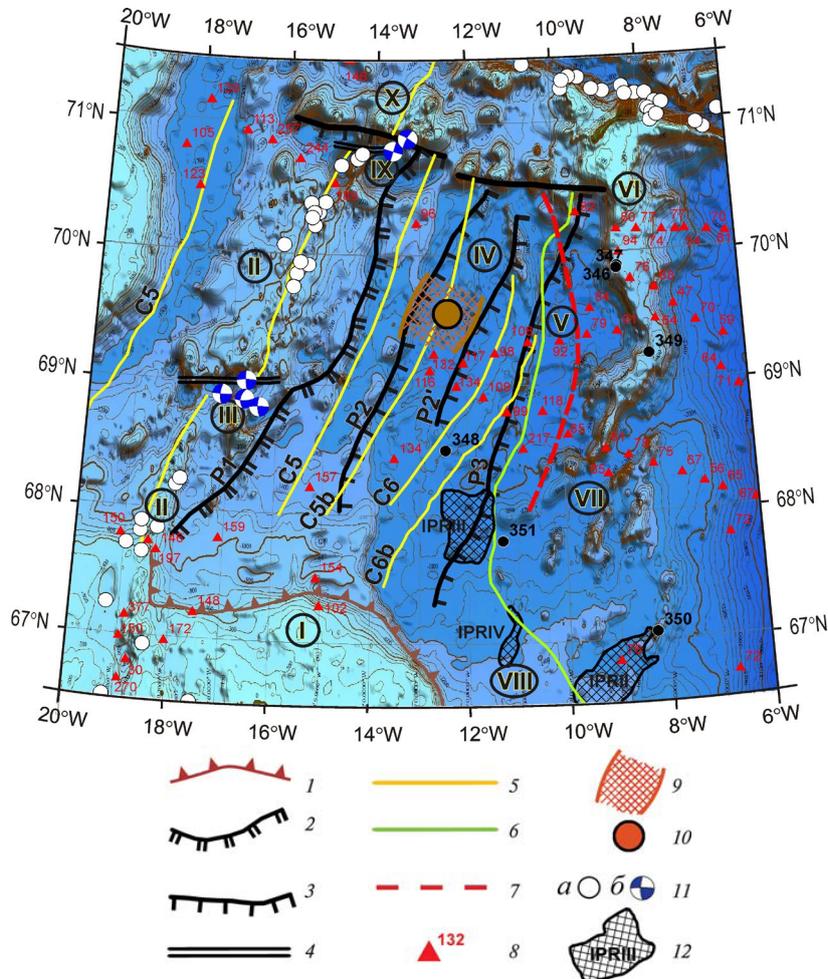


Рисунок 8. Корреляционная схема результатов исследований океанского дна Северной Атлантики. 1 – граница шельфа о. Исландия; 2 – морфологическая граница хр. Колбейнсей (P1); 3 – разломные нарушения (сбросы P2, P2', P3); 4 – трансформные разломы; 5 – оси магнитных аномалий; 6 – граница континент–океан; 7 – граница между областями повышенных и нормальных величин теплового потока; 8 – значения теплового потока, мВт/м<sup>2</sup>; 9 – предполагаемая рифтовая структура; 10 – область наименьшей мощности верхней части океанической коры; 11 – эпицентры землетрясений с  $M \geq 4$  (а) и механизмы очагов землетрясений (по сайту в Интернете <http://www.globalcmt.org/>) (б); 12 - рифтовые центры.

Наименьшая мощность верхней части коры и наиболее приподнятая область в рельефе нижней части коры совпадают с аномалией С5В и разломными зонами P2 и P2', намеченными по данным ГСЗ, НСП и рельефу океанского дна. Интересно, что промежуточная ось расширения дна в

пределах Исландского плато коррелирует с подъемом поверхности нижней коры, минимальной мощностью верхней части коры, утолщением нижней части коры, магнитной аномалией С5В и региональной разломной зоной P2–P2' (рис. 8). Можно считать, что здесь наблюдаются все признаки рифтовой структуры. Центральная часть Исландского плато и южная область впадины Ян-Майен характеризуются повышенными величинами теплового потока 92–217 мВт/м<sup>2</sup>, по латеральному распределению которых намечена граница между областями повышенных и нормальных значений (рис. 8). Эта граница проходит по центру впадины Ян-Майен и имеет субмеридиальное простираение. По-видимому, она ограничивает зону влияния Исландского мантийного плюма в настоящее время в северо-восточном направлении.

