

ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

© 2019 г. В. П. Трубицын^{1,2}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

E-mail: trub@ifz.ru

Поступила в редакцию 04.06.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Глобальная геодинамика определяется тепловой конвекцией в мантии, которая проявляется на поверхности в движениях, рельефе, тепловом потоке и вулканизме. На Земле тепловая конвекция осложнена тем, что вся литосфера раздроблена на жесткие плиты, земная кора разбита на шесть отдельных плавающих континентов и ряд островов, на дне мантии имеются два гигантских скопления тяжелого вещества, при высокой интенсивности восходящие конвективные потоки приобретают форму плюмов, в мантии происходят фазовые превращения вещества. Влияние многих факторов на структуру мантийных течений в основном изучено. Актуальным является согласование новых данных о фазовых переходах на глубинах 650 км–700 км с сейсмическими данными о положении этих границ. До настоящего времени не решена конечная проблема глобальной геодинамики, даже полусхематично не известна трехмерная структура течений во всей мантии, которая в целом согласовалась бы с имеющимся в настоящее время комплексом данных наблюдений геофизики, геохимии, геологии и численного моделирования.

Ключевые слова: глобальная геодинамика, тепловая конвекция, мантийные течения

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191180-198>

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная геодинамика включает в себя тектонику литосферных плит, тектонику плавающих континентов и тектонику мантийных плюмов. Разработка основ глобальной геодинамики и выяснение роли тепловой конвекции в мантии Земли продолжалось более полувека. К настоящему времени основы теории глобальной геодинамики построены. Глобальная геодинамика определяется тепловой конвекцией в веществе с вязкопластической реологией, с учетом фазовых переходов, эффектов частичного плавления и влияния композиционных примесей. Холодные тяжелые высоковязкие конвективные потоки (в виде погружающихся литосферных плит), а также и горячие легкие конвективные потоки (в виде поднимающихся мантийных плюмов) приводят в циркуляционное движение все вещество мантии. На поверхности конвекция проявляется в движении литосферных плит, на стыках которых происходят землетрясения, в дрейфе континентов, в катастрофических вулканических извержениях. Течения мантийной

конвекции формируют глобальный рельеф дна океанов и вызывают неравномерности теплового потока.

В 1901 г. Г. Бенар (Н. Benard) экспериментально обнаружил, что при нагревании слоя жидкости в нем возникают течения в виде конвективных валов. Для интерпретации этого явления Рэлей (John William Strutt) в 1916 г. разработал метод расчета условий возникновения тепловой конвекции и структуры возникающих медленных конвективных течений в линейном приближении. Фактически в этих работах были заложены теоретические основы тепловой конвекции.

Разработка представлений глобальной геодинамики и выяснение роли конвекции в мантии Земли начались с работ метеоролога А. Вегенера (А. Wegener). В 1924 г на основании данных географии, геологии и биологии он обосновал гипотезу о дрейфе континентов. В качестве причины дрейфа А. Вегенер предполагал, что благодаря центробежным силам континенты вспарывают океаническую кору и движутся подобно кораблям. Однако долгое время такое объяснение

вызывало сомнение. Так, крупнейший геофизик того времени Г. Джеффрис (H. Jeffreys) указывал на отсутствие сил, способных деформировать кору и вызывать движение континентов.

В 1931 г. А. Холмс (A. Holms) предположил, что, несмотря на то что температура в мантии ниже солидуса, в мантии возможны медленные конвективные течения. При этом он представлял мантийную конвекцию в виде струй и вихрей. В 1935 г. Ч. Пекерис (Ch. Pekeris) и 1936 г. А. Хейлс (A. Hales) на основе теории гидродинамики оценили скорости конечно-амплитудной конвекции в мантии и вязкие напряжения. Они также показали, что наблюдаемые аномалии гравитационного поля и топография могут быть объяснены тепловой конвекцией в мантии.

Становление представлений о тектонике литосферных плит связано с работами Г. Хесса (H. Hess). В 1962 г. он открыл, что дно океанов раздвигается от линейных хребтов и океаническая кора погружается в мантию в зонах субдукции. Г. Хесс также предполагал, что континентальная кора с осадками должна сгребаться, образуя окраинные горы. При этом он, также как и К. Ранкорн (K. Runcorn), полагал, что движущей силой тектоники плит является тепловая конвекция в мантии.

Результаты изучения тепловой конвекции в линейном приближении для декартовых и сферических моделей были суммированы в книге С. Чандрасекара [Chandrasekhar, 1961]. После этого началось интенсивное изучение развитой тепловой конвекции, описываемой нелинейными уравнениями переноса тепла, массы и импульса. В работе [Turcotte, Oxburgh, 1972] был разработан метод погранслоя, с помощью которого были поняты основные свойства развитой тепловой конвекции. В последующем изучение свойств тепловой конвекции с параметрами вещества мантии Земли проводилось в основном методами численного моделирования [Schubert et al., 2004].

На основании данных лабораторных измерений вещества и данных сейсмологии были обнаружены фазовые переходы оливина в вадслеит на глубине 420 км и затем рингвудита в перовскит на глубине 660 км, которые, соответственно, ускоряют и тормозят конвективные течения в мантии. Большой вклад в численный анализ свойств мантийной конвекции с учетом фазовых переходов был внесен в 80-е и 90-е гг. У. Христенсоном [U. Christensen] с коллегами.

Накопленные к этому времени данные изменений движения дна океанов позволили понять

основные закономерности тектоники литосферных плит. Наибольший вклад в создание современной теории тектоники плит внесли Д. МакКензи (D. McKenzie) и Дж. Морган (J. Morgan). Одним из важнейших проявлений и доказательств тектоники плит является открытое Морганом явление «прожигания» мантийными плюмами движущихся плит с образованием цепочек вулканических островов.

С конца прошлого и начала нынешнего века главной проблемой глобальной геодинамики стало построение моделей тепловой конвекции в веществе с параметрами, соответствующими реальной мантии, которые воспроизводили бы тектонику мантийных плюмов и тектонику литосферных плит. Для построения глобальных геодинамических моделей, учитывающих континенты, необходимо было обобщение тепловой конвекции переходом к термо-химической конвекции (если не рассматриваются химические реакции). При этом континенты рассматриваются как дополнительная легкая компонента.

В начале 2000-х гг. была выяснена природа бывшего долгое время загадочным слоя D'' на дне мантии. На глубине около 2750 км перовскит переходит в фазу постперовскит. Одновременно на дне мантии были открыты области пониженных скоростей поперечных волн, которые были интерпретированы как скопления тяжелого первичного вещества Земли и эклогита коры погружающихся плит. Процессы формирования этих скоплений при взаимодействии тяжелого вещества с мантийными течениями также могут быть воспроизведены в рамках термо-композиционной конвекции.

В разработку моделей тепловой конвекции с вязко-пластической реологией, объясняющих процесс раскола литосферы на отдельные жесткие плиты большой вклад внесли авторы статей [Bergovici, 2003; 2007; Tackley, 1994; 2000]. Эффекты термо-химической конвекции интенсивно исследовались в работе [Tackley, 2007].

Исследования тепловой конвекции в мантии с учетом плавающих континентов начались с упрощенной модели, рассмотренной в работе [Gurnis, 1988], в которой движение твердой пластины, плавающей на вязкой жидкости, прослеживалось одним маркером. Интенсивное изучение закономерностей тепловой конвекции с плавающими континентами проводилось в 2000-е годы в ИФЗ РАН. На многочисленных двумерных и трехмерных сферических моделях конвекции с переменной вязкостью были

воспроизведены основные проявления теплового и механического взаимодействия континентов с конвективными течениями [Трубицын, 2000; 2005; Trubitsyn et al., 2006; 2008].

Исследования мантийных плюмов интенсивно изучались в последние два десятилетия. Мантийные плюмы зарождаются в нижнем тепловом погранслое на дне мантии. Они имеют тепловую природу. Однако плюмы захватывают часть тяжелого вещества со дна мантии, которое тормозит их подъем. При подходе к литосфере вещество в плюмах частично плавится, что облегчает прохождение плюмов через движущиеся литосферные плиты (см. обзор [Ito, Keken, 2007]).

Основной нерешенной проблемой на протяжении всего времени формирования представлений глобальной геодинамики оставалась структура конвективных течений в мантии. Именно она может объяснить особенности всех глобальных проявлений геодинамики в геофизике, геохимии и геологии и завершит построение теории глобальной геодинамики.

Незнание структуры конвективных течений тормозило построение теории глобальной геодинамики и постоянно порождало различные, в частности, несостоятельные, гипотезы. Некоторые такие гипотезы долгое время принимались, и только с большим трудом выяснялась их неприемлемость. К числу таких гипотез относится представление о раздельной конвекции в верхней и нижней мантии благодаря полагавшейся непроницаемости границы фазового перехода на глубине 660 км. Долгое время требовалось для выяснения природы глубинных плюмов и признания, что мантийные плюмы горячих точек зарождаются при неустойчивости тепловой конвекции, а химические примеси не только не являются причиной зарождения и подъема плюмов, а, наоборот, несколько тормозят их.

Становление современной глобальной геодинамики сопровождалось выяснением особенности протекания физических процессов в Земле и сменой многих привычных представлений. Кроме крупнейшего геофизика 20 века англичанина Г. Джеффриса, не признававшего тепловую конвекцию в мантии, крупнейший американский геофизик Д. Андерсон выдвигал возражения против глубинного зарождения плюмов горячих точек. Крупный российский геолог В. Белоусов не признавал тектонику литосферных плит. Ряд российских ученых возражают против представлений об общемантийной конвекции,

продолжая придерживаться гипотез о двухслойной конвекции в мантии и о химической причине зарождения плюмов горячих точек.

