

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Непосредственное наблюдение за глубинными геодинамическими процессами невозможно, и ключевую роль в исследованиях таких процессов играют опосредованные методы, базирующиеся на законах механики сплошных сред, гидродинамики и теплофизики. Последние десятилетия отмечены всё возрастающей ролью метода моделирования в решении ключевых проблем наук о Земле, в частности, проблемы изучения тепловой и гидродинамической структуры свободно-конвективных течений в мантии Земли.

Диссертационная работа В.В. Червова относится к числу фундаментальных научных исследований, посвященных численному моделированию свободно-конвективных течений в верхней мантии Земли. Основная цель исследований состоит в разработке трёхмерных численных моделей свободной конвекции, которые применяются для исследования конвективной структуры верхней мантии. Указанная цель достигается созданием и использованием комплексов программ расчёта свободной конвекции в верхней мантии Земли в естественных переменных и в переменных «векторный потенциал»–«завихренность» ($\psi-\omega$) с применением неявных методов расщепления по пространственным переменным. **Актуальность работы** определяется необходимостью построения эффективных численных моделей и решения на их основе трёхмерных задач конвекции в верхней мантии, прежде всего, задач о конвекции под кратонами, конвективных течениях в зонах спрединга и субдукции.

Научная новизна полученных результатов не вызывает сомнений и определяется следующим:

- 1) построены оригинальные численные методы и алгоритмы решения задач конвекции в верхней мантии Земли, основанные на неявных методах расщепления по пространственным переменным;
- 2) на основе указанных численных методов созданы и протестированы комплексы программ расчёта конвективных течений в верхней мантии;
- 3) представлены численные модели конвекции под кратонами;

4) построены численные модели верхнемантийной свободной конвекции под неоднородной континентальной литосферой Евразии;

5) на основе концепций Флейто – Йена и Тычкова – Трубицына построены трёхмерные численные модели конвекции в зонах спрединга и субдукции. В результате расчётов получены нисходящие свободно-конвективные субдукционные потоки.

Достоверность полученных результатов достигается проведением многочисленных тестовых расчётов, детальным сопоставлением с известными аналитическими и числовыми данными при решении модельных задач, применением мер контроля точности получаемых решений.

Научная значимость, теоретическая и практическая ценность диссертации.

Научное значение диссертационной работы В.В. Червова заключается в том, что автору удалось разработать оригинальные трехмерные численные модели свободно-конвективных течений и показать возможности метода численного моделирования при решении задач, связанных с исследованием верхнемантийной конвекции.

1. На основе численного моделирования автором определена структура течений под модельными кратонами.

2. Представлены результаты численного моделирования конвективных течений под Евразией с учётом конфигураций её различных литосферных блоков. Определена тепловая структура этих конвективных течений.

3. Разработаны численные модели спрединга и субдукции. Представлены результаты численного моделирования трёхмерной конвекции под океанической литосферой в зонах спрединга и субдукции под континентальной литосферой. Указан механизм возникновения погружающихся холодных гравитационно-неустойчивых областей океанической литосферы под воздействием архимедовых сил. Получены тепловые аномалии, имеющие вид слэбов, погружённых в мантию.

4. Разработанные численные модели и комплексы программ могут быть использованы для исследования конвекции в верхней мантии Земли, при планировании лабораторных экспериментов, построении новых, более полных, численных моделей.

5. На основе неявных методов расщепления по пространственным переменным построены трёхмерные численные модели и созданы комплексы программ расчёта конвекции в верхней мантии Земли в декартовых и сферических координатах. Разработанные численные алгоритмы и комплексы программ могут быть использованы для решения задач о верхнемантийной конвекции, тем самым автор внёс значительный вклад в решение фундаментальной проблемы математического моделирования конвекции в мантии Земли.

Практическая значимость диссертации подтверждается также и наличием свидетельств о государственной регистрации программ, разработанных автором.

Общая характеристика работы.

Диссертация представляет собой научный труд объёмом 312 страниц, состоящий из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 203 наименования. Необходимо подчеркнуть, что в диссертации представлены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Представлен обзор исследований по тематике диссертации. Сформулированы основные результаты исследований, представленных в диссертации. Следует отметить, что работа в достаточной степени апробирована на весьма представительных международных и всероссийских совещаниях и конференциях. Основные результаты исследований, представленные в диссертации, опубликованы в ведущих зарубежных и российских научных журналах, все эти периодические издания рекомендованы ВАК. Личный вклад автора в результаты исследования, представленные в диссертации, полностью отражён в указанных научных работах.