Полученные результаты опубликованы в статьях [32, 56] и вошли в доклады [36, 37].

## 2.7. Применение методов теории упругости к решению задач, имеющих отношение к изучению напряженного состояния земной коры

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.

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).

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].

На примере нечетно-симметричной краевой задачи теории упругости для полуполосы со свободными продольными сторонами изучены особенности точных решений. Решения строятся в виде разложений по функциям Фадля–Папковича, коэффициенты которых определяются с помощью систем функций, биортогональных к ним функций. Решение задачи дается в нескольких постановках. Показано, что решение краевой задачи в

полуполосе не единственно. Из неединственности решения вытекает существование остаточных (начальных, собственных) напряжений. Условия совместности деформаций для полученных решений не выполняются. Физически это означает, что стороны полуполосы, прямолинейные до деформации, искривляются после приложения нагрузки. Обсуждается связь между неединственностью, совместностью деформаций и решением эквивалентной неоднородной задачи. Был рассмотрен механизм образования разрывов путем сброса остаточных напряжений и показано, что образование разрывов может сопровождаться поворотами и перемещениями фрагментов областей как недеформируемых. Сформулированы строгие условия, при которых поворотов и перемещений фрагментов областей как абсолютно жестких не возникает.

Рассмотрена задача об образовании разрыва в полосе и прямоугольнике со свободными сторонами в результате сброса остаточных напряжений. Формулы для остаточных напряжений и для тех перемещений, которые возникают при их сбросе, имеют вид рядов по собственным функциям Фадля–Папковича. Коэффициенты рядов определяются в простом замкнутом виде по заданным на разрыве перемещениям при помощи функций, биортогональных к функциям Фадля–Папковича. Показано, что принципиальное отличие классического решения задачи для полосы с разрезом от решения в виде рядов по функциям Фадля–Папковича заключается в том, что в классическом решении продольные стороны полосы прямолинейны до деформации и остаются прямолинейными после деформации (за счет добавления или удаления материала).

Получены точные решения различных основных и смешанных задач двумерной теории упругости и теории изгиба тонких плит в конечных канонических областях. В частности, для прямоугольных пластин с разрывами сплошности. Полученные решения были использованы для построения новых моделей очага землетрясений, в которых разрывы в земной коре являются результатом сброса остаточных напряжений. Это позволяет достаточно просто объяснить, в частности, большие значения субгоризонтальных напряжений вдоль разломов и их быстрое затухание, колебательные характер напряжений, жесткие смещения и повороты фрагментов блоков после сброса напряжений и т.д. В основе теории лежит аппарат преобразования Бореля в классе квазицелых функций экспоненциального типа. Показаны причины неэффективности различных приближенных и численных методов решения краевых задач. Это относится не только к теории упругости, но и к другим линейным краевым задачам для дифференциальных уравнений в частных производных.

На основе точного решения бигармонической проблемы теории упругости в полуполосе показана одна из возможных причин тех проблем, которые возникают при приближенном или численном подходе к решению граничных задач, сводящихся к бесконечным системам линейных алгебраических уравнений. Построение точных решений некоторых краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных

невозможно без их продолжений на римановы поверхности. Этот факт важно учитывать при разработке эффективных приближенных и численных методов решения краевых задач.

На примере нечетно-симметричной краевой задачи теории упругости для полуполосы со свободными продольными сторонами исследованы особенности точных решений. Решения строятся в виде разложений по функциям Фадля-Папковича, коэффициенты которых определяются с помощью систем функций, биортогональных к ним функций. Решение задачи дается в нескольких постановках. Показано, что решение краевой задачи в полуполосе не единственно. Из неединственности решения вытекает существование остаточных (начальных, собственных) напряжений. Условия совместности деформаций для полученных решений не выполняются. Физически это означает, что стороны полуполосы, прямолинейные до деформации, искривляются после приложения нагрузки. Изучена связь между неединственностью, совместностью деформаций и решением эквивалентной неоднородной задачи.