ТЕКТОНИКА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Процесс раскола литосферы Земли на отдельные плиты был понят и стал моделироваться после того, как было выяснено, что при медленных процессах сдвиговые напряжения порождают микротрещины, которые могут находиться в динамическом равновесии. В результате процесс длительной сдвиговой деформации удалось математически записать как течение с эффективной вязкостью, зависящей не только от температуры и давления, но от сдвигового напряжения [Tackley, 2000; Bercovici, 2003; Schubert et al., 2004]. В последнее десятилетие удалось в основном решить проблему тектоники плит и на моделях показать, как плиты могут естественно и самосогласованно возникать при тепловой конвекции в вязкой жидкости со свойствами вещества мантии Земли [Bercovici, 2007].

Проиллюстрировать, как литосфера разбивается на отдельные жесткие плиты, можно численными экспериментами, проведенными в ИФЗ РАН [Трубицын, 2012]. Был рассмотрен нагреваемый слой жидкости с вязкостью, зависящей от температуры и давления, соответствующей силикатному веществу мантии (см. рис. 1). В слое возникает тепловая конвекция. При этом, вязкость верхнего более холодного слоя оказывается очень высокой, порядка 10^{26} Пас. В результате на поверхности мантии возникает сплошной слой литосферы. Далее было учтено свойство эффективной пластичности реального вещества Земли (с учетом микротрещин и содержания воды), при которой вязкость зависит не только от температуры и давления, но и от напряжений. Это приводит к тому, что в местах повышенного напряжения повышается концентрация микротрещин, и эффективная вязкость резко падает. Наибольшие напряжения при конвекции возникают над нисходящими конвективными течениями в утолщенной части литосферы.

В результате верхняя холодная высоковязкая литосфера мантийными течениями разбилась на шесть жестких плит, разделенных тремя хребтами и двумя зонами субдукции. Скорости всех точек внутри каждой плиты одинаковые и меняются скачком на стыках плит в хребтах и зонах субдукции. Поэтому каждая плита движется со своей скоростью, утолщается по мере удаления от хребта и погружается в мантию в зонах субдукции. Рассчитанный рельеф дна океана

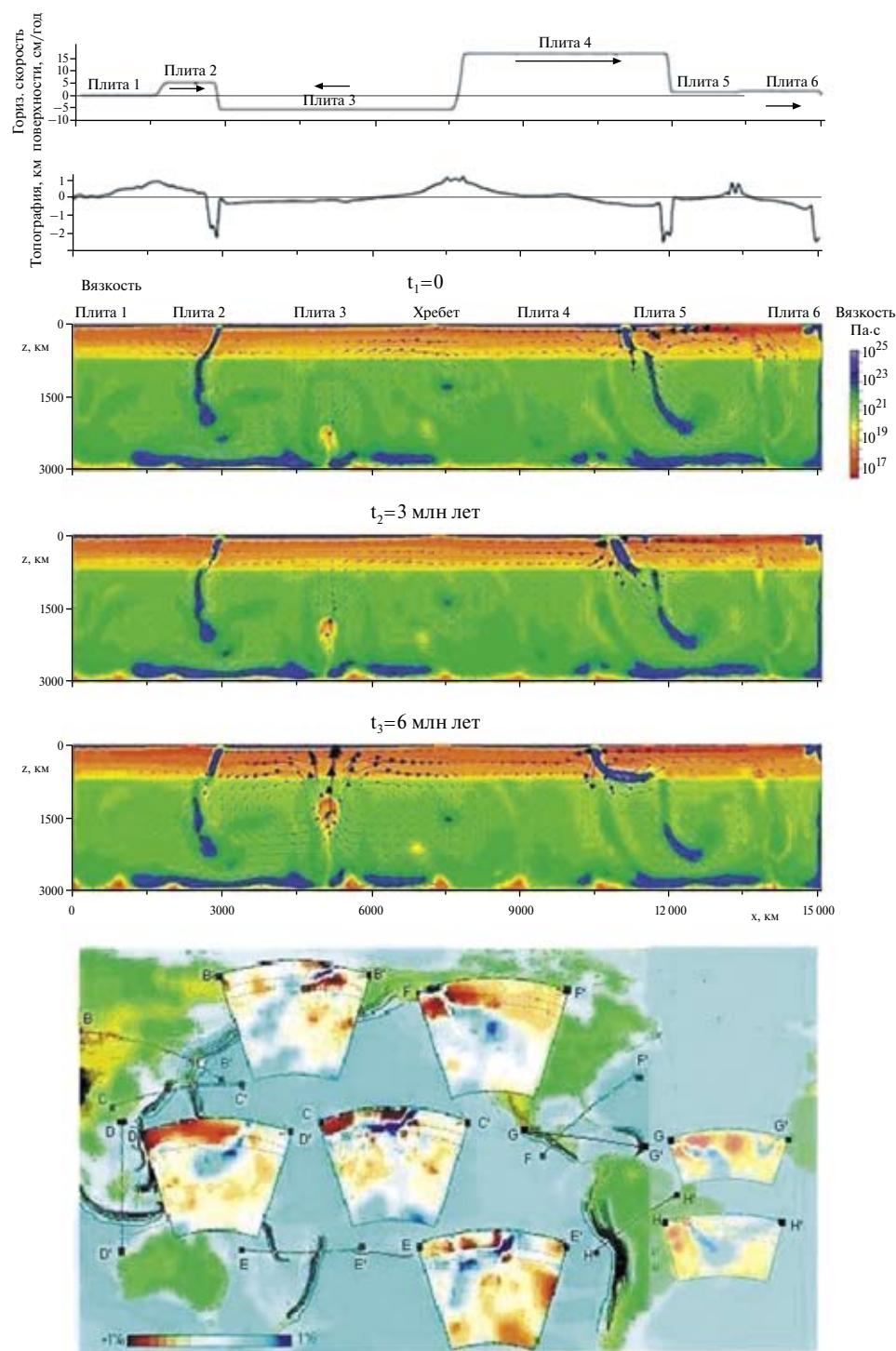


Рис. 1. Численная модель эволюции конвекции в слое нагретой жидкости с вязкопластической реологией вещества, соответствующей веществу мантии Земли. Распределения вязкости показано цветом с приведенной справа шкалой. Скорости течений показаны стрелками с максимальным значением 15 см/год. Вверху приведено распределение горизонтальных скоростей возникших плит и вычисленный рельеф дна океана. Внизу приведены данные томографии по работе [Karason, Hilst, 2000; Albarede, Hilst, 2002; Li et al., 2008].

показывает глубоководные впадины и подъем дна в хребтах.

На фазовой границе 660 км плиты изгибаются и частично разрываются. Рассчитанное поле температур, вязкости, конвективных скоростей, скоростей плит и рельефа дна океана с глубоководными впадинами в зонах субдукции и срединно-океаническими хребтами соответствуют наблюдаемым проявлениям тектоники литосферных плит на Земле. Наблюдаемые по данным томографии конфигурации погружающихся плит вблизи границы 660 км для различных мест могут соответствовать различным этапам рассчитанной эволюции конвекции [Трубицын В.П., Трубицын А.П., 2014].

Несмотря на то, что проблема раскола на отдельные плиты к настоящему времени в принципе решена, и этот процесс может быть воспроизведен в математических моделях, остаются проблемы более детального изучения процесса взаимодействия плит, в частности, на стыках двух океанических плит в зоне субдукции. По данным наблюдений субдукция обычно является односторонней, при которой в зоне субдукции погружается только одна океаническая плита. Однако на рис. 1 видно, что в моделях конвекции с недеформируемой верхней границей возникает двухсторонняя субдукция. В работе [Cramer et al., 2012] показано, что нужно ставить более реальные граничные условия. В океанах литосфера покрыта слоем воды. При этом верхняя граница литосферы может деформироваться. При таких условиях, если на стыке одна из плит начнет изгибаться и погружаться в мантию, то она оказывается ниже другой плиты. В результате в мантию погружается только одна из плит и субдукция становится односторонней.

Для дополнения теории тектоники литосферных плит необходимо еще построить трехмерные сферические модели конвекции, самосогласованно учитывающие взаимодействие многих плит.

ТЕКТОНИКА ПЛАВАЮЩИХ КОНТИНЕНТОВ

На Земле океаны покрывают не всю поверхность, а только около ее трех четвертей, и при этом океаны разделены континентами, которые могут дрейфовать на вязкой мантии и менять конфигурацию океанов.

Основы тектоники плавающих континентов были разработаны в основном в ИФЗ РАН

в 2000-х гг. [Трубицын, 2000; 2005; 2008]. Для описания взаимодействия конвективных течений с континентами и выявления закономерностей дрейфа континентов решалась взаимосвязанная система уравнений конвекции в жидкости и уравнений движения твердых тел Эйлера.

Понять основные физические процессы, проявляющиеся при взаимодействии конвективных течений с плавающими континентами, можно с помощью численного эксперимента [Трубицын, 2005]. Был рассмотрен слой вязкой нагреваемой жидкости, на который помещены две легкие твердые пластины (см. рис. 2). В жидкости возникает тепловая конвекция с несколькими конвективными ячейками. Конвективные течения приводят в движение пластины. Поскольку пластины тормозят выход тепла из мантии, то они изменяют распределение температуры в мантии и вызывают перестройки всей структуры мантийных течений. Пластины (континенты) сначала объединяются над нисходящим конвективным потоком. Благодаря теплоэкранированию мантия под возникшим суперконтинентом постепенно прогревается и возникает суперплюм, который поднимает суперконтинент и разрывает его. Весь цикл занимает примерно 0.5 млрд лет.

Результаты этого численного эксперимента на простейшей модели подтверждают и иллюстрируют открытые А. Вегенером и затем развитые Т. Вильсоном закономерности дрейфа континентов, и выявляют ряд их новых свойств.