В главе 1 кратко представлены основные уравнения для свободной конвекции в высоковязкой жидкости в приближении Буссинеска. Изложена постановка задачи в переменных «векторный потенциал»–«завихренность» для трёхмерных задач конвекции в мантии Земли с постановкой начальных и граничных условий в этих переменных. Постановка задачи, начальные и граничные условия выполнены квалифицированно с точки зрения математического моделирования.

В главе 2 изложены разработанные автором численные методы и алгоритмы. Так, в диссертации предложен алгоритм расчёта трёхмерных задач конвекции в верхней мантии Земли в декартовой системе координат с применением переменных «векторный потенциал-завихренность». Автор создал алгоритм решения задач конвекции в исходных переменных, основанный на неявных методах расщепления по пространственным переменным с коррекцией давления. Разработан алгоритм и метод решения задач конвекции, базирующийся на неявной реализации метода искусственной сжимаемости. Для реализации созданных алгоритмов и методов решения, автором разработаны и сами комплексы программ, описанные в главе 2. Важной особенностью этой главы является то, что автору удалось добиться значительного повышения точности результатов расчётов, полученных в процессе применения в численных экспериментах экстраполяционного алгоритма Ричардсона. Автором проведено численное моделирование трёхмерной

конвекции в мантии Земли с использованием неявного метода расщепления с коррекцией давления и с применением неявной реализации метода искусственной сжимаемости.

В главе 3 представлены результаты трёхмерного численного моделирования верхнемантийной свободной конвекции под континентальной литосферной плитой переменной толщины. Представлены результаты решения задач о конвекции под кратонами различной геометрии, а также для литосферы при наличии ловушки. Представлены результаты трёхмерного моделирования конвективных течений под Центральной Азией. В этой главе автору удалось показать существенно трёхмерный характер мантийных течений и зависимость конвективных течений от конфигурации кратонов.

В главе 4 приведены уравнения геодинамики, описывающие движение вязкого мантийного вещества в верхней мантии Земли в сферических координатах; изложены граничные условия в указанных переменных, построены основанный на неявной реализации метода искусственной сжимаемости численный алгоритм и его компьютерная реализация. Автором представлены результаты трёхмерного численного моделирования в сферических переменных термогравитационной конвекции в мантии Земли под континентальной и океанической литосферой переменной толщины (Евразия и её окружение). В результате численного моделирования трёхмерной конвекции под литосферой Евразии в сферических переменных автор получил температурные поля, которые он сопоставляет с сейсмотомографическими изображениями для данного региона.

В главе 5 с использованием метода искусственной сжимаемости построена численная модель и на ее основе представлена трёхмерная структура конвективных течений под океанической литосферой в зоне спрединга и в зоне субдукции. На основе решения задач о влиянии спрединга на формирование субдукции около удалённого континента и о формировании субдукции вследствие надвига континента на пассивную океаническую литосферу автор представил механизм возникновения погружающихся гравитационно-неустойчивых областей океанической литосферы.

В Заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

В целом, завершая общую характеристику работы, оппонент считает необходимым отметить ключевую особенность диссертации. Она состоит в том, что в работе представлено трёхмерное численное моделирование свободно-конвективных течений именно в верхней мантии, т.е., предполагается, по крайней мере, двухслойная структура мантии. В настоящее время подавляющее число работ посвящено численному моделированию однослойной общемантийной конвекции, без разделения мантии на

верхнюю и нижнюю. Проведенные автором исследования трехмерной верхнемантийной конвекции, представленные в диссертации, отличаются научной новизной и по содержанию, и по использованным подходам. Численное моделирование проведено корректно с математической точки зрения, достоверность полученных результатов численного моделирования не вызывает сомнений.

