

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. № 2015-4



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН

член-корреспондент РАН

А.А.Соловьев

«12» марта 2015 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ТЕМЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИТОСФЕРЫ, ИЗУЧЕНИЕ
ЭВОЛЮЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ И ОЦЕНКА
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
(промежуточный, за 2014 год)

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

М.Г. Шнирман

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

А.И. Горшков

Москва 2015

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

ст. науч. сотр.
канд. геол.-мин. наук



С.В. Усенко

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук



А.В. Хохлов

РЕФЕРАТ

Отчет 13 с., 15 источников

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 2014 году, включали: разработку методов решения прямых и обратных задач геодинамики; реконструкцию эволюции погружающихся плит; 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 гетероклиных циклов и сетей, возникающих в конвекции с гексагональной ячейкой периодичности; построение схем морфоструктурного районирования с целью создания основы для прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений и уточнения оценок сейсмической опасности; изучение строения, динамики и сейсмичности осадочного чехла Норвежско-Гренландского бассейна (Северная Атлантика); применение методов теории упругости для изучения остаточные напряжений в земной коре.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Решение прямых и обратных задач геодинамики	7
2.2. Статистический анализ палеомагнитных данных и разработка методов получения количественных оценок вековых вариаций магнитного поля	8
2.3. Исследование конвективных магнитных динамо и гетероклинных циклов и сетей, возникающих в конвекции	9
2.4. Морфоструктурное районирование и изучение строения, динамики и сейсмичности осадочного чехла	9
2.5. Применение методов теории упругости к изучению напряженного состояния земной коры	10
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: 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.

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 Констабль 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 гетероклинных 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" гетероклинные циклы.

Построение схем морфоструктурного районирования сейсмоактивных регионов создает основу для решения задачи определения методами распознавания образов мест в регионе, где возможны сильные землетрясения, поскольку такие места связаны с пересечениями (но не со всеми) морфоструктурных линейментов, которые определяются в результате морфоструктурного районирования.

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

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.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Решение прямых и обратных задач геодинамики

В 2014 году продолжены исследования по численным методам решения прямых и обратных задач в геодинамическом моделировании. В частности, разработан вариационный метод расчета стационарных задач тепловой конвекции. Разработанные методы используются для восстановления температуры и скоростей течения вулканической лавы по измерениям на поверхности лавового потока.

Проведены исследования по изучению обратных задач по распознаванию пространственного положения подземного нефтяного месторождения по аэрозамерам электрического поля на земной поверхности.

В рамках российско-французского сотрудничества создана геодинамическая модель движения континентальных плит с учетом палеомагнитных данных и определена роль плюмтектонических процессов на изменение теплового потока и созревание углеводородов в осадочных бассейнах Восточно-Европейской платформы. Предполагается, что пермотриасовые трапы Сибири могли быть последствием подхода мантийного плюма с подошве литосферы, ее нагревания, расплавления пород и их излияния на поверхности и образования интрузий и силлов в коре. Обоснованиями этой гипотезы о Сибирском плюме являются геохимический состав траппов, размеры траповых провинций и продолжительность излияния магмы. Если исходить из этой гипотезы, то открытым остается вопрос: что случилось с этим мантийным плюмом в течение 250 млн лет и как он повлиял на геодинамику региона? Было показано, что зоны субдукции вокруг Евразийской литосферы создали условия для долгоживущего, но угасающего со временем, большого мантийного плюма, которым мог быть сравним с сегодняшним Тихоокеанским или Африканским плюмами в далекое пермское время. На основе палеомагнитных реконструкций, сейсмической томографии и геологических данных были построены модели положения континентов над Сибирским плюмом и изучены вертикальные движения коры в моменты подхода плюма. Показано, что интенсивные погружения прекращались или инвертировались в подъемы коры (например, много миллионный по времени перерыв с осадконакоплением на большей территории Прикаспийской впадины в триасе-юре) при подходе мантийного плюма. Также показано, что мантийный плюм, который за последние 150 млн. лет находился под Восточно-Европейской платформой, мог существенно повлиять на увеличение теплового потока и создание тем самым благоприятных условий для созревания нефти и газа во многих осадочных бассейнах этой платформы.

