

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

УДК 550.3  
№ госрегистрации 01201281969  
Инв. № 2016-4



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН  
член-корреспондент РАН  
А.А.Соловьев

«21» января 2016 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ, ИЗУЧЕНИЕ  
ЭВОЛЮЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ И ОЦЕНКА  
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ  
(промежуточный, за 2015 год)

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

М.Г. Шнирман

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

А.И. Горшков

Москва 2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

А.Т. Исмаил-Заде

Ответственные исполнители:

зав. лаб.  
докт. физ.-мат. наук

А.И. Горшков

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

В.А. Желиговский

вед. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

О.М. Подвигина

гл. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

А.В. Хохлов

вед. науч. сотр.  
докт. физ.-мат. наук

  
Коваленко

М.Д.Коваленко

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

И.В. Меньшова

ст. науч. сотр.  
канд. геол.-мин. наук

С.В. Усенко

## РЕФЕРАТ

Отчет 14 с., 22 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 2015 году, включали: разработку методов решения прямых и обратных задач геодинамики; рассмотрение математических моделей, описывающих зарождение и развитие разрывов в результате сброса остаточных напряжений; изучение эффектов сжимаемости в уравнениях мантийной конвекции; статистический анализ палеомагнитных данных и разработка методов получения количественных оценок вековых вариаций магнитного поля; исследование динамики корреляционных свойств многомерной нелинейной системы в применении к геомагнитным данным; исследование устойчивости стационарных конвективных магнитных динамо; исследование гетероклинных циклов и сетей, возникающих в конвекции с гексагональной ячейкой периодичности; изучение строения, динамики и сейсмичности осадочного чехла Норвежско-Гренландского бассейна (Северная Атлантика).

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Статистический анализ палеомагнитных данных и разработка методов получения количественных оценок вековых вариаций магнитного поля	7
2.2. Исследование конвективных магнитных динамо и гетероклинных циклов и сетей, возникающих в конвекции, и изучение уравнений мантийной конвекции	8
2.3. Изучение строения, динамики и сейсмичности осадочного чехла	10
2.4. Применение методов теории упругости к изучению напряженного состояния земной коры	11
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	11
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	12

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках подразделов 70 "Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы" и 80 "Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии" Раздела VIII "Науки о Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

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. Исследования проводятся по следующим основным направлениям: оценка сейсмической опасности; разработка и апробация численных алгоритмов для решения прямых и обратных задач геодинамики; создание геодинамических моделей движения континентальных плит с учетом палеомагнитных данных и определение роли плюмтектонических процессов на изменение теплового потока и созревание углеводородов в осадочных бассейнах; изучение эффектов сжимаемости в уравнениях мантийной конвекции.

Характеристики магнитного поля за длительный период времени принято давать в спектральных терминах. Например, Гипотеза Осевого Диполя утверждает, что осреднение всех направлений будет совпадать с направлением осевого диполя. В терминах статистики это гипотеза о математическом ожидании величины, которая наблюдается за длительный период времени. Разумеется, операция усреднения имеет отношение к математическому ожиданию лишь в том случае, когда за это время процесс является стационарным. Аккуратная формулировка подобных гипотез, предложенная Констабл и Паркером называется моделью Большого Гауссовского Процесса (БГП) и состоит в задании таблицы коэффициентов спектрального разложения поля (дипольные члены, квадрупольные и т.д.), рассматриваемых как случайные величины – каждый коэффициент приводится вместе со своим математическим ожиданием и дисперсией. Предполагается также, что все законы распределения гауссовские. Для принятия или отвержения такой гипотезы надо научиться сравнивать соответствующую модель с реальными палеомагнитными данными. Методы такого сравнения разрабатываются и апробируются в рамках исследований по теме. Используемый подход учитывает следующие моменты: экспериментальные данные являются направлениями, то есть имеют геометрическую, а не числовую природу; данные направлений содержат ошибки; данные в разных географических точках с точки зрения модели должны быть устроены весьма по-разному.

Исследование устойчивости стационарных конвективных магнитных динамо и гетероклиных циклов и сетей, возникающих в конвекции с гексагональной ячейкой периодичности, включают изучение зависимости комбинированной анизотропной вихревой диффузии от параметров задачи для стационарных и периодических по времени центрально-симметричных и симметричных относительно вертикальной оси нелинейных конвективных магнитных динамо в плоском вращающемся слое; изучение длинномасштабной неустойчивости, вызванной отрицательной вихревой диффузией; определение всех групп симметрий четырехмерных динамических систем, в которых могут существовать структурно-устойчивые так называемые "очень простые" гетероклиные циклы.