Рассмотрена задача об образовании разрыва в полосе со свободными сторонами в результате сброса остаточных напряжений. Формулы для остаточных напряжений и для тех перемещений, которые возникают при их сбросе, имеют вид рядов по собственным функциям Фадля-Папковича. Коэффициенты рядов определяются в простом замкнутом виде по заданным на разрыве перемещениям при помощи функций, биортогональных к функциям Фадля-Папковича.

Рассмотрен класс смешанных краевых задач теории упругости, когда тип граничных условий меняется в точках гладкой границы области. Дана схема построения точных решений. В самом общем случае они ищутся в виде рядов по собственным функциям Фадля-Папковича.

Полученные результаты опубликованы в статьях [28, 29] и представлены в докладах [33, 35, 38, 39].

## 2.8. Моделирование мантийной конвекции

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

Выполнено численное моделирование конвекции в мантии, воспроизводящие принципиальные структуры её глобального строения и конвективных течений. В частности, показано, как при общемантийной конвекции погружающаяся плита наводит долгоживущие циркуляционные течения, питающие срединно-океанический хребет. 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. Полученные результаты опубликованы в статьях [6, 7].

В имеющихся численных моделях мантийные плюмы представляются в виде однородных восходящих струй тепловой конвекции. Пульсации считаются возможными только для термохимических плюмов в композиционно неоднородной мантии. Показано, что пульсации могут возникать и при простой тепловой конвекции в однородной мантии. При этом с ростом интенсивности течение в ножке теплового плюма сначала становится пульсирующим, а затем плюм распадается на совокупность последовательно всплывающих термиков. Для современной мантии периоды пульсации плюмов в нижней мантии могут быть до 10 млн лет, а в верхней - несколько млн лет. Полученные результаты опубликованы в статьях [24, 25].

Катастрофические извержения вулканов типа Йеллоустона и Гавайев порождаются мантийными плюмами. В работе [53] выяснена природа мантийных плюмов и их эволюция. Впервые показано, что основной период гигантских вулканических извержений, составляющий 10 млн. лет вызван не взаимодействием плюма с литосферой (как обычно полагается), а пульсациями ножек плюмов еще в нижней мантии.

Землетрясения возникают при скачкообразном смещении литосферных плит и блоков земной коры по достижении критического напряжения. Природа и эволюция океанической литосферы была выяснена еще несколько десятилетий т.н. Она обусловлена остыванием движущегося вдоль поверхности вещества срединно-океанических хребтов. Однако для эволюции континентальной литосферы количественной модели до сих пор не было построено. Показано, что континентальная литосфера также росла при остывании под объединившимися протоконтинентами. Однако континентальная литосфера много толще океанической, поскольку плавучесть коры не позволяла холодной тяжелой литосфере погружаться в мантию. Другим фактором, выявленным впервые в работе, является то, что в результате теплоэкранирования мантия под континентом прогревается, и это ограничивает рост литосферы. Именно этим объясняется, почему толщина старых архейских кратонов не больше 250 км. По результатам выполненных исследований опубликованы статьи [54, 55].

Кроме землетрясений и вулканизма к глобальным изменениям природной среды можно отнести долговременные изменения уровня мирового океана. В истории Земли при таянии ледников уровень океана повышался до 100 м. При этом почти треть суши покрывалась водой, что вело к катастрофическим изменениям растительного и животного мира. При глобальных тектонических процессах изменения уровня океана могут достигать 200 м. В настоящее время в мировой литературе принято, что при тектонических процессах увеличивается (или уменьшается) глубина дна океана при изменении количества океанических хребтов. При этом уровень океана изменяется синхронно для всех континентов. В работе [43] выявлена новая тектоническая причина долговременных изменений уровня океана. На численных моделях впервые рассчитаны изменения вертикальных положений континентов при их дрейфе. Впервые показано, что они достигают 200 м. Причем это происходит для всех континентов **не**