Для моделирования будущего дрейфа континентов в ИФЗ РАН была рассмотрена сферическая модель конвекции, по параметрам максимально приближенная к современной мантии [Трубицын, 2008]. Сейсмическая томография дает пространственное распределение скоростей сейсмических волн в мантии. Известно, как эти скорости зависят от температуры. Пересчетом было найдено пространственное распределение температуры в реальной современной Земле. Это распределение температуры было взято в качестве начального состояния. Таким образом, рассчитывалась не абстрактная модель конвекции, а модель, соответствующая реальной современной Земле. На жидкость наложено шесть теплопроводных жестких плавающих пластин, соответствующих по форме современным континентам, и восемь меньших пластин, по форме соответствующих большим островам, взятым по географическим

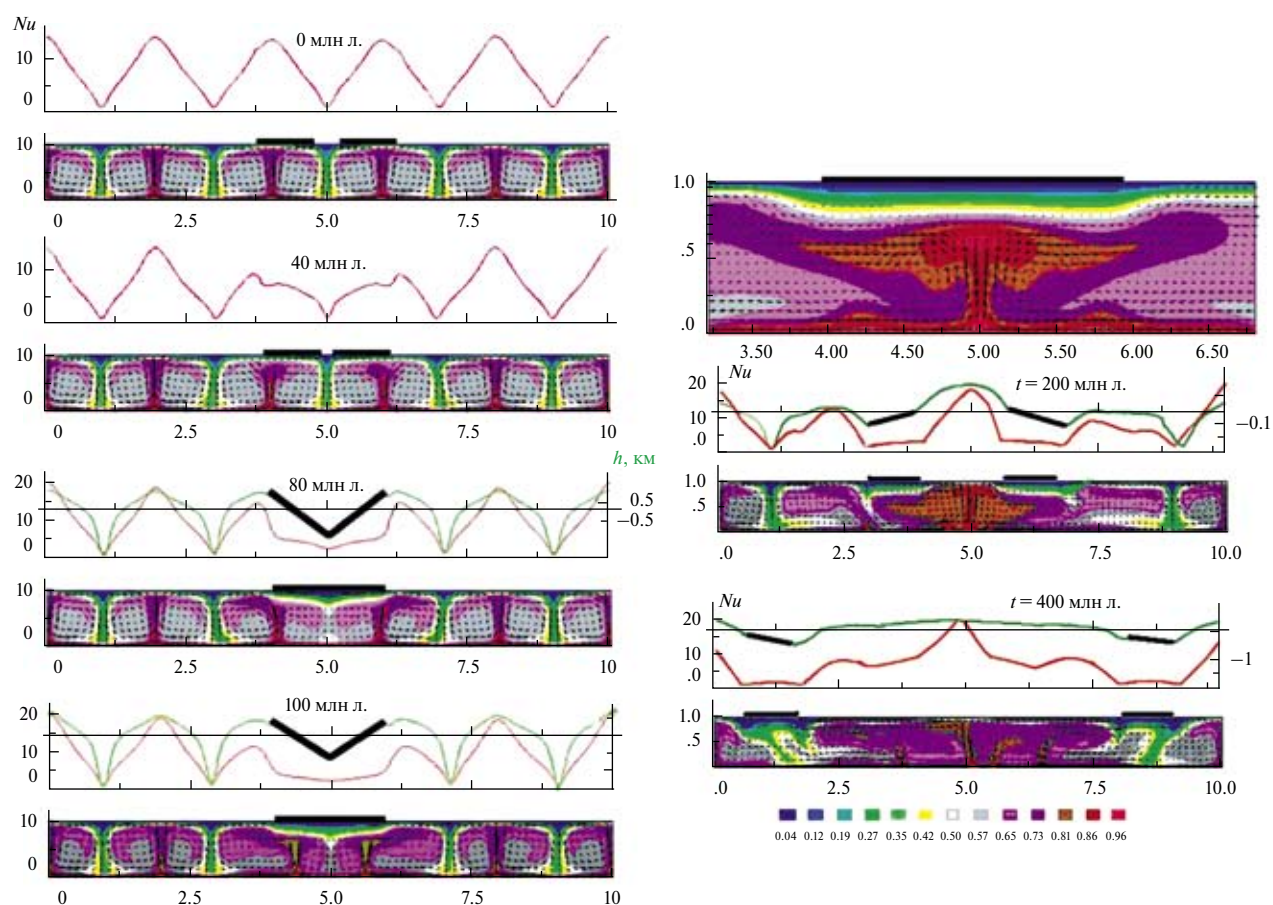


Рис. 2. Рассчитанная эволюция тепловой конвекции в слое жидкости с двумя плавающими пластинами (черный цвет). Безразмерная температура показана цветом с приведенной внизу шкалой. Красная линия — относительный тепловой поток Nu , зеленая линия — рельеф h в км. Время показано в млн лет.

картам (см. рис. 3). Далее численно решалась нелинейная система уравнений тепловой конвекции совместно с системой уравнений Эйлера для перемещения и вращения континентов под действием сил вязкого сцепления с мантийными течениями с учетом обратного теплового и механического влияния континентов на конвекцию. В начальном поле температур холодные области мантии стали опускаться, а горячие — подниматься. В результате в мантии возникла тепловая конвекция. Благодаря механическому сцеплению конвективные течения приводят в движение все континенты и острова. Однако, благодаря тепловому взаимодействию, континенты постоянно влияют на поле температуры в мантии. Поскольку модель построена с учетом всех механических и тепловых взаимодействий вязкой мантии и твердых континентов и при этом для параметров вещества, соответствующих реальной современной Земле, то она позволила рассчитать возможный будущий дрейф континентов.

Численные модели, рассчитанные в ИФЗ РАН, показывают эволюцию мантийной конвекции с учетом взаимодействия со всеми шестью континентами и крупными островами реальной формы. За рубежом уже в 2000-е гг. имелось намного больше возможности для расчета моделей тепловой конвекции с плавающими континентами. Однако все их силы были брошены на построение теории тектоники океанических плит, поскольку это было более актуально и было понятно, как жесткие плиты могут возникать самосогласованно в рамках тепловой конвекции с вязкопластической реологией. В последнее время и за рубежом началось моделирование взаимодействия континентов с конвекцией [Yoshida, 2010; 2012; Yoshida, Santos, 2011]. При этом основное внимание в настоящее время уделяется уточнению свойств вещества мантии и начальному распределению температуры. Однако моделирование континентов в этих работах в виде простейших квадратов, не позволяет пока детально проследить взаимодействие

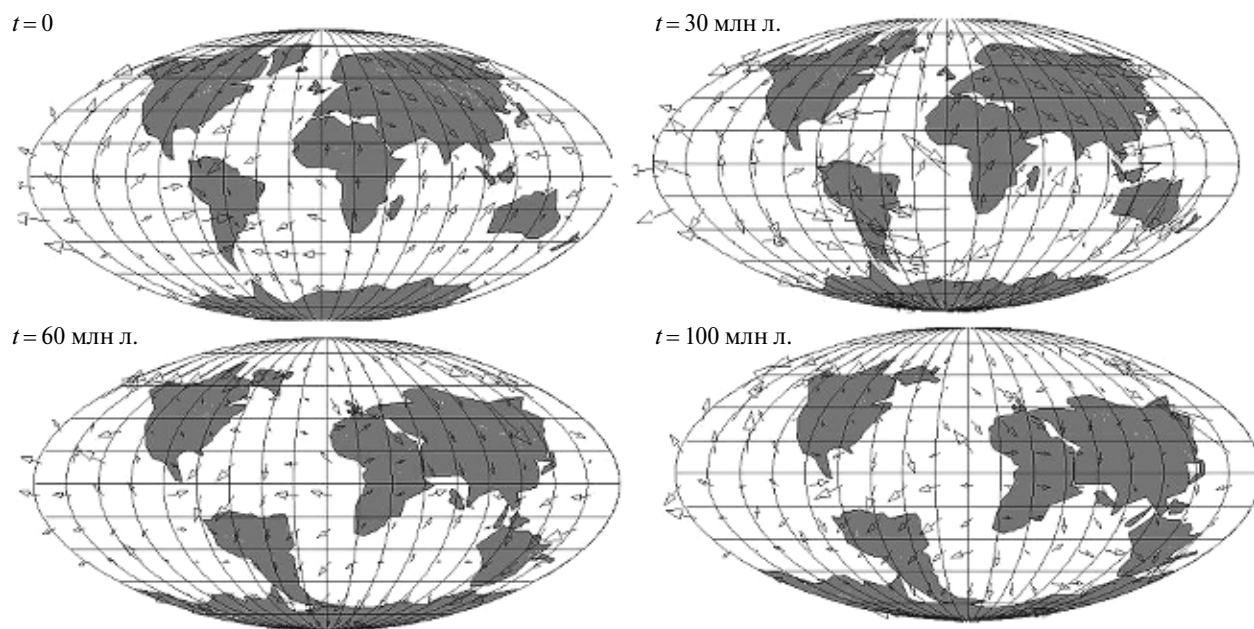


Рис. 3. Численная модель будущего дрейфа континентов. Время показано в млн лет, максимальная длина стрелки соответствует скорости 12 см/год. Контурами показаны рассчитанные положения континентов и островов, а стрелками — скорости мантийных течений в последовательные промежутки времени в будущее на 100 млн лет. Согласно модели, Ю. Америка будет двигаться к Антарктиде, а Евразия, Австралия и Африка объединятся в суперконтинент.

сталкивающихся между собой континентов, как это было сделано в работе [Трубицын, 2008].

Эффективным методом изучения современных мгновенных глобальных течений в мантии и движения континентов является метод, развитый в работе [Hager, O'Connell, 1981]. В этом методе пренебрегается уравнением переноса тепла и решается только уравнение Стокса. Движущей силой конвективных течений являются латеральные вариации распределения плотности, которые находятся на основании данных томографии о вариациях скоростей сейсмических волн. При этом горячими плавающими областями пренебрегается, а учитываются только холодные, тяжелые погруженные в мантию литосферные плиты. В настоящее время такое приближение, учитывающее только тяжелые плиты, применяется в качестве начального условия и при решении полной системы уравнений конвекции.