Полученные результаты представлены в докладе [15].

2.2. 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 [7-9].

2.3. Исследование конвективных магнитных динамо и гетероклинных циклов и сетей, возникающих в конвекции

Проведено сравнение результатов эмпирического метода тестовых полей для вычисления коэффициентов тензора турбулентной магнитной диффузии и математической теории многомасштабной устойчивости на примере генерации длинномасштабного магнитного поля короткомасштабными течением-IV Дж.О.Робертса и модифицированным течением Тейлора-Грина. Показано, что результаты совпадают только, когда в методе тестовых полей используется объемное усреднение.

Разработан новый алгоритм расчета течений, удовлетворяющих уравнению Эйлера. Используются рекуррентные соотношения для коэффициентов Тейлора разложения решения по времени, полученные из инвариантов Коши для уравнения Эйлера. Метод более точен и на порядок быстрее стандартных ныне применяемых алгоритмов.

Выведена система амплитудных уравнений для длинномасштабных слабонелинейных возмущений стационарных конвективных режимов генерации магнитного поля, имеющих малые группы симметрий. Проведены расчеты ее решений. Найдено, что возмущения достаточно большой амплитуды могут устойчиво генерировать магнитные поля вида одномерных волн, а при увеличении амплитуды начальных возмущений могут за конечное время вырастать до бесконечности. Режимы устойчивой генерации важны для астрофизических приложений, поскольку они не разрушают генерирующую МГД систему, как это происходит, например, при наличии в ней α -эффекта.

Проведено исследование асимптотической устойчивости т.н. псевдопростых гетероклинных циклов в R^4 . Доказано, что в G -эквивариантных системах, где G принадлежит группе $SO(4)$, такие циклы являются неустойчивыми. Тем не менее, в некоторых бифуркациях асимптотически устойчивые периодические орбиты могут ответвляться от таких гетероклинных циклов, что подтверждено расчетами.

Результаты исследований опубликованы в статьях [3-6, 10], представлены в докладах [12-14] и получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

2.4. Морфоструктурное районирование и изучение строения, динамики и сейсмичности осадочного чехла

Построена морфоструктурная схема региона Кач (Индия), которая была использована для создания блоковой модели региона с целью численного моделирования его сейсмичности и геодинамики.

Установлены особенности строения южной части хр. Кольбейнсей, представляющего асимметричный в плане блок фундамента, состоящий из группы горстовых сооружений различного простиранья. К этому блоку приурочено тройное сочленение разнонаправленных трендов тектонических

напряжений. В осадочном чехле выделены две региональные поверхности несогласия, отвечающие наиболее значимым изменениям палеотектонических условий накопления осадков. 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. Современный облик островная окраина Исландии обрела в конце четвертичного времени в результате относительно быстрого погружения.

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

Совместно с Чувашским государственным педагогическим университетом им. И.Я. Яковлева построены аналитические решения, описывающие остаточные напряжения и соответствующие им перемещения, сбрасываемые при образовании трещин отрыва и сдвига в плите прямоугольной формы. Рассмотрены два случая: когда две противоположные стороны прямоугольника свободны и когда они неподвижны. Исследованы прямая (известна форма разрыва, образовавшегося в результате землетрясения) и обратная (известна величина напряжений, сбрасываемых при землетрясении) задачи, для которых впервые получены аналитические решения, играющие важную роль в зависимости от того, как сформулированы условия на реальном разрыве. Полученные результаты опубликованы в статьях [1, 2] и монографии [11].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования являются вкладом в изучение геодинамических процессов и, в частности, выяснения благоприятных условий для созревания месторождений углеводородов. 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.