Вместе с тем объективная оценка диссертации требует выделить некоторые дискуссионные утверждения. По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. В постановке задачи численного моделирования конвекции в верхней мантии под литосферой переменной толщины принимается постоянная динамическая вязкость для всей верхней мантии, равная $1.1 \cdot 10^{21}$ кг/(м · с) (стр. 244). При решении задачи о влиянии спрединга на образование зоны субдукции под удаленный континент автор также принимает значение динамической вязкости, постоянное для всей верхней мантии ($3 \cdot 10^{22}$ кг/(м · с)) (стр. 271). Однако структура верхней мантии, расположенной под литосферой в континентальной области, как и под океанами, по крайней мере, двухслойная [Добрецов и др., 2001]: под литосферой залегает астеносфера, а под астеносферой находится слой *C*. Астеносфера и слой *C* разделены границей фазового перехода «оливин-вадслеит» на глубине 410 км. Динамическая вязкость астеносферного слоя $\eta_a \approx 3 \cdot 10^{17}$ Н · с/м² и для слоя *C* $\eta_C \approx 4 \cdot 10^{18}$ Н · с/м², т.е., соответственно, на 4-5 и 3-4 порядка ниже, чем вышеуказанные значения. Чем обусловлены гораздо более высокие, чем вышеуказанные (η_a и η_C), значения вязкости, принимаемые в численном моделировании, и есть ли возможность проведения в будущем численных экспериментов в двухслойной системе «астеносфера-слой *C*» с различающимися вязкостями этих слоев?

2. При тестировании численных моделей (стр. 89) и упоминании законов теплообмена (стр. 123) указывается число Рэлея для всей мантии, равное $2 \cdot 10^4$ и $3 \cdot 10^4$. Следует отметить, что оценки числа Рэлея для нижней мантии на основе решения задачи о теплообмене между каналом термохимического плюма и горизонтальным нижнемантийным конвективным потоком, $Ra_{nm} = (1 - 6.6) \cdot 10^6$ [Кирдяшкин и др., 2009]. В астеносфере под океаном $Ra > 5 \cdot 10^5$, в астеносфере под континентом вблизи зоны субдукции также $Ra > 5 \cdot 10^5$ [Добрецов и др., 2001; Кирдяшкин А.А. Кирдяшкин А.Г., 2008]. Какими соображениями обусловлено использование значений числа Рэлея $2 \cdot 10^4$ и $3 \cdot 10^4$ для всей мантии при тестировании численных моделей?

3. В диссертации для чисел Рэлея $Ra < 5 \cdot 10^4$ получена оценка для зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея вида $Nu \approx 0.114Ra^{1/3}$ (стр. 123). Однако на основе

экспериментальных данных получено, что для стационарной свободной конвекции в горизонтальном слое закон теплообмена имеет вид: $Nu \sim Ra^{1/4}$ при $Ra = 3 \cdot 10^3 - 10^5$ [Чандрасекхар, 1961; Добрецов и др., 2001]. Согласно экспериментальным данным и теоретическим исследованиям, закон теплообмена в горизонтальном слое для $Ra > 10^5$, т.е., для турбулентного режима свободной конвекции имеет вид $Nu = 0.1Ra^{1/3}$ [Михеев, 1949; Леонтьев, Кирдяшкин, 1965; Кирдяшкин и др., 2004]. Является ли в достаточной степени корректным использование подобного закона теплообмена в случае течения при $Ra < 5 \cdot 10^4$?

4. При численном моделировании конвективных течений в верхней мантии автор говорит о «мелкомасштабной моде конвекции» (стр. 26, 168-170 и далее). Как указывает автор: «Мелкомасштабная конвекция проявляется в форме вытянутых ячеек с горизонтальными размерами в 500 км между восходящим и нисходящим потоками и развивается по периферии кратонов». Отметим, что лабораторное моделирование мантийных свободно-конвективных течений показывает наличие мелкомасштабных течений в виде конвективных валиков, создающихся в условиях неустойчивой стратификации у поверхностей теплообмена; направление течения в валиках перпендикулярно к течению в крупномасштабных конвективных ячейках [Добрецов и др., 2001; Кирдяшкин и др., 2006]. В частности, конвективные валики создаются у кровли и подошвы астеносферы под срединно-океаническим хребтом и под континентом при наличии зоны субдукции [Добрецов и др., 2001; Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., 2008]. Так, размеры валиков у кровли астеносферы под Срединно-Атлантическим хребтом в области по широте между субтропиками составляют ~ 125 км и ~ 50 км для валиков под континентом [Добрецов и др., 2001]. В случае течения, о котором говорит автор, мы имеем дело с конвективными ячейстыми течениями горизонтальными размерами ~ 500 км, где «локальные» восходящие и нисходящие течения – это обычные подъемные и опускные потоки конвективных ячеек. Какие соображения можно было бы привести в пользу того, чтобы использовать определение «мелкомасштабный» применительно к таким течениям?

