

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Бердникова В.С. на диссертацию Червова Виктора Васильевича “Численное моделирование конвекции в верхней мантии Земли”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Как при создании современной техники и во многих наукоемких технологиях, так и в науках о Земле широко применяются методы моделирования с использованием физических моделей и численных исследований. Теоретической базой применения методов моделирования является теория подобия, позволяющая полученные экспериментальные данные обобщить для описания поведения разномасштабных объектов, на которых практически невозможно проводить прямые измерения, как например, полей температуры и скорости в мантии Земли. В диссертационной работе Червова Виктора Васильевича систематизированы результаты численных исследований термогравитационной конвекции в верхней мантии Земли. Целью работы была разработка и развитие трёхмерных численных моделей и комплексов программ расчёта конвекции, сравнительный анализ результатов расчетов в двумерной и трехмерной постановке задач. Созданы комплексы программ расчёта в естественных переменных и в переменных “векторный потенциал - завихренность” и температура с применением неявных методов расщепления по пространственным переменным в декартовых и сферических координатах. Исследованы особенности динамики мантии континентальных областей Земли с учётом реальной геометрии кратонов и процессов, происходящих в зонах спрединга и субдукции.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, включающего 207 наименований. Работа содержит 126 рисунков и 31 таблицу. Общий объём диссертации составляет 312 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, кратко описаны методологии и методы исследований, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и информация о структуре работы. Во Введении очень четко обозначен личный вклад автора диссертации в основные публикации по теме работы.

В Главе 1 приведены в безразмерной форме основные уравнения термогравитационной конвекции вязкой несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска в геодиническом приближении. Сформулированы начальные и граничные условия в задачах термогравитационной конвекции в мантии Земли. Изложена постановка зада-

чи в переменных «векторный потенциал» – «завихренность» для моделирования трёхмерной конвекции в мантии Земли с заданием начальных и граничных условий в этих переменных.

В Главе 2 описаны разработанные автором численные методы и алгоритмы. Представлен алгоритм расчёта трёхмерных задач конвекции в верхней мантии Земли в декартовой системе координат с применением переменных «завихренность - векторный потенциал». Описан алгоритм решения задач конвекции в исходных переменных, основанный на неявных методах расщепления по пространственным переменным с коррекцией давления. Дано описание алгоритма и метода решения задач конвекции, базирующихся на неявной реализации метода искусственной сжимаемости. Приведено краткое описание разработанных комплексов программ. Сформулированы постановки тестовых задач. Представлены результаты расчётов тестовых модельных задач вязких течений в прямоугольном параллелепипеде при переменной вязкости, зависящей от глубины и температуры. Показана достаточно высокая эффективность метода последовательности сеток при его применении и к тестовой задаче, и к модельной краевой задаче интегрирования уравнения Пуассона в прямоугольном параллелепипеде. Достигнуто значительное повышение точности результатов расчётов, полученных при применении экстраполяции по Ричардсону.

В Главе 3 представлены результаты трёхмерного численного моделирования верхнемантийной термогравитационной конвекции под континентальной литосферной плитой неоднородной толщины. Изучена эволюция течения мантийного вещества и полей температуры в расчётной области в форме параллелепипеда с размерами в горизонтальной плоскости 4200 на 4200 км и толщиной 700 км. Результаты исследования конвекции под континентальной литосферой с кратонами различной формы и под литосферой с ловушкой сравниваются с данными, полученными в расчетах под литосферной плитой постоянной толщины. Представлены результаты трёхмерного моделирования конвективных процессов под Центральной Азией с учетом реальных неоднородностей.

В Главе 4 приведены уравнения геодинамики, описывающие движение вязкого мантийного вещества в верхней мантии Земли в сферических координатах; описаны граничные условия. Построен численный алгоритм, основанный на неявной реализации метода искусственной сжимаемости, и его компьютерная реализация. Представлены результаты трёхмерного численного моделирования в сферических переменных термогравитационной конвекции в мантии Земли под континентальной и океанической литосферой переменной толщины (Евразия и её окружение). Результаты расче-

тов трёхмерной конвекции и полей температуры под литосферой Евразии согласуются с сейсмотомографической картиной данного региона.