синхронно. Тот из дрейфующих континентов, который в данное время находится вблизи зоны субдукции, расположен низко, а континент, находящийся вблизи хребта, высоко. При этом сами континенты наклоняются с разницей уровней краев до 200 м. Поскольку в мировой литературе при расчете изменений уровня мирового океана (вызванных тектоническими процессами) всегда производили усреднение по всем континентам, то эти результаты нуждаются в пересмотре. Проведенные автором расчеты объясняют среднюю кривую изменений уровня мирового океана за последний 1 млрд. лет и, в частности, наблюдаемое понижение уровня океана за последние 80 млн. лет.

В работе [52] впервые построена модель коры и осадков для Антарктиды – наименее изученного континента на Земле. Сейсмическая модель коры интегрирована с гравитационными данными, и построена комбинированная модель. Найдены участки аномально тонкой коры в Западной Антарктике (Ross Sea Embayment и the Weddell Sea), а также обширные осадочные бассейны с мощностью осадков 10 км и более.

В работе [46] на основе результатов, полученных в [52] рассчитаны коровые мантийные аномалии для Антарктики и окружающих морей. С помощью точных моделей гравитационного поля GOCO05S и рельефа ETOPO1 получены остаточные мантийные аномалии гравитационного поля. Для западной Антарктики мантийные аномалии велики: положительные до +1800 мГал для региона ледника Ронна и отрицательные до -800 мГал для Земли Мэри Бёрд (вулканическая провинция) и Трансантарктических гор (подтверждает их неколлизионное происхождение). В то же время мантийные аномалии для Восточной Антарктиды гораздо умереннее.

В работе [45] собраны и проанализированы данные о строении и свойствах коры 13 архейских кратонов южных материков, ранее входивших в Гондвану (кратоны Африки, Австралии, Антарктиды и Южной Америки, а также Индийского субконтинента). Построены диаграммы распределений глубин Мохо для каждого кратона. Впервые показано, что диапазон изменений Мохо весьма широк - от 28 до 52 км. Полученные результаты существенно отличаются от ранее сделанных другими авторами выводов о том, что граница Мохо для архейских кратонов относительно плоская. Результаты работы также показывают отличие коры раннего и среднего архея от более поздней по мощности: участки недеформированной ранне- и среднеархейской коры имеют неглубокое Мохо (28-38 км), в то время как позднеархейская или же деформированная кора имеет глубины Мохо до 52 км.

В работе [44] изучена эволюция системы мантия - движущиеся деформируемые континенты. Основным найденным результатом моделирования является согласованность между численными расчетами и бимодальной динамикой реальной Земли: океаническая кора, несмотря на ее положительную плавучесть вблизи поверхности, погружается в зоны субдукции и далее глубоко в мантию. Некоторая часть океанической коры долгое время остается пристыкованной к континентальной окраине. В

отличие от океанической коры, континентальная кора не тонет в зонах субдукции. Континентальная литосфера, несмотря на ее нейтральную плавучесть, также остается на поверхности из-за ее вязкости и сцепления с континентальной корой. Найдено, что при переезде континентом зоны субдукции она исчезает, а потоки в мантии локально реорганизуются. Изучен эффект влияния перехода базальт-эклогит в океанической коре на картину мантийного течения и на движение континентов. Включение этого эффекта в модель значительно изменяет картину мантийных потоков и приводит к явным изменениям в эволюции континентов. Эклогитизированный материал собирается в кучи на границе ядро - мантия, откуда он поднимается с мантийными плюмами на поверхность Земли.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования являются вкладом в изучение геодинамических процессов, относящихся как к литосфере так и более глубинным мантийным оболочкам. Новый метод статистической инверсии для 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 не только с точки зрения создания моделей происхождения и эволюции магнитного поля Земли, но и могут иметь астрофизические приложения. Установлено, что общепринятое положение о важности для генерации магнитного поля спиральности течений не соответствует действительности.

