

Утверждаю

Директор ИФЗ РАН

Чл.-корр. РАН

С.А. Тихоцкий

2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук  
на диссертационную работу 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»

Диссертационная работа В.В. Червова посвящена численному моделированию конвекции в верхней мантии.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержащего основные результаты диссертации, а также списка литературы. Рукопись содержит 312 страниц текста, 31 таблицу и 126 рисунков. Список литературы насчитывает 207 наименований (список пронумерован).

Введение диссертации состоит из 25 стр., и в нем представлены рубрики, в которых согласно требованиям ВАК обсуждаются вопросы актуальности работы, цели и задачи, новизна, вклад автора и другие важные показатели научной работы. Здесь представлено пять защищаемых положений.

**Актуальность темы исследования** обоснована. Конвекция в верхней мантии Земли является ключевым вопросом при изучении недр планеты; ее исследование является одной из центральных задач геофизики и позволяет выяснить причины и условия, во многом определяющие кинематику



литосферных плит и геологическую историю развития континентальных областей. Работы, выполненные в этом направлении в последние годы, значительно расширили наши представления о строении и составе недр планеты. основополагающая роль в процессе получения полезной информации по данному вопросу принадлежит численным экспериментам. Первые численные модели тепловой конвекции в мантии Земли разработаны примерно 45 лет назад. Современные компьютерные технологии и методы вычислительной математики позволяют в настоящее время успешно осуществлять трёхмерное математическое моделирование тектонических процессов. При численном решении трёхмерных задач классической гидродинамики достаточно хорошо зарекомендовали себя численные алгоритмы, основанные на использовании неявных методов расщепления по пространственным переменным. Уравнения тепловой гравитационной конвекции в верхней мантии Земли значительно отличаются от уравнений классической гидродинамики бесконечными (очень большими) значениями числа Прандтля, существенным варьированием и нелинейной зависимостью вязкости мантийного вещества от литостатического давления и температуры. К моменту начала исследований автора диссертации не было систематического анализа применения вышеупомянутых подходов к решению трёхмерных задач геодинамики.

В связи с этим задача построения эффективных численных моделей и решения на их основе трёхмерных задач конвекции в мантии Земли представляется весьма **актуальной**.

**Научная новизна работы сформулирована достаточно четко.**

В диссертации Червова В.В. разработаны оригинальные численные методы, построены оригинальные численные модели и комплексы программ расчета трехмерных конвективных процессов в верхней мантии Земли. Впервые решены актуальные задачи конвекции в мантии Земли под кратонами Центральной Азии и Евразии. Также были построены оригинальные численные модели спрединга и субдукции.

**Цель диссертационной работы** состоит в построении эффективных трёхмерных численных моделей тепловой конвекции в верхней мантии Земли с применением неявных методов расщепления по пространственным переменным и исследовании динамики мантии континентальных областей Земли и особенностей процессов, происходящих в зонах спрединга (раздвижения литосферных плит) и субдукции (погружения плит в мантию Земли).



**Новизна работы** связана с использованием контуров реальных кратонов в трёхмерном численном моделировании мантийной конвекции для Евразийского региона.

### **Содержание диссертационной работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Приведён обзор работ по тематике диссертации. Сформулированы основные результаты диссертационной работы, защищаемые положения и научная новизна работы.

**В первой главе**, носящей вспомогательный характер, приведены основные уравнения, описывающие движение вязкой жидкости в гравитационном поле Земли. Выписаны начальные данные, приведены общие представления о граничных условиях, характерных для задач конвекции в мантии Земли. Излагается постановка задачи в переменных «векторный потенциал–завихренность» для трёхмерных задач конвекции в мантии Земли и приведены граничные условия в этих переменных.

**Во второй главе** диссертации построены и протестированы численные модели. Представлены построенные автором численные методы и алгоритмы решения трёхмерных задач конвекции в верхней мантии Земли, основанные на переменных «векторный потенциал–завихренность». В естественных переменных построены численные модели конвекции в мантии Земли на основе неявного метода расщепления по пространственным переменным с коррекцией давления и на основе неявной реализации метода искусственной сжимаемости.

**В третьей главе** диссертации представлены результаты численного моделирования конвекции для декартовых моделей трехмерной конвекции для случая верхней мантии Земли под континентальной литосферой переменной толщины. Последовательно рассмотрены следующие модельные задачи эволюции мантийного вещества в параллелепипеде с размерами по горизонтали 4200 км × 4200 км и высотой в 700 км. Важной особенностью рассмотренных вариантов задач является наличие геометрически неоднородной литосферной плиты. Как показали расчеты, под крупными областями утолщенной литосферной плиты (кратоны) возникают восходящие мантийные потоки, в то время как линейные аномально тонкие области литосферы порождают нисходящие конвективные потоки.

Далее в главе 3 выполнены численные исследования конвекции в верхней мантии Земли для существующих реальных неоднородностей



Центральной Азии, включающей в себя Сибирский кратон, Западно-Сибирскую плиту, Центрально-Азиатский складчатый пояс. Показано, что уже введение только основных структурных неоднородностей позволило получить главные характерные черты исследуемых регионов.