ТЕКТОНИКА МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ

Представления о мантийных плюмах были введены в 1971 г. Дж. Морганом для объяснения происхождения цепочек вулканических островов типа Гавайской. Было предположено, что в мантии Земли существуют горячие узкие

вертикальные долговременные струи — плюмы, которые идут через всю мантию и прожигают движущиеся плиты непосредственно над плюмами. В мировой литературе о природе этих плюмов долгое время шли дискуссии и высказывались предположения о том, что плюмы зарождаются только благодаря химическим примесям легкого вещества и что плюмы поднимаются в мантии независимо от конвективных течений. Однако в последнее время было твердо установлено, плюмы горячих точек представляют собой обычные восходящие конвективные потоки, которые возникают при высокой интенсивности тепловой конвекции и при подъеме приобретают грибовидную форму с головкой и ножкой [Ito, Keken, 2007]. В обзорах [Ricard, 2007; Bercovici, 2007] мантийные плюмы определяются как восходящие горячие потоки, возникающие в нижнем погранслое тепловой конвекции.

Пока в плюмах горячих точек не обнаружено какого-либо значимого количества изотопов легкого вещества из ядра. В то же время в них имеются примеси тяжелого эклогита, опустившегося вместе с плитами на дно мантии [Sobolev et al., 2000; Tackley, 2007], и частично первичного вещества Земли. Эти тяжелые химические примеси несколько тормозят плюмы [Dannberg, Sobolev, 2015].

Погружающиеся плиты и поднимающиеся мантийные плюмы приводят в циркуляционное движение все вещество мантии. Плиты и плюмы сложным образом взаимодействуют между собой. При этом влияние плит значительно превалирует.

Поскольку мантийный плюм аномально быстро уносит вверх тепло из места своего зарождения, то к этому месту должен подводиться также аномально большой поток тепла или в этом месте должен быть локальный источник тепла. Поэтому (в соответствии с законом сохранения энергии) в мантии Земли первичные долгоживущие плюмы могут зарождаться только на границе с горячим высоко теплопроводящим железным ядром. Вторичные долгоживущие плюмы также могут возникать только в том месте, куда может быстро подводиться тепло, в данном случае, первичными плюмами.

Кроме этих мантийных долгоживущих тепловых плюмов горячих точек, в мантии Земли имеются термохимические плюмы, для которых химические примеси существенно облегчают их возникновение. Такие плюмы возникают при мелкомасштабной конвекции в субдукционном или подарковом клине (*sub-arc mantle wedge*), куда плиты поставляют воду, понижающую вязкость и температуру плавления вещества. При этом длительное существование такого термохимического плюма оказывается возможным (в соответствии с законом сохранения массы) только в том месте, к которому есть постоянный приток воды, в частности, приносимыми движущейся плитой. В отличие от плюмов горячих точек, субдукционные плюмы перемещаются вместе с плитами.

В работах [Лобковский, Котелкин, 2000; Добрецов, 2010] развиваются альтернативные гипотезы, полагая, что не только субдукционные плюмы, но и общемантийные плюмы горячих точек поднимаются благодаря легким добавкам. При этом полагается, что плюмы горячих точек могут зарождаться не только на границе с ядром, но и внутри мантии и даже в ядре.

Природу мантийных плюмов горячих точек можно выяснить на моделях тепловой конвекции при высоких числах Рэлея. Рассчитанные модели показывают, что при росте интенсивности восходящие и нисходящие потоки становятся узкими, затем конвекция становится неустойчивой, после отмирания восходящей горячей струи на дне мантии зарождается новая. Во время ее подъема эта новая струя приобретает грибовидную форму с головкой и ножкой.

При достижении литосферы головка плюма или прорывается через литосферу, образуя Большую магматическую провинцию, или останавливается. После этого от плюма остается долгоживущая ножка — восходящая струя, питающая подлитосферный шлейф под движущейся плитой.

Долгое время обсуждалась проблема, как мантийный плюм прорывается через литосферу и почему он создает на поверхности плиты не сплошную гряду вулканов, а дискретную цепочку вулканических островов с наблюдаемыми интервалами. Механизм прорыва вещества из подлитосферного шлейфа исследован в работе [Balmer et al., 2009; 2011]. В шлейфе возникает мелкомасштабная конвекция. Благодаря частичному плавлению многокомпонентного вещества с разной сжимаемостью и композиционно зависимой реологии (*compositionally dependent rheology*) мелкомасштабная конвекция становится пульсирующей, и восходящие потоки этой конвекции периодически порываются через литосферу, образуя цепочку вулканов. Горячая точка — место современного прорыва горячего вещества из подлитосферного шлейфа. В этой, принятой в настоящее время модели, в отличие от оригинальной идеи Моргана о непосредственном прожигании плюмом литосферы, плюмам фактически отводится лишь роль заданного потока горячего вещества из нижней мантии, питающего подлитосферный шлейф.

Зарождение тепловых плюмов, их эволюцию и отмирание можно воспроизвести на численных сферических моделях интенсивной тепловой конвекции в вязкой жидкости с параметрами, соответствующими веществу мантии [Trubitsyn, Evseev, 2016]. Длительная эволюция мантийной конвекции представлена в виде фильма на сайте [<http://rjes.wdcb.ru/v16/2016ES000569/plumes-hr.html>].

Новым явилось выявление пульсаций ножек тепловых плюмов уже в нижней мантии. Выяснилось, что горячее вещество в ножке плюма может подниматься не непрерывно, а порциями. Времена между последовательными приходами порций согласуются с временами между извержениями в горячих точках Земли. Эти пульсации могут модулировать спектр колебаний мелкомасштабной конвекции в подлитосферном шлейфе.

Природа рассмотренных пульсаций ножек мантийных плюмов также может быть понята на численных моделях [Евсеев, Трубицын, 2017a]. С ростом числа Рэлея сначала возникают квазистационарные неппульсирующие

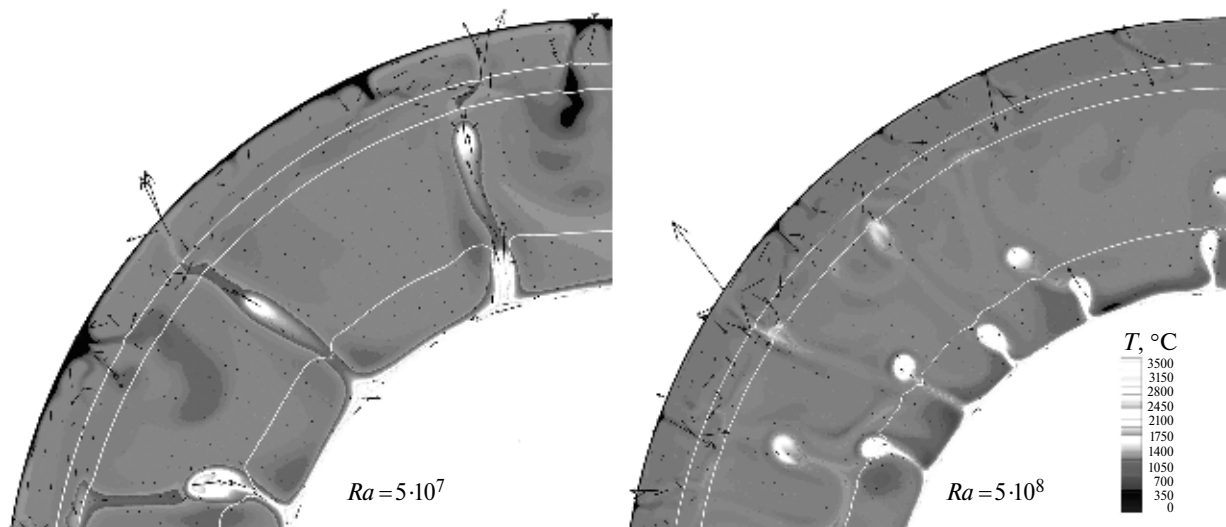


Рис. 4. Численная модель тепловой конвекции в мантии. Показана часть сферы в экваториальном сечении. При высокой интенсивности восходящие потоки становятся нестационарными, они отмирают и вновь зарождаются. При $Ra = 5 \cdot 10^7$ ножки плюмов пульсируют. Среднее время подъема головки плюма около 15 млн лет, последовательные порции горячего вещества поднимаются в ножке с интервалом около 10 млн лет. В ранней Земле при $Ra > 5 \cdot 10^8$ вместо плюмов поднимались конвейеры термиков.

плюмы, которые отмирают и вновь зарождаются. При $Ra = 10^7$ они становятся неустойчивыми с пульсирующими ножками. Среднее время подъема головки плюма около 15 млн лет, последовательные порции горячего вещества поднимаются в ножке с интервалом около 10 млн лет. Это согласуется с данными измерений, выявляющими доминирующий период извержений в горячих точках 10 млн лет. При $Ra = 5 \cdot 10^7$ ножка плюма разрывается, и на ее месте поднимается конвейер дискретных горячих областей – термиков. При еще большем числе Рэлея конвекция становится турбулентной с хаотическим рождением термиков. Выявленный режим с пульсирующими ножками имеет место в диапазоне чисел Рэлея от 10^7 до 10^8 , что соответствует современной и несколько ранней мантии Земли. Как видно на рис. 4, он является переходным между режимом плюмов со сплошной ножкой и режимом конвекции с разорванными ножками, соответствующими термикам.

Ранее Земля была более горячей. Она остывает со скоростью, примерно, на 50 К за миллиард лет. Поскольку вязкость вещества мантии очень сильно зависит от температуры, то интенсивность тепловой конвекции ранее была еще большей и вместо плюмов могли подниматься конвейеры термиков.

Представленная численная модель показывает, что при интенсивной тепловой конвекции без каких-либо химических примесей могут

возникать долгоживущие плюмы, свойства которых соответствуют наблюдаемым мантийным плюмам горячих точек. При этом плюмы могут пульсировать уже в нижней мантии.