Моделирование динамики блоковой структуры литосферы и землетрясений в дополнение к анализу данных о реальной сейсмичности может обеспечить лучшую оценку сейсмической опасности.

Морфоструктурное районирование сейсмоактивных территорий создает основу для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений и позволяет повысить надежность оценок сейсмической опасности.

Результаты изучения неоднородностей рельефа океанического дна могут оказаться востребованными при оценках океанического дна на нефте-и газоносность и поиске других полезных ископаемых.

Применение новых методов теории упругости для анализа задачи об образовании разрыва в полосе со свободными сторонами в результате сброса остаточных напряжений может представлять интерес с точки зрения изучения процессов образования очагов землетрясений. Численное моделирование мантийной конвекции является вкладом в изучение глубинных геодинамических процессов.

По результатам выполненных исследований опубликованы монография и 36 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах, а также сделано 23 доклада на международных и российских научных конференциях. Получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ.

## 4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах*

**2016 год**

*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*

**2016 год**

- 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 14<sup>th</sup> International Conference of the Geological Society of Greece, 25-27 May, 2016, Thessaloniki, Greece.

*Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах*

#### **2017 год**

24. Evseev, M.N., and V.P. Trubitsyn, The model of whole mantle convection with formation of a long living reservoir feeding the mid-ocean ridge. *Doklady Earth Sciences*, 2017, **476**, 1: 1062-1065, doi:10.1134/S1028334X17090197.
25. Evseev, M.N., and V.P. Trubitsyn, Pulsations and breaks of tails of thermal mantle plumes. *Doklady Earth Sciences*, 2017, **476**, 2: 1193-1194, doi:10.1134/S1028334X17100154.
26. Khokhlov, A.V., F. Lhuillier, and V.P. Shcherbakov, Intermittence and peculiarities of a statistic characteristic of the geomagnetic field in geodynamo models. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2017, **53**, 5: 695-701, doi:10.1134/S106935131705007X.
27. Khokhlov, A., and G. Hulot, On the cause of the non-Gaussian distribution of residuals in geomagnetism. *Geophys. J. Int.*, 2017, **209**, 2: 1036-1047, doi:10.1093/gji/ggx071.
28. Kovalenko, M.D., and I.V. Men'shova, On features of exact solutions of boundary value problems of elasticity theory in the semi-strip. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2017, **4**: 52-64, doi:10.18698/1812-3368-2017-4-52-64.
29. Kovalenko, M.D., I.V. Menshova, and A.P. Kerzhaev, Displacement discontinuity as a result of residual stress relief. In 2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, ICMAE 2017, pp. 179-183, doi:10.1109/ICMAE.2017.8038638.
30. Podvigina, O., and P. Chossat, Asymptotic stability of pseudo-simple heteroclinic cycles in  $R^4$ . *Journal of Nonlinear Science*, 2017, **27**, 1: 343-375, doi:10.1007/s00332-016-9335-4.

31. Vorobieva, I., P. Mandal, and A. Gorshkov, Block-and-fault dynamics modeling of the Himalayan frontal arc: Implications for seismic cycle, slip deficit, and great earthquakes, *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017, **148**: 131-141, doi:10.1016/j.jseaes.2017.08.033.
32. Usenko, S.V., A.N. Boyko, and T.V. Prokhorova, Seafloor relief inhomogeneities and the tectonics of the Greenland-Lofoten Basin in the North Atlantic // *Russ. J. Earth Sci.*, 2017, **17**, 3, ES3002, doi:10.2205/2017ES000598