Практическая значимость выполненных исследований состоит в получении новых данных о глубинном строении Земли и структуре осадочных бассейнов.

По результатам выполненных исследований опубликовано 10 статей в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах, монография, сделано 4 доклада на международных научных конференциях и получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Статьи, опубликованные в рецензируемых отечественных и рейтинговых зарубежных журналах

1. Коваленко М.Д., Меньшова И.В. Интегральное преобразование Бореля в классе квазицелых функций // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, 2014, № 3(21). С.22-36.
2. Никитин А.В., Коваленко М.Д. Полуполоса, заземленная по продольным сторонам. Точное аналитическое решение // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния, 2014, № 4(22).
3. Boscain,U., R.A.Chertovskih, J.P.Gauthier, and A.Remizov, Hypoelliptic diffusion and human vision: A semidiscrete new twist. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2014, 7, 2: 669-695, doi:10.1137/130924731.
4. Chertovskih,R., A.C.-L.Chian, O.Podvigina, E.L.Rempel, and V.Zheligovsky, Existence, uniqueness and analyticity of space-periodic solutions to the regularised long-wave equation. *Advances in Differential Equations*, 2014, 19, 7/8: 725-754.
5. Chertovskih,R.A., and A.O.Remizov, On pleated improper singular points of first order implicit differential equations. *J. Dynamical and Control Systems*, 2014, 20: 197-206, doi:10.1007/s10883-013-9209-0.
6. Frisch,U., and V.Zheligovsky, A very smooth ride in a rough sea. *Communications in Mathematical Physics*, 2014, 326, 2: 499-505, doi:10.1007/s00220-013-1848-1.
7. Khokhlov,A.V. The secular geomagnetic variation. Statistical methods for paleomagnetic directions in sediments. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, 50, 4: 562-567, DOI:10.1134/S1069351314040077.
8. Shcherbakov,V.P., A.V.Khokhlov, and N.K.Sycheva, Comparison of the Brunhes epoch geomagnetic secular variation recorded in the volcanic and sedimentary rocks. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, 50, 2: 222-228, DOI:10.1134/S1069351314020098.
9. Usoskin,I.G., G.Hulot, Y.Gallet, R.Roth, A.Licht, F.Joos, G.A.Kovaltsov, E.Thébault, and A.Khokhlov, Evidence for distinct modes of solar activity. *Astronomy and Astrophysics*, 2014, 562, L10, doi:10.1051/0004-6361/201423391.
10. Zheligovsky,V., and U.Frisch, Time-analyticity of Lagrangian particle trajectories in ideal fluid flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 749: 404-430, doi:10.1017/jfm.2014.221.

Монография

11. Коваленко М.Д., Меньшова И.В. Аналитические решения двумерных краевых задач теории упругости в конечных областях с угловыми точками границы. Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. пед. ун-та, 2014. 123 с.

Доклады на международных научных конференциях

12. Чертовских Р.А. Уравнения средних полей возмущений конвективных магнитных динамо // Материалы международной конференции "Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность", 25 февраля - 4 марта 2014 г., М.: Изд-во МГУ, 2014. С.242-244.
13. Чертовских Р.А., Желиговский В.А. Эволюция длинномасштабных возмущений стационарных конвективных МГД состояний // Сборник трудов Международной конференции МСС-14 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность", 24-27 ноября 2014 г. М.: Ленанд, 2014. С.180-184.
14. Chertovskih,R., and V.Zheligovsky, Stability of steady convective dynamos to large-scale perturbations. In *International workshop "Turbulence: In the Sky as on the Earth"*, 6-16 October 2014, International Institute of Physics, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Brazil.
15. Ismail-Zadeh,A. Data assimilation in geodynamical models. Keynote lecture at the *International Workshop on the Frontiers of Computational Geodynamics*, Beijing, China, 30 June 2014.