Важной обсуждаемой в настоящее время проблемой мантийных плюмов является количественный анализ их вклада в перенос тепла от ядра к поверхности и вклада в движущую силу мантийной конвекции [Zhong, 2006].

СКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО ВЕЩЕСТВА НА ДНЕ МАНТИИ

Важным для строения Земли и глобальной геодинамики в последнее десятилетие стало открытие гигантских скоплений тяжелого вещества на дне мантии. По данным сейсмической томографии на дне мантии имеются две аномальные области: под Африкой высотой в среднем до 1500 км и под Южной частью Тихого океана высотой до 1000 км. В этих областях скорости поперечных волн понижены на 2–3% [Ritsema et al., 2011]. Поскольку скорости поперечных волн чувствительны к температуре и уменьшаются при повышении температуры, то указанные области должны быть горячими. В то же время скорости объемных звуковых волн (комбинаций поперечных и продольных) в этих областях, наоборот, повышены. Поскольку они чувствительны к плотности вещества, то в указанных областях плотность вещества должна

быть повышенной. Отсюда следует вывод, что эти области соответствуют скоплениям тяжелого вещества, которое аномально нагрелось, покаясь на горячем ядре. Эти скопления называют Большими провинциями пониженных скоростей поперечных волн (Large Low Shear Velocity Province, LLSVP). Скопление под Африкой названо Тузо в честь Т. Вильсона, а скопление под Тихим океаном — Джейсон в честь Дж. Моргана. Предполагается, что на дно мантии ранее опустилось обогащенное железом и содержащее He_3 первичное вещество мантии и затем постоянно опускается эклогит, отделяющийся от погружающихся океанических плит. Мантийные течения сгребают это вещество в два скопления.

Этот процесс можно проиллюстрировать на примере упрощенной модели тепловой конвекции с заданным неподвижным континентом (Африка) и расходящимися океаническими плитами (Тихий океан) [Евсеев, Трубицын, 20176]. Рассчитана термо-композиционная конвекция в нагреваемой сферической области (приэкваториальном трехмерном секторе) с параметрами вещества, соответствующими мантии Земли при числе Рэлея $Ra = 5 \cdot 10^7$. На дно мантии был помещен ровный слой утяжеленного на 3% вещества. Расчеты показали, что в мантии после установления тепловой конвекции нисходящие мантийные течения деформируют слой тяжелого вещества, и он распадается на несколько скоплений. Затем был учтен континент в виде области повышенной на четыре порядка вязкости. В результате теплоэкранирующего эффекта мантия под континентом прогревается, структура конвекции перестраивается, под континентом возникает восходящий мантийный поток, который формирует на дне мантии под континентом одно большее скопление, в остальной области на дне мантии остается несколько меньших скоплений. Затем, заданием скорости на поверхности были учтены движущиеся в разные стороны две плиты. На рис. 5 показана установившаяся структура мантийных течений и распределение температуры. При этом, как видно на рис. 5, все тяжелое вещество на дне мантии сгруппировалось в виде двух больших скоплений, под континентом и под океаном. Расположение этих скоплений хорошо согласуется с данными томографии [Ritsema et al., 2011], которые, к сожалению, в данной работе привести для сравнения невозможно без специального разрешения.

Такое расположение скоплений объясняется тем, что нисходящими мантийными потоками двух зон субдукции тяжелое вещество на дне мантии выжимается в разные

стороны — под неподвижный континент и под большую океаническую плиту.

При высоких давлениях вещество мантии переходит в фазу постперовскит. В отсутствие конвекции фазовая граница перехода перовскита в постперовскит находится на глубине 2750 км. При конвекции возникают латеральные вариации этой границы по глубине, величина которых пропорциональна наклону кривой фазового равновесия dp/dT . Для перехода перовскита в постперовскит этот наклон очень большой. Поэтому в горячих областях равновесное давление фазового перехода увеличивается настолько (выше давления на дне мантии), что фазовая граница опускается за пределы мантии. В результате фаза постперовскита в мантии оказывается не слоем, лежащим ниже границы 2750 км, а аналогично скоплениям тяжелого вещества, тоже в виде двух областей на дне мантии, куда приходят холодные нисходящие потоки. На рис. 5 они оконтурены белой линией. При этом, в соответствии с данными сейсмологии, области постперовскита оказываются расположенными на дне мантии между скоплениями тяжелого вещества, которые находятся под горячими восходящими мантийными потоками.

Как частично видно на рис. 5 и как показывают другие, более детальные модели, тепловые мантийные плюмы горячих точек, зарождаются преимущественно на краях скоплений тяжелого вещества на дне мантии.

На рис. 5 в поле температуры также видно, что покоящиеся на границе с раскаленным железным ядром скопления не только тяжелые, но и аномально горячие.

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЙ В МАНТИИ

Многокомпонентное вещество мантии Земли в зависимости от давления и температуры находится в разных фазах. На диаграмме давление — температура области устойчивости каждой фазы отделены кривыми равновесия сосуществующих фаз.

Метод учета влияния фазовых переходов на структуру конвективных течений в мантии разработан У. Христенсеном с коллегами [Christensen, Yuen, 1984; 1985]. Выяснилось, что экзотермические фазовые переходы с наклоном кривой равновесия $\gamma = dp/dT > 0$ ускоряют прохождение конвективных потоков через границы фазовых переходов, а эндотермические — тормозят. Это объясняется тем, что при отрицательном γ в месте холодного

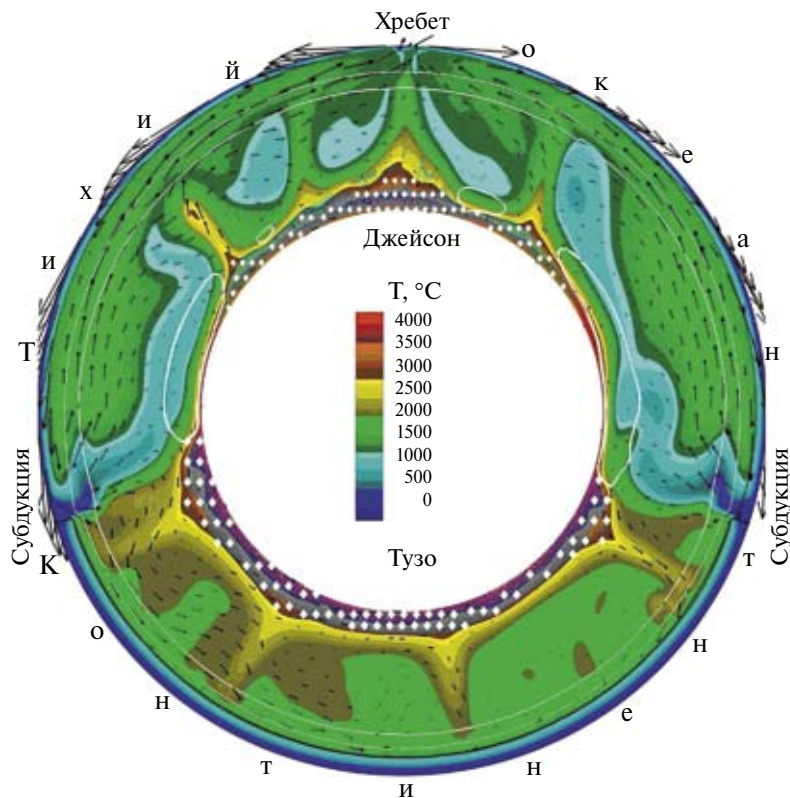


Рис. 5. Численная модель тепловой конвекции в мантии с учетом большого неподвижного континента (Африка) и океанических плит типа Тихого океана. Распределение температуры показано цветом, скорости мантийных течений – стрелками. Ромбиками показаны два скопления тяжелого вещества под Тихим океаном, соответствующим – Тузо и под Африкой – Джейсон. Белыми линиями в виде деформированных окружностей показаны границы фазовых переходов на средних глубинах 420 км, 660 км. Фаза постперовскит находится внутри линз на дне мантии.

нисходящего потока давление фазового перехода повышено. Поэтому граница перехода понижается. В результате в этом месте тяжелая фаза заменяется на легкую, вертикальный столб жидкости в этом месте становится легче и нисходящий поток замедляется. При очень большом по модулю отрицательном значении наклона γ может наступить разбиение конвективных течений на два слоя.

Наиболее значимыми фазовыми переходами считаются переходы на глубинах 420 км, 660 км и 2750 км. Как правило, большинство переходов в более плотную фазу сопровождается выделением тепла. Очень важным исключением является эндотермический переход рингвудита в перовскит + магнеовюстит на глубине 660 км. По данным измерений долгое время наклон оценивался, примерно, как $\gamma = -3$ мПа/К. В работах [Christensen, Yuen, 1984; 1985] на двумерных декартовых моделях было показано, что расслоение конвекции наступает только при очень большом по модулю отрицательном значении $\gamma = -8$ мПа/К.

В работе [Machetel, Weber, 1991] была рассчитана упрощенная сферическая двумерная осесимметричная модель конвекции с учетом фазового перехода на глубине 660 км при $\gamma = -2$ мПа/К ... -4 мПа/К. В этой модели, благодаря тормозящему эффекту фазового перехода, конвекция оказывалась попеременно двухслойной и однослойной и была названа авторами перемежающейся (intermittent). Далее в этой работе было показано, что периоды перемежающейся конвекции с аваланчами (лавинообразными прорывами вещества из верхней мантии в нижнюю, avalanches) хорошо согласуются с данными геологии о периодах тектонической активности Земли. Далее в работе [Tackley et al., 1994] были рассчитаны трехмерные сферические модели с переменной вязкостью для значений наклона $\gamma = -3$ мПа/К и $\gamma = -4$ мПа/К и было показано, что даже при $\gamma = -3$ мПа/К, граница 660 км не является препятствием для погружающихся плит, а плиты на ней лишь временно задерживаются. Перемежающаяся конвекция может возникать (как и в двумерной модели) только при

$\gamma = -4$ мПа/К, что по абсолютному значению несколько больше, чем для реальной Земли по данным лабораторных измерений.