Новые математические модели теории упругости для конечных канонических областей используются для описания напряженного состояния земной коры с целью моделирования разрывов при этом учитываются принципиальные отличия напряженно-деформированного состояния в конечных областях от классических решений для неограниченных областей. Разрабатываются математические модели геометрической и кинематической несовместности в разломных зонах, обусловленных сбросом остаточных напряжений.

Исследования по теме включают также построение геодинамической и сеймостратиграфической модели осадочного чехла Норвежско-Гренландского бассейна (Северная Атлантика) на основе обобщения геолого-геофизических данных.

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Статистический анализ палеомагнитных данных и разработка методов получения количественных оценок вековых вариаций магнитного поля

Ранее было показано, что количественные описания вековых вариаций магнитного поля Земли удобно формулировать на уровне спектрального представления поля (заданием того, как во времени ведут себя дипольные компоненты, квадрупольные и т.д.). На практике спектральное разложение палеомагнитных данных, как правило, неосуществимо по причине их крайней разреженности во времени и пространстве. Сформулирован принципиально новый алгоритм выполнения проверки статистических гипотез о поведении спектра в терминах статистики направлений. Суть алгоритма состоит в том, что модель Большого Гауссовского Процесса (БГП) позволяет явно указать ожидаемую в каждом географическом пункте плотность распределения направлений; следовательно, если модель верна, то данные должны быть согласованы с этой плотностью. Проверка этих согласований на всех данных и является статистической проверкой гипотезы, при этом учтены необходимость правильного учета ошибок в данных и принадлежность палеомагнитных данных географически разным разрезам. Алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ. Эта методика была использована для проверки вообще всех опубликованных моделей по самым большим (но, впрочем, не отличающимся выдающейся точностью) базам данных палеомагнитных направлений. Оказалось, что ровно одна модель Кидлера и Куртийо (QC) пригодна с точки зрения тестов, а прочие довольно уверенно опровергаются. Имеется еще одна модель ТК, которая довольно сильно отличается от модели QC коэффициентами, но с точки зрения одних только направлений от нее отличается слабо. Хотя модель ТК опровергнута тестами по направлениям, она находится гораздо ближе прочих к успешной модели. Небольшое статистическое несогласие модели QC с данными можно явно распознать как известный ранее, но необъясненный пока эффект Уилсона (небольшое преобладание в глобальных коллекциях данных направлений с восточным склонением). На новых и точных данных подтверждено, что разработанный алгоритм решает задачу поиска совместной с данными модели БГП.

В рамках совершенствования разработанного алгоритма решения задачи восстановления глобальной статистической модели магнитного поля Земли по палеомагнитным данным исследованы следующие задачи: математическое моделирование ошибок в методе Телье измерения остаточной намагниченности; статистическое моделирование и выделение нестационарной компоненты магнитной активности Земли путем применения статистической инверсии к конкретным палеомагнитным данным эпохи Брюнес.

Полученные результаты опубликованы в статьях [10, 13].

Геомагнитные данные позволяют не только изучать вариации магнитного поля Земли, но анализировать солнечные вспышки и предсказывать экстремальные магнитные бури, порой приводящие у стихийным бедствиям. Равномерное распределение геомагнитных наблюдений позволяет создавать более точные модели [8].

## 2.2. Исследование конвективных магнитных динамо и гетероклинных циклов и сетей, возникающих в конвекции, и изучение уравнений мантийной конвекции

Разработан метод одновременно быстрого и точного численного решения уравнения Эйлера, описывающего течения несжимаемой идеальной жидкости, основанный на разложении решения в ряд Тейлора по времени. Сходимость этого ряда (т.е., аналитичность решения по времени) доказана авторами метода ранее. Метод имеет произвольный порядок точности и относится ко классу полу-Лагранжевых (т.е. на каждом шагу решение находится в Лагранжевых координатах, после чего интерполируется на стационарную регулярную Эйлеровую сетку), благодаря чему длина шага интегрирования не ограничена критерием Куранта-Фридрихса-Леви. Эффективность отображения данных с равномерной Лагранжевой на Эйлеровую сетку достигается применением в вычислениях каскадной интерполяции. Для эффективного расчета коэффициентов ряда использованы выведенные ранее рекуррентные соотношения. Программно реализован автоматический динамический выбор длины шага интегрирования и порядка аппроксимирующей решение вычисляемой начальной части ряда Тейлора. Метод применим для расчета как двумерных, так и трехмерных течений. Тестовые расчеты двумерных течений показали, что благодаря высокому порядку точности метода (в численных экспериментах – до 25) при большом пространственном разрешении (до  $8192^2$  гармоник Фурье) новый метод в 100-200 раз быстрее традиционных (например, метода Рунге-Кутты 4 порядка). По полученным результатам подготовлена статья, принятая в печать в журнале *Journal of Computational Physics*.