**В четвертой главе** диссертации излагаются результаты численного моделирования теплогравитационной конвекции в верхней мантии Земли под континентальной и океанической литосферой переменной мощности с учётом сферической геометрии. Представлены результаты численного моделирования тепловой конвекции под обширной областью Евразии с координатами ( $0^\circ \div 145^\circ$ ) по  $\varphi$ , ( $20^\circ \div 80^\circ$ ) по  $\theta$  и (5670 км  $\div$  6370 км) по радиусу.

**В пятой главе** представлены результаты численного моделирования трёхмерной конвекции под океанической литосферой в зоне раздвижения плит (спрединг) и формирования слэба (субдукция) под континентальной литосферой. В рамках задачи математического моделирования конвекции с применением системы уравнений в сферических координатах построена геодинамическая модель погружающейся под континент плиты.

**В Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, а именно, построены на основе неявных методов расщепления методы решения задач конвекции в верхней мантии Земли и разработаны:

- численная модель трёхмерной конвекции в мантии Земли с применением естественных переменных и неявного метода расщепления по пространственным переменным с коррекцией давления (в декартовых и сферических координатах);

- численная модель трёхмерной конвекции в мантии Земли с использованием естественных переменных и неявной реализации метода искусственной сжимаемости (в декартовых и сферических координатах);

- численная модель трёхмерной конвекции в верхней мантии Земли, с применением переменных «векторный потенциал–завихренность» (в декартовых координатах).

- разработаны и детально протестированы комплексы программ; выполнено численное моделирование конвекции под модельными и реальными кратонами; обоснована трёхмерность конвекции под модельными кратонами протяжённой формы; предложен механизм траппового магматизма; изучена конвекция под кратонами Центральной Азии и Евразии; построены оригинальные численные модели конвекции в зонах спрединга и субдукции.



**Научная и практическая значимость результатов** диссертационной работы определяется решением широкого класса задач конвекции в верхней мантии Земли:

1. Выполнены детальные численные эксперименты, на основе которых исследована тепловая гравитационная конвекция под модельными кратонами. Осуществлено обоснование трёхмерности конвекции под модельными кратонами протяжённой формы, выявлена мелкомасштабная мода конвекции на периферии кратонов, предложен механизм траппового магматизма около бортов Сибирского кратона в триасе.

2. Проведено численное моделирование конвекции под литосферой Евразии с учётом конфигураций элементов литосферных блоков (Сибирский кратон, Русская, Западно-Сибирская и Китайские платформы, Тарим, Центрально-Азиатский складчатый пояс, Индийская плита и др.). Рассчитанные температурные поля в целом согласуются с наблюдаемым тепловым полем на поверхности Земли и с сейсмотомографическими данными в юго-западной оконечности Сибирского кратона и в восточной части Центральной Монголии.

3. Построены численные модели спрединга и субдукции. Выполнено численное моделирование трёхмерной конвекции под океанической литосферой в зонах раздвижения плит (спрединг) и формирования слэба (субдукция) под континентальной литосферой. Выявлен механизм формирования погружающихся под воздействием архимедовых сил холодных гравитационно-неустойчивых областей океанской литосферы. Рассчитаны тепловые аномалии, имеющие вид слэбов, погружённых в мантию. Выявлены имеющие вид тяжёлой гравитационно-неустойчивой холодной «капли» тепловые аномалии. Возникновение и отрыв подобных аномалий от кромки континента по времени согласуется с теоретическими оценками отрыва приращённого в процессе спрединга мантийного материала с образованием погружающегося в мантию слэба.

4. Разработанные численные модели могут быть применены для решения широкого класса задач конвекции в верхней мантии Земли; при анализе и обработке известных экспериментальных данных, при планировании лабораторных и натуральных экспериментов, разработке новых более детальных численных моделей.

5. 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.

**Достоверность полученных результатов** достигается детальным тестированием численных моделей путём сопоставления с известными аналитическими и числовыми данными при решении модельных задач, применением мер контроля точности получаемых решений путём расчета на последовательности сеток, анализом соответствия рассчитанных и наблюдаемых геолого-геофизических характеристик

**При прочтении и обсуждении диссертации возникли следующие замечания:**

**Формальные:**

1. В оглавлении диссертации отсутствует пункт о защищаемых положениях, научной новизне и прочих необходимых элементов. Фактически они находятся во введении на стр. 21-22 рукописи. В автореферате указанные пункты имеются.

2. Защищаемые положения, указанные в автореферате, носят недостаточно конкретный характер, хотя в диссертации приведены конкретные полученные автором результаты.

**Недостатки по существу:**

1. Автор почти не ссылается на работы за последние годы. Между тем, начиная с 60х годов 20 века, численные методы решения уравнения Стокса были детально изучены. Нет сравнения численного метода автора с алгоритмом Узавы и другими современными численными методами. Полученные автором диссертации геодинамические результаты не сравнены с аналогичными из литературы, не проанализированы отличия и их причины.

2. Отметим, что в приведенной в диссертации геофизической литературе работы последних лет представлены недостаточно, несмотря на то, что в них был получен ряд существенных новых результатов по конвекции в мантии Земли.

