

ОТЗЫВ

официального оппонента Белолопещкого Виктора Михайловича 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.

Актуальность темы диссертации

Исследование конвективных течений в мантии Земли является одной из центральных задач геофизики. Пространственно-временная эволюция конвекции в мантии Земли во многом определяет кинематику литосферных плит и геологическую историю развития континентальных областей. Диссертационная работа Червова В.В. посвящена актуальной тематике численного моделирования конвекции в верхней мантии Земли.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 207 наименований. Общий объем 312 страниц, включая 126 рисунков и 29 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, представлен исторический обзор, приведен обширный перечень международных и российских научных конференций, на которых докладывались результаты диссертации, отмечен личный вклад автора в работах с соавторами, сформулирована **цель диссертационной работы**, состоящая в разработке и развитии трехмерных численных моделей и комплексов программ расчета тепловой конвекции в верхней мантии Земли и изучении конвективных течений с учетом реальной геометрии кратонов, а также процессов, происходящих в зонах спрединга и субдукции.

В главе 1 представлены основные уравнения гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости в гравитационном поле Земли в приближении Обербека-Буссинеска и геодинамическом приближении. Сформулированы начальные условия, приведены современные представления о начальных и граничных условиях в задачах тепловой гравитационной конвекции в мантии Земли. Изложена постановка задачи в переменных «векторный потенциал-завихренность» для трехмерных задач конвекции в мантии Земли с заданием начальных и граничных условий в этих переменных.

Глава 2 посвящена построению и тестированию численных моделей тепловой конвекции в мантии Земли. С применением методов последовательности сеток и экстраполяции по Ричардсону выполнена модификация построенных численных моделей, основанных как на переменных «векторный потенциал-завихренность», так и в естественных переменных. Модификация позволила существенно повысить эффективность численных моделей. На основе разработанных алгоритмов созданы комплексы программ решения задач конвективного теплообмена в верхней мантии Земли.

В главе 3 представлены результаты численного моделирования конвекции в верхней мантии Земли под континентальной литосферой переменной толщины. Рассмотрены четыре модельные задачи эволюции мантийного вещества в параллелепипеде. Переход от 2D к 3D моделированию показал, что учет трёхмерности в моделях кардинально меняет не только структуру течения, но и ее эволюционные характеристики.

В главе 4 приведены уравнения геодинамики, описывающие движение вязкого мантийного вещества в верхней мантии Земли в сферических координатах; изложены граничные условия в указанных переменных, построен основанный на неявной реализации метода искусственной сжимаемости численный алгоритм. Представлены результаты трехмерного численного моделирования в сферических переменных тепловой гравитационной конвекции в мантии Земли под континентальной и океанической литосферой переменной толщины (Евразия и ее окружение).

В главе 5 построена численная модель, основанная на методе искусственной сжимаемости, выполнено исследование трехмерной тепловой гравитационной конвекции под океанической литосферой в зоне раздвижения плит (спрединг) и формирования слэба (субдукция) под континентальной литосферой. На основе анализа результатов численных экспериментов указан механизм возникновения погружающихся «холодных» гравитационно-неустойчивых областей океанической литосферы.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам выполненного диссертационного исследования, которые сводятся к следующему.

- 1) На основе неявных методов расщепления по пространственным переменным построены численные методы и алгоритмы решения трёхмерных задач конвекции в верхней мантии Земли в декартовой и сферической постановках; разработаны и детально оттестированы комплексы программ расчёта трехмерной конвекции.
- 2) Построены численные модели конвекции под модельными кратонами; дано обоснованное на численных экспериментах обоснование трёхмерности конвекции под модельным протяжённым кратоном (ловушкой); выявлена мелкомасштабная мода конвекции под модельными кратонами и предложен механизм траппового магматизма.
- 3) Построены математические модели тепловой конвекции в верхней мантии Земли под континентальной литосферой Центральной Азии и Евразии. Численное моделирование показало, что реальные кратоны порождают структуры, аналогичные структурам в случае модельных прямоугольных в плане кратонов. Течение в своей основной части характеризуется устойчивыми восходящими потоками. По периферии кратонов формируются нисходящие потоки и прогретые области. Возвышенности и низменности Русской платформы согласованы с восходящими и нисходящими конвективными потоками под ней.
- 4) Разработана трёхмерная численная модель конвекции в зонах спрединга и субдукции; рассчитана скорость погружения слэба до глубин