Разработан комплекс программ расчета тензоров комбинированной вихревой адвекции и диффузии в задаче о слабонелинейной устойчивости стационарных конвективных динамо к длинномасштабным возмущениями. Проведено численное и аналитическое исследование амплитудных уравнений, описывающих длинномасштабные возмущения стационарных динамо. Найдено, что возмущения рассмотренных динамо либо затухают, либо за конечное время возрастают до бесконечности. Численно исследована асимптотика возникающей сингулярности возмущений. Полученные результаты опубликованы в статье [9].

Начата разработка программ для вычисления коэффициентов системы амплитудных уравнений для возмущений периодических по времени короткомасштабных конвективных динамо: решена первая вспомогательной



задача - вычислены ядра оператора линеаризации системы и его сопряженного.

Объяснено кажущееся противоречие в оценке эффекта вихревой магнитной диффузии с помощью двух подходов: асимптотическими разложениями и методом тестовых полей. Найдены соотношения для элементов тензора вихревой (турбулентной) диффузии в длинномасштабных кинематических динамо, реализуемых в противоположно ориентированных потоках. Полученные результаты опубликованы в статье [7].

Продолжено исследование т.н. псевдо-простых гетероклинных циклов в  $R^4$ . Рассмотрено поведение траекторий вблизи псевдо-простых гетероклинных циклов для нескольких частных случаев динамических систем и получены достаточные условия для бифуркаций асимптотически устойчивых периодических орбит. Доказаны необходимые условия на группу симметрий динамической системы, в которой могут существовать псевдо-простые гетероклинные циклы. Выписан список подгрупп  $SO(4)$ , удовлетворяющий этим условиям. Полученные результаты опубликованы в статье [11].

Построена двухпараметрическая бифуркационная диаграмма для так называемого регуляризованного длинноволнового уравнения (RLWE) при изменении амплитуды и фазы возмущающей силы. Выявлены 4 различные последовательности бифуркаций, приводящие к возникновению пространственно-временного хаоса (турбулентности). Полученные результаты опубликованы в статье [12].

Результаты исследования гетероклинных циклов и сетей, возникающих в конвекции, представлены также в докладах на международных конференциях [19-22].

Система уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска получается при пренебрежении рядом членов, которые в условиях мантии Земли не малы. Однако ошибка при расчете структуры конвективных течений оказывается меньше величины отбрасываемых членов. Чтобы проанализировать причину этого, в работе излагается последовательный переход от общих уравнений для нагреваемой вязкой сжимаемой жидкости к более простым уравнениям тепловой конвекции по мере пренебрежения малыми величинами при значениях параметров современной Земли. Рассматривается приближение квазиупругой вязкой жидкости (*ALA*), усеченное приближение квазиупругой вязкой жидкости (*TALA*), обобщенное приближение Буссинеска (*EBA*) и самое простое классическое приближение Буссинеска (*BA*), полностью пренебрегающее эффектами сжимаемости жидкости. При параметрах мантии приближение *BA* дает небольшую ошибку только для скоростей течений, а ошибка для температуры может достигать десятков процентов. Поэтому можно рассмотреть среднее между *EBA* и *BA* приближение, учитывающее эффект сжимаемости только для температуры. Это приближение можно назвать *SBA* – суперadiaбатическим приближением Буссинеска для температуры *Tsa*. Соответствующее уравнение по виду

совпадает с простым уравнением Буссинеска, но в него входит не полная температура  $T$ , а наадиабатическая температура  $T_{sa}$ . В этом простом приближении и рассчитанная структура конвективных течений, и распределение полной температуры (получаемой прибавлением известной адиабаты  $T_a$  к вычисленной  $T_{sa}$ ) оказываются более точными по сравнению с классическим приближением Буссинеска. Результаты опубликованы в статьях [14, 15].