В Главе 5 построена численная модель, базирующаяся на методе искусственной сжимаемости, и исследована трёхмерная конвекция под океанической литосферой в зонах спрединга и субдукции под континентальной литосферой. На основе анализа результатов численных экспериментов предложен механизм возникновения погружающихся «холодных» гравитационно-неустойчивых областей океанической литосферы.

В Заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

Актуальность темы работы определяется в первую очередь тем, что для глубокого понимания геологической истории Земли необходимо иметь знания о процессах тепло-массообмена в недрах планеты. Разработка численных моделей разномасштабной термогравитационной конвекции в верхней мантии Земли адекватных процессам, наблюдаемым с помощью сейсмотомографии, и существенно дополняющих данные сейсмотомографии несомненно **актуальна**. Ключевым вопросом при изучении недр планеты является выяснение причин и условий, определяющих пространственно-временную эволюцию конвекции в мантии Земли, поскольку именно эта характеристика во многом определяет кинематику литосферных плит и геологическую историю развития континентальных областей. Поэтому исследования конвективных течений в мантии под неоднородной по толщине литосферой является одной из центральных задач геофизики.

Новизна результатов работы обусловлена в первую очередь тем, что впервые выполнены систематические исследования трёхмерных термогравитационных течений в верхней мантии Земли. Исследования выполнены с использованием разработанных автором диссертации оригинальных численных моделей и комплексом программ. Впервые исследована конвекция под неоднородной по толщине астеносферой, включая геометрически простые модели кратонов и кратоны реальных форм. Численные методы и алгоритмы решения задач конвекции в верхней мантии Земли основанные на неявных методах расщепления по пространственным переменным; с их применением созданы и детально оттестированы комплексы программ расчёта конвективных процессов в верхней мантии Земли. Впервые построена основанная на концепциях Флейто - Йена и Тычкова - Трубицына оригинальная трёхмерная численная модель конвекции в зонах спрединга и субдукции.

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений и выводов представленных в диссертации обеспечивается проведением многочисленных тестовых расчётов, показавших адекватность построенных

численных моделей, детальным сопоставлением с известными аналитическими и числовыми данными при решении модельных задач, применением мер контроля точности найденных решений, соответствием рассчитанных и наблюдаемых геолого-геофизических характеристик. Сопоставлением полученных результатов с известными результатами теоретических работ других авторов.

Научная значимость результатов работы заключается в том, что разработаны оригинальные трехмерные численные модели термогравитационных течений, которые могут использоваться для моделирования гидродинамики и сопряженного теплообмена верхней мантии с океанической и континентальной корой в более полной постановке с учетом теплоотдачи с верхней границы коры и с учетом взаимодействия с ниже лежащим слоем мантии. Полученные и систематизированные в диссертации результаты важны с общетеоретической точки зрения, так как дают представление о особенностях теплообмена в системах верхняя мантия – литосферные блоки с неоднородной толщиной. Получены новые данные о структуре течений под кратонами различных форм. Новые результаты получены благодаря тому, что построены основанные на неявных методах расщепления по пространственным переменным трёхмерные численные модели и комплексы программ расчёта конвекции в верхней мантии Земли в декартовых и сферических координатах. Разработанные численные алгоритмы и комплексы программ вносят существенный вклад в решение фундаментальной проблемы математического моделирования конвекции в мантии Земли.