На простых двумерных декартовых моделях [Трубицын, Рыков, 2002; Трубицын и др., 2008] с учетом влияния ширины фазового перехода было показано, что для возникновения перемежающейся конвекции значение наклона кривой фазового перехода должно быть более высоким по модулю, чем принимаемое для мантии. Поэтому делался вывод, что не только расслоение конвекции, но и перемежающаяся конвекция с аваланчами в современной мантии маловероятны.

В последующие годы уточненные лабораторные измерения фазового перехода рингвудит — перовскит последовательно давали все меньшее и меньшее по модулю отрицательное значение для γ . Так уже в работе [Fei et al., 2004] по данным измерения для оливина было получено новое более точное значение $\gamma = -1.3$ мПа/К, которое значительно отличалось от принимаемого ранее $\gamma = -3$ мПа/К. Поэтому этими авторами был приведен дополнительный, более важный довод, о том, что фазовый переход не является эффективным барьером для мантийной конвекции.

В работе [Lobkovsky, Kotelkin, 2004] аналогично работам [Machetel, Weber, 1991; Tackley et al., 1994] рассчитывалась также трехмерная сферическая модель конвекции, но более упрощенная, с постоянной вязкостью и только для высокого по модулю отрицательного значения наклона фазового перехода $\gamma = -4$ Па/К. Несмотря на то, что такое значение γ существенно отличается от данных для мантии Земли, в этой работе было указано, что в мантии Земли имеет место перемежающаяся конвекция с аваланчами, периоды которой сопоставимы с геологическими тектоническими циклами.

В работе [Ohtani, Litasov, 2006] подытоживаются результаты измерений сухого оливина, полученные разными авторами, и значение наклона γ для фазового перехода на глубине 660 км оценивается в интервале от $\gamma = -0.4$ мПа/К до $\gamma = -1.3$ мПа/К.

В работе [Ishii et al., 2017] исследованы фазовые превращения в пиролите (смеси оливина, пироксенов и граната в соотношении, соответствующем веществу верхней мантии) в области температур 1600–2200 °С и давлений 12–28 ГПа. Значение наклона кривой фазового перехода в перовскит на глубине 660 км оценено как около $\gamma \approx -1$ мПа/К. При этом было показано, что

на глубинах 650–700 км имеется не один фазовый переход в перовскит, а еще несколько. При этом для наиболее горячих восходящих потоков эффективный наклон перехода γ не отрицателен, как ранее полагали, а даже становится положительным, и, следовательно, он не тормозит, а ускоряет конвекцию. Очевидно, что этот эффект еще больше уменьшает возможность расслоения или возникновения перемежающейся конвекции.

Непосредственные сейсмические определения положения границы фазового перехода 660 км, а именно опускания границы в холодных погружающихся потоках и поднятия в горячих потоках, в настоящее время имеют еще большую неопределенность [Kojitani et al., 2016]. Во многих местах положение границы качественно согласуется с предсказаниями по лабораторным данным и соответствует значению фазового наклона $\gamma = -2$ мПа/К ... -2.5 мПа/К. Однако есть не мало случаев, когда ни подъема, ни опускания нет, а в некоторых случаях имеется даже антикорреляция. Такое несоответствие в значении наклона γ , а также случаи антикорреляции можно объяснить влиянием воды на свойства оливина [Ohtani, Litasov, 2006]. Поскольку в мокром оливине (до 3% содержания воды) граница перехода может смещаться по глубине на 20 км, то при интерпретации сейсмических данных в области локального высокого содержания воды этот эффект может приводить к кажущемуся значению наклона в два раза по модулю большему.

Данные измерения микрообразцов рингвудита показывают, что он может присоединять воду до 3%. Поэтому в переходной зоне мантии, соответствующей слою рингвудита, может содержаться большое количество воды (сравнимое с запасами мирового океана). Однако при этом надо иметь в виду тот факт, что тормозящий эффект фазового перехода обусловлен переходом не вне, а внутри погружающейся плиты, которая может не успевать впитывать воду из окружающего вещества переходной зоны.

Таким образом, в качестве вероятного усредненного эффективного значения наклона фазовой кривой на глубине 660 км в настоящее время можно принять $\gamma \approx -1$ мПа/К и с кажущимся проявлением в сейсмических данных для регионов повышенного содержания воды до $\gamma \approx -2$ мПа/К.

В последнее десятилетие было построено очень много двух и трехмерных моделей конвекции в мантии Земли при значении

$\gamma = -2.5$ мПа/К с параметрами, максимально приближенными к параметрам реальной Земли. Эти модели учитывают сжимаемость вещества, сферические эффекты, переменность вязкости и других кинетических и термодинамических коэффициентов, тепловыделения при фазовых переходах, а также вязкопластическую реологию. Во всех этих моделях перестройки, связанные с расслоением конвекции и перемежающейся конвекции, которые могли бы быть вызваны фазовым переходом, не возникают.

Таким образом, по имеющимся данным лабораторных измерений, граница фазового перехода на глубине 660 км должна ускорять горячие восходящие мантийные потоки и только несколько тормозить погружающиеся плиты. Этот переход не препятствует погружению плит в нижнюю мантию, а лишь отклоняет их от вертикали, при этом в основном в зонах субдукции с отстающими плитами.

Поведение погружения океанических плит в мантию Земли прослеживается по данным томографии. Как можно видеть на рис. 1, результаты численного моделирования конвекции с параметрами, близкими к реальной Земле [Трубицын В.П., Трубицын А.П., 2014], и данные томографии хорошо согласуются и показывают, что плиты проходят в нижнюю мантию с изгибом, но без глобальных перестроек конвекции и без глобальных аваланчей.

Длительная задержка отдельной погружающейся плиты в окрестности глубины 660 км и затем ее прорыв типа одиночного аваланча возможна только локально в отдельном регионе. В этом месте на фазовый переход рингвудита в перовскит должны оптимально влиять эффект повышенного содержания воды (усиливающий торможение погружения плиты) и сопутствующие дополнительные фазовые переходы в пиrolитовой мантии. При повышенной температуре в пиrolитовой мантии происходит также переход граната-мажорита в перовскит, ускоряющий плиту, а при пониженной — фазовый переход акимотоита в перовскит, тормозящий плиту [Hirose, 2002; Tauzin, Ricard, 2014]. Поэтому наибольшее торможение погружения плиты должно быть для аномально холодной и насыщенной водой плиты. Возможно, этими же эффектами объясняется разброс сейсмических данных о поднятиях и опусканиях границы фазового перехода в разных регионах.

Аргументом отсутствия глобальных аваланчей в современной Земле может также служить факт, что на томографии всей мантии не обнаружено

аномальных скоплений океанических плит, которые должны были бы возникнуть при перемежающейся конвекции.

Поскольку при большем числе Рэлея расслоение конвекции облегчается [Трубицын и др., 2008], то могла бы быть вероятность возникновения расслоенной или перемежающейся конвекции в ранней, более горячей, Земле. Однако, как отмечалось выше, по уточненным данным измерений [Ishii et al., 2017], при более высокой температуре эффективный наклон кривой фазового перехода 660 км для пиrolита мантии меняет знак и становится даже положительным, ускоряющим не только подъем плюмов, но и ускоряющим погружение плит.

ГЛОБАЛЬНАЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ

Гипотеза о двухслойной конвекции, в течение нескольких десятилетий вызывавшая дискуссию, была выдвинута геохимиками для объяснения различия химического и изотопного состава изверженных пород срединно-океанических хребтов (MORB = Mid Oceanic Ridge Basalts) и базальтов океанических островов (OIB = Oceanic Island Basalts). Базальты MORB относительно химически однородны и деплетированы (обеднены) несовместимым элементам (как тугоплавкими элементами Ca, Al, REE, U, Th, так и легкоплавкими Rb, K, Cs, Pb, а также изотопа гелия-3). Базальты океанических островов OIB менее деплетированы и химически гетерогенны.

Полагалось, что в срединно-океанические хребты поступает вещество из обедненной верхней мантии, а океанические острова формируются из вещества первичного состава, приносимого из нижней мантии. Таким образом полагалось, что в мантии имеется два основных резервуара различного химического состава, которые мало перемешивались между собой в течение долгого времени. Количество несовместимых элементов, находящихся в континентальной коре, примерно равно ушедшим из верхней мантии. Поэтому в качестве деплетированного резервуара хорошо подходила верхняя мантия. в качестве резервуара первичного состава ранее принималась вся нижняя мантия.

Поскольку как раз в то время появились данные о том, что фазовый переход на глубине 660 км тормозит проникновение через него нисходящих и восходящих конвективных потоков, то появилась гипотеза о двухслойной

конвекции, очень хорошо подходящая для объяснения существования двух основных геохимических резервуаров Земли [Albarade, Hilst, 2002]. Эта гипотеза интенсивно развивается в работах Н.Л. Добрецова (см., например, [Добрецов, 2010]).

Однако постепенно появлялось все больше данных, противоречащих гипотезе двухслойной конвекции в мантии Земли. В сейсмической томографии видно, что погружающиеся холодные плиты (в которых сейсмические скорости повышены) опускаются до дна мантии. Также тепловые мантийные плюмы со дна мантии выходят на поверхность Земли.

До настоящего времени остается нерешенной эта фактически основная проблема глобальной геодинамики, не построена трехмерная картина конвективных течений, показывающая, как при общемантийной конвекции в срединно-океанические хребты доставляется деплетированное вещество.