### 2.3. Изучение строения, динамики и сейсмичности осадочного чехла

По материалам непрерывного сейсмического профилирования рассмотрена тектоническая структура поверхности акустического фундамента и дна акватории севернее Исландии. В результате выполненных исследований установлены особенности строения южной части хр. Кольбейнсей, представляющего асимметричный в плане блок фундамента. Он состоит из группы горстовых сооружений различного простирания. К этому блоку приурочено тройное сочленение разнонаправленных трендов тектонических напряжений. В осадочном чехле выделены две региональные поверхности несогласия, отвечающие наиболее значимым изменениям палеотектонических условий осадконакопления. Выделены три сейсмических комплекса: миоценовый, плиоценовый и четвертичный. Депоцентры осадконакопления расположены в прогибах, заложение которых происходило в раннемиоценовое время, два самых крупных северных депоцентра приурочены к северному островному склону Исландии. В миоцене северная окраина Исландии представляла шельфовую область с незначительными глубинами (порядка первых сотен метров). Осадконакопление происходило в основном в трех относительно глубоких впадинах. Две северные располагались к северу и востоку от образовавшегося хребта Кольбейнсей. Внутреннее строение выделенных сейсмокомплексов позволяет предполагать, что хребет испытывал конседиментационный рост в плиоцене. На востоке существовало поднятие, где эрозии подвергались миоценовые отложения. В раннечетвертичное время береговая окраина Исландии и сам остров, по-видимому, имели высокое стояние. Осадконакопление происходило в основном в раннекайнозойских впадинах. Глубина палеобассейна в области северных депоцентров, расположенных в пределах островного склона, составляла 600-800 м. Современный облик островная окраина Исландии обрела в конце четвертичного времени в результате относительно быстрого погружения. Поверхность океанического дна отражает тектонический структурный план региона. Результаты исследований опубликованы в статьях [1, 6].

## 2.4. Применение методов теории упругости к изучению напряженного состояния земной коры

Построена новая математическая модель, описывающая изгибные деформации плит конечных размеров (в частности, прямоугольной формы) в результате сброса остаточных напряжений. Исследованы новые эффекты, не учитываемые в классических решениях изгиба плит с трещинами.

Рассмотрены модельные задачи, в которых образование разрывов в земной коре описывается, как результат сброса ранее накопленных остаточных напряжений. Полученные решения объясняют явления кинематической и геометрической несовместностей. Классические решения теории трещин не способны описать эти явления. Решения базируются на теории остаточных упругих напряжений в конечных областях.

Рассмотрены математические модели, описывающие зарождение и развитие разрывов в результате сброса остаточных напряжений. Показано принципиальное отличие полученных решений от классических для неограниченных областей. Детально изучены свойства решений в зависимости от типа граничных условий. Построены математические модели зарождающихся трещин. В основе полученных решений лежит теория базиса для систем функций Фадля-Папковича.

Полученные результаты опубликованы в статьях [2-5] и представлены в докладах на российских конференциях [16-18].

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования являются вкладом в изучение сейсмической опасности и геодинамических процессов. Методы анализа палеомагнитных данных и теоретические исследования по проблеме магнитного динамо дают новые знания, касающиеся 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 опубликовано 15 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах и сделано 7 докладов на международных и российских научных конференциях.

## 4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

1. Гарагаш И.А., Корнева Р.Г., Усенко С.В., Хортов А.В., Шлезингер А.Е. Тектонические структуры Мирового океана и континентов и их ограничения // Отечественная геология, 2015, № 3. С.30-36.
2. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Метод начальных функций и интегральное преобразование Фурье в краевой задаче теории упругости для бесконечной полосы // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015, т.21, № 1. С.47-64.
3. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Метод начальных функций и интегральное преобразование Фурье в краевой задаче теории упругости для бесконечной полосы (II) // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015, т.21, № 2. С.237-250.
4. Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Разрыв перемещений в полосе. Решение в тригонометрических рядах // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, 2015, № 2(24). С.50-71.
5. Меньшова И.В. О периодических решениях Файлона–Рибьера в двумерной задаче теории упругости // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, 2015, № 1(23). С.105-131.
6. Усенко С.В., Илларионов В.К., Бойко А.Н., Шлезингер А.Е. Строение северной островной окраины Исландии и тектоника южной части хребта Колбейнсей // Геофизические исследования, 2015, т.16, № 1. С.77-87.
7. Andrievsky, A., A. Brandenburg, A. Noullez, and V. Zheligovsky, Negative magnetic eddy diffusivities from test-field method and multiscale stability theory. *Astrophysical J.*, 2015, **811**, 2, 135 (24 pp.), doi:10.1088/0004-637X/811/2/135.
8. Arora, K., N. Nagarajan, A. Thomson, and A. Ismail-Zadeh, Making the Northern Indian Ocean a hub of geomagnetic data. *EOS. Earth & Space Sci. News*, 2015, **96**, 16: 19-22, doi:10.1029/2015EO034037.
9. Chertovskih, R., and V. Zheligovsky, Large-scale weakly nonlinear perturbations of convective magnetic dynamos in a rotating layer. *Physica D - Nonlinear Phenomena*, 2015, **313**, 1 December 2015: 99-116, doi:10.1016/j.physd.2015.09.012.
10. Khokhlov, A., and V. Shcherbakov, Palaeointensity and Brunhes palaeomagnetic field models. *Geophys. J. Int.*, 2015, **202**, 2: 1419-1428, doi:10.1093/gji/ggv236.
11. Podvigina, O., and P. Chossat, Simple heteroclinic cycles in  $R^4$ . *Nonlinearity*, 2015, **28**, 4: 901-926, DOI:10.1088/0951-7715/28/4/901.
12. Podvigina, O., V. Zheligovsky, E. L. Rempel, A. C.-L. Chian, R. Chertovskih, and P. R. Muñoz, Two-parameter bifurcation study of the regularized long-wave