*Доклады на международных и российских научных конференциях*

**2017 год**

33. Абриков Д.А., Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Бигармоническая проблема теории упругости. Точные решения // Международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященная памяти академика Леонида Ивановича Седова в связи со столетием со дня его рождения. Тезисы докладов. МИАН, Москва, 13-15 ноября 2017 г. С.19-21
34. Исмаил-Заде А.Т. Earthquake simulators and seismic hazard assessment // Школа молодых ученых «Методы комплексной оценки сейсмической опасности», Москва, ИФЗ РАН, 3-7 июля 2017 г.
35. Меньшова И.В. О решении краевых задач теории упругости со смешанными граничными условиями // Тезисы докладов Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики (Fundamental and applied problems of mechanics (FAPM-2017))», посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского (Москва, 24-27 октября 2017 г.). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С.124-125.
36. Усенко С.В., Бойко А.Н., Прохорова Т.В. Особенности тектоники и рельефа океанического дна Гренландского бассейна Северной Атлантики // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Девятые научные чтения Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2017. С.412-416.
37. Усенко С.В., Бойко А.Н., Прохорова Т.В. Сейсмостратиграфический анализ строения кайнозойского осадочного чехла Гренландско-Лофотенского региона // Международная научно-практическая конференция, приуроченная к 45-летию ОАО "МАГЭ", "Современный этап геологического изучения Арктики и континентального шельфа России – проблемы и перспективы освоения минеральных ресурсов", г. Мурманск, 22-23 ноября 2017 года.
38. Menshova, I. The exact and approximate solutions of some boundary value problems in domains with angular points of the boundary. In *The 6th Conference on Computational Mechanics (CCM 2017) 03.01-05.01 2017, Bangkok, Thailand*. Abstract ID: CCM2017\_80008.
39. Menshova, I.V. and M.D. Kovalenko, On boundary-value problems of elasticity theory with mixed boundary conditions. In *The 8th International Conference on*

*Computational Methods (ICCM2017). Guilin, Guangxi, China, July 25th – 29th, 2017 (ID 2450).*

*Программа для ЭВМ*

40. Подвигина О.М., Желиговский В.А. Программа для численного решения уравнения Эйлера, описывающего двумерные течения идеальной несжимаемой жидкости (EULER2D) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661233 от 06 октября 2017 г.

*Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах*

**2018 год**

41. Андриевский А.А., Желиговский В.А., Чертовских Р.А. Отрицательная магнитная вихревая диффузия, вызванная колебательным  $\alpha$ -эффектом // Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность. Материалы XXIII Международной конференции / Ответственные редакторы Н.В. Никитин, Н.В. Попеленская. М.: ООО «МАКС Пресс», 2018. С.18-23, e-ISBN 978-5-317-05812-8 ([http://hit-conf.imec.msu.ru/books/NeZaTeGiUs\\_2018.pdf](http://hit-conf.imec.msu.ru/books/NeZaTeGiUs_2018.pdf)).
42. Новикова О. В., Горшков А. И. Высокосейсмичные пересечения морфоструктурных линейментов Черноморско-Каспийского региона // *Вулканология и Сейсмология*, 2018, № 6, С. 23–31, DOI: 10.1134/S020303061806007X1
43. Трубицын В.П. Дрейф континентов и колебания уровня Мирового океана // *Геофизические процессы и биосфера*, 2018, т.17. № 4. С.41-58, doi:10.21455/GPB2018.4-3.
44. Baranov, A.A., and A.M. Bobrov, Crustal structure and properties of Archean cratons of Gondwanaland: similarity and difference. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, **59**, 5: 512-524, doi:10.1016/j.rgg.2018.04.005.
45. Baranov, A., M. Bagherbandi, and R. Tenzer, Combined gravimetric-seismic Moho model of Tibet. *Geosciences*, 2018, **8**, 12: 461, doi:10.3390/geosciences8120461.
46. Bobrov, A.M., and A.A. Baranov, Modeling of moving deformable continents by active tracers: Closing and opening of oceans, recirculation of oceanic crust // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, **9**, 1: 287-307, doi:10.5800/GT-2018-9-1-0349.
47. Gorshkov, A.I., A.A. Soloviev, and Yu.I. Zharkikh, Recognition of strong earthquake prone areas in the Altai–Sayan–Baikal region. *Doklady Earth Sciences*, 2018, **479**, 1: 412-414, doi:10.1134/S1028334X1803025X.
48. Gorshkov, A., and Y. Gaudemer, Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central. *Journal of Iberian Geology*, 2018, doi:10.1007/s41513-018-0087-x.
49. Novikova, O.V., and A.I. Gorshkov, High seismicity intersections of morphostructural lineaments: the Black-Sea–Caspian region, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2018, **12**, 6: 378-385, doi:10.1134/S0742046318060064.