В качестве первого, очень грубого приближения, можно рассмотреть следующую термохимическую модель Земли (см. рис 6). Можно считать деплетированной не только верхнюю, но, хотя в несколько меньшей мере, и нижнюю мантию. При этом баланс массы будет соблюден, если учесть, что несовместимые элементы уходят не только в континентальную кору, но и в тяжелые скопления на дне мантии. Эти скопления возникли, как и континенты, в процессе длительной эволюции, и обогащены несовместимыми элементами. При этом в P - T условиях на дне мантии их вещество находится в более плотном состоянии, чем породы мантии. Эти скопления являются как бы антиподами континентов.

Породы континентальной гранитной и базальтовой океанической коры имеют низкую плотность. Отметим, что континенты плавают на вязкой мантии и не тонут не только благодаря легкой коре, но благодаря композиционно легкой континентальной литосфере. При этом композиционный эффект компенсируется с эффектом утяжеления холодной континентальной литосферы.

При увеличении давления субдуцируемое вещество океанической коры становится тяжелее окружающего пиrolита. Поэтому вещество, обогащенное несовместимыми элементами, уходит из мантии не только в континентальную кору, но и погружается вместе с океаническими плитами на дно мантии, образует скопления.

В такой, очень грубой картине, конвективные течения охватывают всю мантию (детали

см. ниже) и в срединно-океанические хребты поступает в соответствии с данными наблюдений деплетированное вещество из всей мантии. Заметим, что, поскольку рассматриваемое экваториальное сечение является лишь частью трехмерной сферы, то схематически изображенные течения могут быть не замкнуты.

Общемантийные плюмы зарождаются на дне мантии преимущественно на краях горячих скоплений и частично над ними. Они захватывают как малые примеси тяжелое, обогащенное несовместимыми элементами и гелием-3, вещество скоплений. Таким образом, в соответствии с данными наблюдений в хребты поступает деплетированное вещество верхней и нижней мантии, а плюмами к поверхности со дна мантии доставляется измененное мантийными процессами субдуцированное вещество (которое ранее в рамках двухслойной конвекции принимали как первичное вещество нижней мантии).

При этом по данным измерений плюмы захватывают из скоплений также и изотопы гелия-3. Поскольку он быстро улетучивается из коры, то он не может попадать на дно мантии вместе с субдуцирующим веществом. Согласно [Tolstikhin, Hofmann, 2005] гелий-3 мог уйти на дно мантии на ранних этапах эволюции Земли вместе с толстой протокорой, которая была обогащена солнечным гелием-3.

Движущими силами общемантийной тепловой конвекции являются холодные тяжелые нисходящие потоки и горячие легкие восходящие. В теории тепловой конвекции в приближении погранслоя показано, как горячие восходящие и холодные нисходящие мантийные струи приводят в циркуляционное движение все вещество конвективной ячейки [Schubert et al., 2004]. При конвекции в веществе с постоянной вязкостью эти силы равноправны. Однако для конвекции в современной Земле вязкость погружающихся плит больше вязкости мантийных плюмов на четыре и более порядков. При этом скорости погружения плит всего раза в два меньше скорости подъема плюмов. Поэтому, как это можно видеть на полях скоростей конвекции с переменной вязкостью, градиент скорости в окрестности погружающихся плит падает не очень сильно. В результате сила сцепления плит с окружающим веществом, пропорциональная вязкости и градиенту скорости, оказывается существенно больше по сравнению с плюмами. Поэтому именно плиты в большей мере вовлекают в движение окружающее вещество мантии. Поэтому движущие силы глобальной конвекции

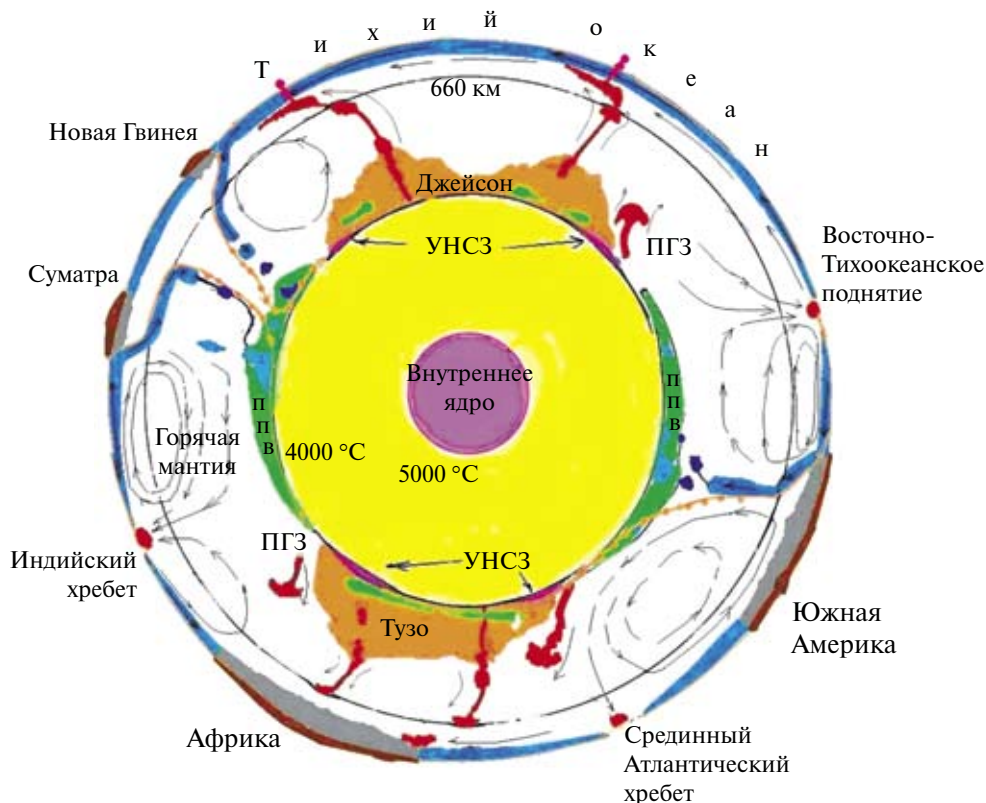


Рис. 6. Схематическая термохимическая геодинамическая модель современной Земли в экваториальном сечении [Trömpner, 2010, с дополнениями]. Континенты показаны темно-коричневым цветом, океанические плиты — синим, фаза постперовскита на дне мантии — зеленым, горячие скопления (Тузо и Джейсон) — коричневым, общемантийные плюмы — красным, конвективные течения — линиями со стрелками, ПГЗ — зона генерации плюмов, УНСЗ — зона ультра низких скоростей, интерпретируемых как зоны с высоким содержанием железа при высокой степени частичного плавления, ППВ — показана фиолетовым цветом.

в современной мантии в основном обусловлены высоковязкими погружающимися плитами и только частично восходящими струями в виде плюмов. Можно грубо представить, что конвекция в мантии как бы вынужденная, и вещество мантии увлекается погружающимися плитами. В результате, как это частично видно на рис. 1 и рис. 5, конвективные ячейки становятся скошенными, и интенсивная циркуляция вещества преимущественно происходит в верхней половине мантии, но без резкого разделения на два слоя.

Неточными являются (приводимые, в частности, в справочниках) высказывания о том, что мантийные плюмы горячих точек являются дополнением к тепловой конвекции и могут проходить через мантию независимо от конвекции. Это представление возникло из-за того, что обычные субдукционные плюмы зарождаются на стыках плит и перемещаются вместе с движущимися плитами, а общемантийные плюмы горячих точек прожигают движущиеся плиты. Однако плиты — это не вся конвекция. Конвекция

устанавливается как суперпозиция течений, наводимых плитами и плюмам. Плиты и плюмы взаимодействуют между собой. При этом роль плит, примерно, в 5–10 раз больше. Локально, непосредственно вблизи плюма, окружающее вещество увлекается плюмом, а вблизи плиты — плитой. На поверхности, где плита и плюм соприкасаются, в результате взаимодействия происходит прожигание плиты.

Следует все-таки особо подчеркнуть, что в описанной выше модели общемантийной конвекции с деплетированными и верхней, и нижней мантией, нельзя считать, что вся мантия химически однородна. Численная модель (см. рис. 1, рис. 5) четко показывает, что фазовая граница 600 км не разделяет конвекцию на два слоя и течения охватывают всю мантию. Однако конвективные течения в значительной мере наиболее интенсивны и сосредоточены больше в верхней части верхней мантии. Соответственно, именно отсюда в хребты поступает больше вещества, и поэтому-то оно (в соответствии с данными измерений) хорошо перемешано.

С глубиной скорость конвективных течений падает, и перемешивание вещества ослабевает.

Ранее казалось, что химическая стратификация в мантии невозможна, т. к. конвективные течения интенсивно перемешивают вещество мантии, а процессы его сепарации на диффузионном уровне очень медленные. Однако сепарация в магматических камерах при частичном плавлении очень эффективна. Можно сказать, что там имеются постоянно действующие источники химической неоднородности. При этом движущиеся океанические плиты эффективно переносят химические неоднородности (вещество коры) на большие расстояния и вглубь мантии. Также отделение эколита океанической коры от погружающихся плит достаточно эффективно. В результате в мантии устанавливается динамическое равновесие между процессами перемешивания и химической сепарации. Благодаря тому, что при конвекции в реальной мантии имеется множество разнообразных конвективных ячеек и вихрей, возникает большое количество разнообразных геохимических резервуаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени теория глобальной тектоники Земли, в основном, построена. При ее создании использовались данные наблюдений геофизики, геохимии и геологии, а также данные лабораторных измерений вещества. При построении моделей привлекалась физика и математическое моделирование. Теперь стало понятным, почему в мантии при температуре ниже солидуса возможна конвекция, почему холодные «каменные» плиты толщиной более 50 км могут изгибаться при погружении в мантию и при этом не ломаться. Оказалось, что это обусловлено большой длительностью процессов, при которых диффузия успевает придавать твердым телам (локально эффективно) вязкие свойства.