Практическая значимость результатов работы подтверждается тем, что на разработанные численные модели и комплексы программ получены четыре свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ. Кроме того в работе приведен обширный список программ фундаментальных исследований и проектов, в рамках которых выполнялись исследования (стр. 34 - 36). Выполнено численное моделирование конвективных течений под литосферой Евразии с учётом близких к точным конфигурациям элементов литосферных блоков (Сибирский кратон, Русская, Западно-Сибирская и Китайские платформы, Тарим, Центрально-Азиатский складчатый пояс, Индийская плита и др.). Рассчитаны температурные поля, согласующиеся с наблюдаемым полем температуры на поверхности Земли и с сейсмоотографическими данными в юго-западной оконечности Сибирского кратона и в восточной части Центральной Монголии. Построены численные модели спрединга и субдукции. Численно исследована трёхмерная конвекция под океанической литосферой в зонах спрединга и субдукции под континентальной литосферой. Результаты работы могут быть использованы при планировании целенаправленных лабораторных экспериментов и созда-

нии физических моделей, результаты экспериментов необходимы для тестирования и установления адекватности при построении новых более полных численных моделей.

По диссертационной работе в целом имеются следующие замечания:

1. Во Введении явно не хватает информации о слоистой структуре недр Земли, данные о которой в последние годы обновляются и на основании которой более строго должна обосновываться физическая постановка решаемых задач, а также анализ и интерпретация полученных результатов.
2. В работе не указаны источники, из которых взяты значения теплофизических свойств, используемых, в частности, для оценок значений чисел Рэлея. В расчетах учитывалась зависимость вязкости от температуры и давления (гидростатического), но, не затронут вопрос о зависимости коэффициентов теплопроводности, объемного теплового расширения, теплоемкости (и как результат - температуропроводности).
3. Расчеты проведены при заданной температуре на верхней границе расчетной области, поэтому возникает вопрос о состоятельности вывода о совпадении результатов расчетов с наблюдаемым полем температуры на дневной поверхности (стр.)
4. Применяемое автором понятие “мелкомасштабная мода конвекции” и его интерпретация не корректны. В работах по исследованиям Рэлей-Бенаровской конвекции это относится к появлению вторичного течения после потери устойчивости в пограничном слое в данном случае на нижней стороне литосферы. В связи с этим непонятно, почему по результатам расчетов нет анализа пограничных слоев тепловых и гидродинамических. При анализе процессов в области спрединга и субдукции градиенты скорости необходимы для оценки сил вязкого трения. Аналогично в 5 главе должен был быть анализ движущих плиты сил. Понятие “субдукция”, используемое автором диссертации не совпадает с общепринятым. Это не процесс погружения “капли” охлажденного вещества, а процесс погружения под континент “слэба” - участка океанической литосферной плиты.
5. Диссертация хорошо оформлена, но рисунки 3.5 (стр. 132), 3.9 (стр. 136), 3.12, 3.16 и 3.17 (стр.147) для наглядности можно было представить в более крупном масштабе по вертикали. В представленном виде они практически бесполезны.

Сделанные выше замечания вовсе не исключают общую положительную оценку работы в целом. Работа хорошо оформлена с использованием современных средств, написана на высоком профессиональном уровне. Список публикаций по теме диссертации состоит из 55 печатных работ, из них 18 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов

докторских диссертаций, в них достаточно полно отражены основные результаты диссертации. Созданы и зарегистрированы четыре комплекса компьютерных программ, отвечающих теме диссертации. Результаты диссертационного исследования докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах. Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

Диссертация Червова Виктора Васильевича является оригинальной, завершенной научно-квалификационной работой, результаты которой можно квалифицировать как новое научное достижение в области математического моделирования термогравитационной конвекции в верхней мантии Земли. Диссертационная работа по своим задачам, цели, содержанию, методикам исследований и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.13.18. Считаю, что диссертация Червов В.В. по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и их научно-практической значимости удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с п.п. 9, 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а сам ее автор Червов Виктор Васильевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Доктор физико-математических наук, с.н.с.,
главный научный сотрудник лаборатории
интенсификации процессов теплообмена
федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН»

_____/Бердников Владимир Степанович/

17 мая 2022 г.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева д.1
тел. +7 (383) 316-53-32, e-mail: berdnikov@itp.ncs.ru

Я, Бердников Владимир Степанович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Подпись В.С. Бердникова удостоверяю:

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.

_____/М.С. Макаров/

17 мая 2022 г.