5. Автор связывает основные объёмы излияний Сибирских траппов с центральными восходящими свободно-конвективными течениями под кратоном (стр. 170). Причину гранитоидного магматизма на периферии Сибирского кратона он видит в восходящих течениях, получающихся в численном моделировании и отнесенных им к «мелкомасштабной конвекции» (стр. 170-171). Вместе с тем в работах [Dobretsov et al., 2008; Kirdyashkin A.G, Kirdyashkin A.A., 2016] на основе геолого-геофизических данных и

лабораторного и теоретического моделирования показано, что Сибирская крупная магматическая провинция (КМП) является результатом действия мантийного термохимического плюма большой тепловой мощности. Этот плюм зарождался вследствие плавления на границе ядро-мантия, излияние его магматических расплавов происходило при наличии «тугоплавкого» дунит-гарцбургитового слоя в литосфере, расположенного на глубине ~ 100 км. Массовый поток магматического расплава Сибирского плюма $\Delta G = 13341$ кг/с, а его тепловая мощность $N = 1.6 \cdot 10^{12}$ Вт [Kirdyashkin A.G, Kirdyashkin A.A., 2016]. Формирование крупного интрузивного магматического тела гранитного состава – батолита может быть обусловлено процессами тепло- и массопереноса в расплаве грибообразной головы термохимического плюма, образующегося на границе «ядро-мантия» и имеющего относительную тепловую мощность $1.9 < Ka < 10$ [Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., 2018]. Характер проявления плюма на поверхности при излиянии магматического расплава из канала плюма зависит от тепловой мощности плюма и граничных условий в области зарождения плюма и в литосфере. Полный анализ излияний магматических расплавов с образованием КМП может быть осуществлен с учетом процесса плавления в канале термохимического плюма и границ фазовых переходов в мантии. Автор диссертации связывает излияния Сибирских траппов с конвективными течениями. Для дальнейшего обоснования такой связи будет уместной оценка возможности осуществления такого сценария с энергетической точки зрения, т.е., определение количества тепловой энергии, необходимой для образования колоссальных объемов излияний платобазальтов Сибирской КМП, и определение величины массового потока расплава, обеспечиваемого восходящим течением. Есть ли возможности у автора провести такие расчеты в рамках его численных моделей?

6. Автор называет субдукцией процесс образования гравитационно-неустойчивой «капли» с последующим отрывом от континентальной плиты. Этот процесс приводит к образованию слэба - погружающейся в мантию части океанической литосферы (стр. 267). Нужно отметить, что обычно субдукция определяется как процесс погружения именно океанической литосферной плиты под континент или островную дугу [например, Добрецов и др., 2001; Хаин, Ломизе, 2005]. Хотелось бы уточнить, что автор понимает в данном случае (стр. 267) под «каплей»: её состав должен соответствовать континентальной литосфере или океанической?

Вышеуказанные замечания не снижают научного уровня работы, достаточной степени обоснованности, новизны и достоверности основных защищаемых положений диссертации. Диссертационная работа В.В. Червова «Численное моделирование

конвекции в верхней мантии Земли» является законченной научно-квалификационной работой, вносящей значительный вклад в области разработки численных моделей конвективных течений в мантии Земли. Автореферат достаточно полно отражает содержание, основные результаты и выводы диссертации. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (отрасль науки: физико-математические) и отвечает критериям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации, Червов Виктор Васильевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заведующий лабораторией физического и химического моделирования геологических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук», доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН

Кирдяшкин Алексей Анатольевич

12 мая 2022 года

Российская Федерация, 630090 г. Новосибирск, проспект Академика Копылова, 3

Тел.: 8(383) 330-85-25

E-mail: aak@igm.nsc.ru



Я ПЬСЬ УДОСТОВЕРЯЮ
ЗАВ. КАНЦЕЛЯРИЕЙ
ШИПОВА Е.Е.

12.05.2022

Я, Кирдяшкин Алексей Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.