- equation. *Phys. Rev. E*, 2015, **92**, 3: 032906, 2015, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.032906>.
13. Shcherbakov, V.P., A.V. Khokhlov, and N.K. Sycheva, On the distribution function of the geomagnetic field intensity according to the model of a giant Gaussian process and empirical data. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2015, **51**, 5: 786-799, doi:10.1134/S1069351315050110.
  14. Trubitsyn, V.P., M.N. Evseev, and A.P. Trubitsyn, Influence of continents and lithospheric plates on the shape of D" layer and the spatial distribution of mantle plumes. *Russian Journal of Earth Science*, 2015, **15**, 3, ES3001, doi:10.2205/2015ES000552.
  15. Trubitsyn, V.P., and A.P. Trubitsyn, Effects of compressibility in the mantle convection equations. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2015, **51**, 6: 801-813, doi:10.1134/S1069351315060129.

*Доклады на международных и российских научных конференциях*

16. Кержаев А.П. Аналитические решения некоторых краевых задач теории упругости в канонических областях с разрывами сплошности // Материалы Всероссийской научной школы-конференции «Механика предельного состояния и смежные вопросы», посвященной 85-летию профессора Д.И. Ивлева (Чебоксары, 15-18 сентября 2015 г.): в 2 ч. Ч. 2 / под ред. Н.Ф. Морозова, А.В. Манжирова, Ю.Н. Радаева. Чебоксары: Чуваш. Гос. Пед. Ун-т, 2015. С.152-159.
17. Коваленко М.Д. Особенности аналитических решений краевых задач теории упругости в конечных областях с угловыми точками границы // Материалы Всероссийской научной школы-конференции «Механика предельного состояния и смежные вопросы», посвященной 85-летию профессора Д.И. Ивлева (Чебоксары, 15-18 сентября 2015 г.): в 2 ч. Ч. 2 / под ред. Н.Ф. Морозова, А.В. Манжирова, Ю.Н. Радаева. Чебоксары: Чуваш. Гос. Пед. Ун-т, 2015. С.65-68.
18. Меньшова И.В. Решение краевых задач теории упругости для прямоугольника с разрывами сплошности // Материалы Всероссийской научной школы-конференции «Механика предельного состояния и смежные вопросы», посвященной 85-летию профессора Д.И. Ивлева (Чебоксары, 15-18 сентября 2015 г.): в 2 ч. Ч. 2 / под ред. Н.Ф. Морозова, А.В. Манжирова, Ю.Н. Радаева. Чебоксары: Чуваш. Гос. Пед. Ун-т, 2015. С.60-64.
19. Podvigina, O. Simple and pseudo-simple heteroclinic cycles in  $R^4$ . *AMS-EMS-SPM 2015 International Meeting*. Faculty of Sciences, University of Porto, Porto, Portugal, 10-13 June 2015.
20. Podvigina, O. Two-parameter bifurcation study of the regularized long-wave equation. *Dynamics, Bifurcations and Chaos 2015 (DBC II)*. Lobachevsky State University, Nizhni Novgorod, 20-24 July 2015.
21. Podvigina, O., and P. Chossat, Pseudo-simple cycles in  $R^4$  and their properties. *The 2015 Annual Meeting of the Deutschen Mathematiker-Vereinigung (DMV)*. Department of Mathematics, University of Hamburg, 21-25 September 2015.

22. Podvigina O. Heteroclinic networks in  $\mathbb{R}^4$ . *Workshop on heteroclinic dynamics in neuroscience*, University of Nice, 17-18 December 2015.