3. В начале 5 главы на стр. 266 указано, что плотность континентальной литосферы составляет  $2.3 \text{ г/см}^3$ . В реальности для континентальной кристаллической коры плотность меняется от  $2.7$  до  $2.9 \text{ г/см}^3$ . Плотность континентальной литосферы в расчетах обычно берется около  $3.0 \text{ г/см}^3$ .

4. Региональная постановка задач требует задания условий на своих границах. В диссертации, в частности, на нижней границе расчетной области



(граница раздела верхней и нижней мантии) приняты условие постоянства температуры на границе и условие непротекания, что может заметно влиять на результаты. Не учтена сферичность модели и если в масштабах сотен километров это возможно, то в масштабах Евразии сферичность имеет большое значение. Для моделирования такого региона нужна полная сфера. В то же время региональные сферические модели имеют непроницаемые боковые стенки. Кроме того при региональном моделировании Евразии не включены данные сейсмической томографии. Эти особенности модели должны бы быть более четко оговорены в диссертации.

5. Отсутствие внутренних источников тепла в рассчитанных моделях. Это существенно изменяет полученные результаты, так как в реальной Земле тепловые источники в мантии дают существенный вклад в теплогенерацию.

6. В диссертации не отмечено, что большинство отечественных и зарубежных специалистов с 2000х годов придерживаются модели общемантийной конвекции в Земле, а не представления о конвекции как происходящей в верхней мантии Земли отдельно от нижней (этой модели посвящена основная часть расчетов диссертации). Для обоснования примененной модели хотелось бы видеть сравнение результатов расчётов для верхнемантийной и для общемантийной моделей конвекции. Не обсуждается также вопрос, не ведет ли принятая модель к пониженной интенсивности конвекции и соответственно, пониженному тепловому потоку на поверхности. Геофизические данные, в том числе сейсмическая томография показывают, что имеет место проход вещества через границу верхней и нижней мантии. Неучёт этого явления (непроницаемость границы) в рассмотренных моделях существенно обедняет результаты.

7. Отсутствие конкретики в формулировке защищаемых положений. Так 3, 4 и 5 пункты защищаемых положений начинаются одинаковым образом «Результаты численного моделирования...». При этом не сформулированы геофизические результаты, которые расширяют наше знание о физических процессах в Земле, которые и должны являться предметом защиты.

### **Заключение**

Общее заключение о работе положительное. Указанные недостатки не снижают достоинств работы, которая выполнена на достаточно высоком научном уровне и соответствует всем квалификационным требованиям. В диссертации получен ряд существенных новых научных результатов. Разработаны численные методы, созданы и запатентованы оригинальные



комплексы программ расчета мантийной конвекции. Проведены детальные расчеты, позволившие выявить влияние геометрических неоднородностей литосферы на структуру течений в верхней мантии. Построены численные модели конвекции в верхней мантии Земли в зонах спрединга и субдукции. Результаты диссертационной работы являются важными и актуальными.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

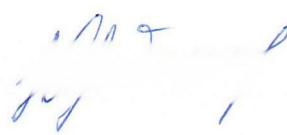
Основные результаты диссертации отражены в 18 публикациях различного уровня, в том числе в журналах из перечня ВАК и индексируемых в международных системах цитирования SCOPUS и WoS.

Полученные Червовым В.В. результаты можно квалифицировать как крупное научное достижение в области математического моделирования конвекции в верхней мантии Земли.

Диссертация Червова В.В. удовлетворяет 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 заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

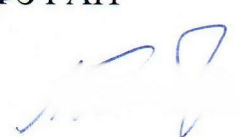
Отзыв подготовили:

Доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией фундаментальных и прикладных проблем  
тектонофизики (№204) ИФЗ РАН



Юрий Леонидович Ребецкий

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории №101 ИФЗ РАН



Александр Марович Бобров



Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории №202 ИФЗ РАН

Алексей Андреевич Баранов

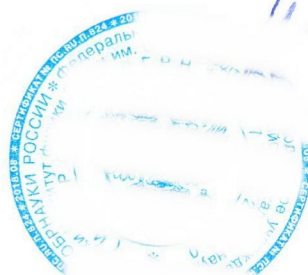
Диссертационная работа и отзыв обсуждались 20 апреля 2022 года на объединённом заседании семинара лабораторий № 202 и №204 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (протокол №1). Отзыв одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (сокращенное название – ИФЗ РАН), адрес: Российская Федерация, 123242 г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10 строение 1, e-mail: [direction@ifz.ru](mailto:direction@ifz.ru), тел: +7 (499) 766-2656, факс: +7 (499) 766-2654

Подписи д.ф.-м.н., зав. лаб. 204 ИФЗ РАН Ю.Л. Ребецкого к.ф.-м.н., в.н.с. лаб 101 ИФЗ РАН А.М. Боброва и к.ф.-м.н., в.н.с. лаб. 202 ИФЗ РАН А.А. Баранова заверяю.

Учёный секретарь ИФЗ РАН к.ф.-м.н.

28 апреля 2022 г.



Д.В. Лиходеев