50. Podvigina, O., S.B.S.D. Castro, and I.S. Labouriau, Stability of a heteroclinic network and its cycles: a case study from Boussinesq convection. *Dynamical Systems*, 2018: 1-37, doi:10.1080/14689367.2018.1486807.
51. Rasskazov, A., R. Chertovskih, and V. Zheligovsky, Magnetic field generation by pointwise zero-helicity three-dimensional steady flow of an incompressible electrically conducting fluid. *Physical Review E*, 2018, **97**, 4: 043201, doi:10.1103/PhysRevE.97.043201.
52. Tenzer, R., Chen W.J., Baranov A., and Bagherbandi M., Gravity maps of Antarctic lithospheric structure from remote-sensing and seismic data. *Pure Appl. Geophys.*, 2018, **175**, 6: 2181-2203, doi:10.1007/s00024-018-1795-z.
53. Trubitsyn, V.P., and M.N. Evseev, Plume mode of thermal convection in the Earth's mantle. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2018, **54**, 6: 838-848, doi: 10.1134/S1069351318060125.
54. Trubitsyn, A.P., and V.P. Trubitsyn, Thermal model of changes in the thickness of the continental lithosphere over time. *Doklady Earth Sciences*, 2018, **481**, 2: 1104-1107, doi:10.1134/S1028334X18080330.
55. Trubitsyn, V.P., and A.P. Trubitsyn, Criterion for change in the particle settling regime in viscous liquid. *Doklady Earth Sciences*, 2018, **482**, 1: 1182-1184, doi:10.1134/S1028334X18090106.
56. Usenko, S.V., A.N. Boiko, and T.V. Prokhorova, Seafloor structure in the North Atlantic region between the Kolbeinsey Ridge and the Jan Mayen Microcontinent. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, **54**, 11: 1504-1516

*Доклады на международных и российских научных конференциях*

**2018 год**

57. Андриевский А.А., Желиговский В.А., Чертовских Р.А. Отрицательная магнитная вихревая диффузия, вызванная колебательным  $\alpha$ -эффектом // Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность. Материалы XXIII Международной конференции / Ответственные редакторы Н.В. Никитин, Н.В. Попеленская. М.: ООО «МАКС Пресс», 2018. С.18-23, e-ISBN 978-5-317-05812-8 ([http://hit-conf.imec.msu.ru/books/NeZaTeGiUs\\_2018.pdf](http://hit-conf.imec.msu.ru/books/NeZaTeGiUs_2018.pdf)).
58. Andrievsky, A.A., V.A. Zheligovsky, and R.A. Chertovskih, Negative magnetic eddy diffusivity caused by the oscillatory alpha-effect. The Third Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Perm, 18-21 June 2018.
59. Chertovskih, R.A., A. Rasskazov, and V.A. Zheligovsky, Magnetic field generation by pointwise zero-helicity flows. The Third Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Perm, 18-21 June 2018.
60. Gorshkov A., Gaudemer Y., Novikova O. (2018) Potential earthquake sources of the largest M7+ earthquakes in the Greek mainland (ESC2018-S6-259). Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological Commission 2-7 September 2018 I Valletta- Malta. Sebastiano D'Amico, Pauline Galea, George Bozionelos, Emanuele Colica, Daniela Farrugia and

Matthew R. Agius (Eds.). Published by Mistral Service Anna Lo Presti Via Romagnosi, 28 98100 - Messina (Italy).

61. Novikova, O., and A. Gorshkov, Seismogenic nodes capable of M6+ and M7+ earthquakes recognized in the Caucasus-Alburz-Kopet Dag region. *Proceedings and Abstract Volume of the 36th National and the 3rd International Geosciences Congress*. 25th-27th February, 2018 Tehran-Iran: 213.

*Программа для ЭВМ*

62. Хохлов А. Кластеризация пространственных направлений (CLD) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660097 от 16 августа 2018 г.