порядка 700 км, указана ее связь со скоростью раздвижения плит; в результате расчётов выявлен нисходящий поток холодного мантийного вещества, перетекающего из области океанической литосферы под континент.

5) Построена трёхмерная численная модель конвекции под движущимся от срединно-океанического хребта (СОХ) континентом с прирастающей к нему океанической литосферой; при таком движении в результате надвига континента на тонкую пассивную океаническую литосферу образуется уходящий под континент низкотемпературный след, интерпретируемый как слэб.

Научная новизна. Построены оригинальные численные методы и алгоритмы решения задач конвекции в верхней мантии Земли, основанные на неявных методах расщепления по пространственным переменным; разработаны и оттестированы комплексы программ расчета конвективных процессов в верхней мантии Земли; впервые изучена конвекция под модельными и реальными кратонами; разработана с применением концепций Флейто-Йена и Трубицына-Тычкова оригинальная трёхмерная численная модель конвекции в зонах спрединга и субдукции.

Достоверность полученных результатов достигается проведением многочисленных тестовых расчетов, соответствием рассчитанных и наблюдаемых геолого-геофизических характеристик.

Значимость результатов для науки и производства. Созданные численные модели и комплексы программ могут быть использованы для исследования широкого класса задач конвекции в верхней мантии Земли, при планировании лабораторных и натуральных экспериментов, обработке известных экспериментальных данных, построении новых более полных численных моделей.

По диссертации имеются **замечания.**

1. Одним из основных результатов диссертационной работы является выявление мелкомасштабной моды в условиях конвекции под модельным квадратным в плане кратоном (стр. 162, 164; рис.3.29, 3.31). В работе отсутствует обсуждение роли параметров численной модели. Насколько существенно результаты расчетов зависят от измельчения пространственно-временной сетки?

2. На рис. 5.5 (стр. 276 диссертации) приведена схема постановки задачи численного моделирования процесса субдукции вследствие надвига континента на пассивную океаническую литосферу. Далее излагаются результаты численных экспериментов, иллюстрирующие течение. Как влияет угол DBA на изучаемое течение? Как изменится течение с изменением этого угла?

Замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

Полученные Червовым В.В. результаты можно квалифицировать как новое крупное достижение в области математического моделирования

конвекции в верхней мантии Земли. Диссертационная работа по своим задачам, цели, содержанию, методике исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.13.18.

Диссертация Червова В.В. соответствует требованиям п.п. 9, 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Червов Виктор Васильевич достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник отдела вычислительной математики Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМ СО РАН) – обособленного подразделения Федерального бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН)

д.ф.-м.н., профессор

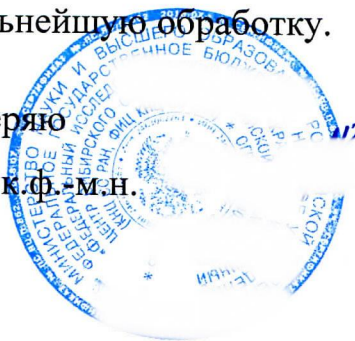
Виктор Михайлович Белолипецкий
20 апреля 2022 г.

Адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44
Рабочий телефон: +7 (391) 2905139
E-mail: belolip@icm.krasn.ru

Я, Белолипецкий Виктор Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Подпись В.М. Белолипецкого заверяю

Ученый секретарь ИВМ СО РАН, к.ф.-м.н.



 А.В. Вяткин

20 апреля 2022 г.