На долгом пути создания теории глобальной тектоники Земли были периоды принятия ошибочных гипотез. Так долгое время полагалось, что конвекция в мантии может быть двухслойной и плюмы поднимаются независимо от тепловой конвекции благодаря легким химическим примесям.

В общем плюмы — это восходящие струи конвекции, которые могут возникать и при тепловой, и при термохимической конвекции. При малой интенсивности конвекция — ламинарная, при очень большой — турбулентная, при

средней — конвекция находится в переходном плюмовом режиме. Интенсивность конвекции определяется латеральными вариациями плотности, зависящей от степени нагрева и химических примесей, а также вязкостью и толщиной слоя.

На Земле имеется два вида вулканов и, соответственно, два вида порождающих их плюмов. Большинство обычных вулканов на Земле порождается субдукционными плюмами, которые поднимаются в мантийном клине. Одно время полагали, что они возникают благодаря выделению тепла при трении погружающейся океанической плиты. Однако выяснилось, что этого тепла недостаточно. Субдукционные плюмы имеют термохимическую природу. Погружающаяся плита приносит воду, которая понижает температуру плавления вещества и, соответственно, его вязкость. В результате интенсивность мелкомасштабной термохимической конвекции в клине резко возрастает, и она переходит в плюмовый режим. При этом плюм длительно поддерживается благодаря постоянному подводу воды движущейся плитой.

Мантийные глубинные плюмы вызывают катастрофические извержения и порождают Большие магматические провинции и горячие точки Земли. По аналогии с термохимическими субдукционными плюмами, которые возникают благодаря химическим примесям, вначале полагали, что и глубинные общемантийные мантийные плюмы горячих точек также имеют химическую природу. Однако выяснилось, что они имеют тепловую природу. Необходимая для возникновения плюмов высокая интенсивность конвекции обеспечивается не химическими примесями, а большим перепадом температуры и большой толщиной слоя. Эти плюмы зарождаются на границе с жидким, высоко теплопроводящим, железным ядром, которое постоянно компенсирует поток тепла, уносимый плюмами с места их формирования. Химические примеси могут лишь вносить поправки в свойства этих плюмов. Мантийные плюмы зарождаются на дне мантии преимущественно на краях скоплений тяжелого вещества, которое частично захватывается и уменьшает плавучесть плюмов.

Благодаря фазовому переходу на глубине 660 км холодные нисходящие конвективные потоки тормозятся. При переменной вязкости с параметрами современной Земли двухслойная конвекция возникала бы при $\gamma \approx -7$ мПа/К, перемежающаяся конвекция с глобальными аваланчами, примерно, при $\gamma \approx -5$ мПа/К. Однако по последним данным измерения свойств

вещества мантии наклон кривой фазового перехода составляет всего $\gamma \approx -1$ мПа/К... -2.5 мПа/К. При этом имеющиеся многочисленные модели конвекции для современной Земли даже при $\gamma \approx -2.5$ мПа/К показывают, что конвекция в мантии не расслоенная и не перемежающаяся. Таким образом, в современной Земле конвекция является общемантийной с небольшим торможением плит и их изломом на глубине 660 км. При этом тормозящий эффект фазового перехода локально может быть больше в аномально холодных местах с повышенным содержанием воды и меньше в более горячих сухих местах.

Гипотезы двухслойной или перемежающейся конвекции выдвигались при построении структуры мантийных течений для объяснения причины различия химического состава магм срединно-океанических хребтов и горячих точек. Предполагалось, что эти магмы поступают, соответственно, или из верхней, или из нижней мантии. Однако в настоящее время твердо установлено, что основной движущей силой тектоники Земли является общемантийная тепловая конвекция. Погружающиеся до дна мантии холодные высоковязкие плиты, а также частично поднимающиеся до поверхности горячие узкие плюмы приводят в циркуляционное движение все вещество мантии и взаимодействуют между собой. В срединно-океанических хребтах поступает деплетированное вещество как из обедненной несовместимыми элементами верхней мантии, так и из частично обедненной нижней мантии. Мантийными плюмами в горячие точки доставляется частично деплетированное вещество из нижней мантии, дополненное несовместимыми элементами, захваченными из скоплений на дне мантии.

Рассмотренная схема глобальной термохимической конвекции является очень упрощенной, но может частично прояснить неприменимость к современной Земле долгое время господствующей гипотезы о двухслойной конвекции, которая опиралась в качестве аргументов на данные о геохимических резервуарах. В реальности, благодаря конвективному перемешиванию и сепарации, в мантии существует много геохимических резервуаров. В данной схеме рассмотрено формирование только двух наиболее важных.

Построение полной трехмерной картины конвективных течений в мантии, объясняющей эволюцию распределения химических изотопов в мантии, является следующей проблемой глобальной геодинамики.

В работе обсуждались только основные проблемы глобальной геодинамики, над решением которых в течение более полувека работало очень много ученых всего мира.

Иллюстрации результатов в виде рисунков даны, в основном, по работам автора только потому, что воспроизведение рисунков других авторов требует получения специальных разрешений.

Автор выражает благодарность И.Н. Толстину за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добрецов Н.Л.* Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 6. С. 761–784.
- Евсеев М.Н., Трубицын В.П.* Модель общемантийной конвекции с образованием долгоживущего изолированного резервуара, питающего срединно-океанический хребет // Докл. РАН. 2017б. Т. 476. № 2. С. 205–208.
- Евсеев М.Н., Трубицын В.П.* Пульсации и разрывы ножек тепловых мантийных плюмов // Докл. РАН. 2017а. Т. 476. № 5. С. 559–561.
- Котелкин В.Д., Лобковский Л.И.* Общая теория эволюции планет и современная термохимическая модель эволюции Земли // Физика Земли. 2007. № 1. С. 26–44.
- Лобковский Л.И., Котелкин В.Д.* Геодинамика мантийных плюмов, их взаимодействие с астеносферой и литосферой и поверхностные проявления в рифто и траппообразовании. Общие вопросы тектоники. Тектоника России. М. 2000. С. 304–307.
- Трубицын В. П., Трубицын А.П.* Численная модель образования совокупности литосферных плит и их прохождения через границу 660км // Физика Земли. 2014. № 6. С. 138–146.
- Трубицын В.П.* Основы тектоники плавающих континентов // Физика Земли. 2000. № 9. С. 3–40.
- Трубицын В.П.* Природа границы между верхней и нижней мантией и ее влияние на конвекцию // Физика Земли. 2010. № 6. С. 3–18. doi: 10.1134/S1069351310060017
- Трубицын В.П.* Реология мантии и тектоника океанических литосферных плит // Физика Земли. 2012. № 6. С. 3–22.
- Трубицын В.П. Рыков В.В.* Численные модели эволюции мантийной конвекции. Глобальные изменения природной среды-2002 / Ред. Добрецов Н.Л. Новосибирск: Наука. 2002. Т. 3. Гл. 2. С. 42–56.
- Трубицын В.П.* Сейсмическая томография и дрейф континентов // Физика Земли. 2008. № 11. С. 3–19.
- Трубицын В.П.* Тектоника плавающих континентов // Вестник РАН. 2005. № 1. С. 10–21.

- Трубицын В.П. Термохимическая конвекция в мантии с рециркуляцией океанической коры // *Физика Земли*. 2010а. № 11. С. 14–22. doi: 10.1134/S1069351310110029
- Трубицын В.П., Евсеев А.Н., Баранов А.А., Трубицын А.П. Влияние эндотермического фазового перехода на массообмен между верхней и нижней мантией // *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 3–16.
- Albarede F., van der Hilst R.D. Zoned mantle convection // *Philos. Trans. R. Soc. London*. 2002. V. A360. P. 2569–2592.
- Ballmer M.D., Ito G., van Hunen J., Ito G., Bianco T.A., Tackley P.J. Intraplate volcanism with complex age-distance patterns: A case for small-scale sublithospheric convection // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009. V. 10. № 6. P. 1–22. doi:10.1029/2009GC002386
- Bercovici D. Mantle Dynamics Past, Present, and Future: An Introduction and Overview. In *Treatise on Geophysics* / Eds. Bercovici D., Schubert G. Elsevier. 2007. V. 7. P. 1–30.
- Bercovici D. The generation of plate tectonics from mantle convection // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 205. P. 107–121.
- Christensen U., Yuen D.A. The interaction of a subducting lithospheric slab with a chemical or phase boundary // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 4389–4402.
- Christensen U., Yuen D.A. Layered convection induced by phase transitions // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 10291–10300. doi:10.1029/JB090iB12p10291
- Dannberg J., Sobolev S.V. Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept // *Nature Communications*. 2015. doi: 10.1038/ncomms7960
- Fei Y., Van Orman J., Li J., van Westrenen W., Sanloup C., Minarik W., Hirose K., Komabayashi T., Walter M., Funakoshi K. Experimentally determined postspinel transformation boundary in Mg_2SiO_4 using MgO as an internal pressure standard and its geophysical implications // *J. Geophys. Res.* 2004. B02305. doi:10.1029/2003JB002562
- Fukao Y., Nakakuki T., Kameyama M., Yanagisawa T. et al. Numerical Simulation of the Mantle Convection. Annual Report of the Earth Simulator Center. Institute for Research on Earth Evolution. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. 2003.
- Gurnis M. Large-scale mantle convection and aggregation and dispersal of supercontinents // *Nature*. 1988. V. 332 (6166). P. 696–699. <https://doi.org/10.1038/332695a0>
- Hager B.H., O'Connell R.J. A simple global model of plate dynamics and mantle convection // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 4843–4867.
- Hirose K. Phase transitions in pyrolitic mantle around 670-km depth: Implications for upwelling of plumes from the lower mantle // *Journal Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 2078–2089 doi: 10.1029/2001JB000597
- Ishii T., Kojitani H., Akaogi M. Phase relations and mineral chemistry in pyrolytic mantle at 1600–2200 °C under pressures up to the uppermost lower mantle: Phase transitions around the 660-km discontinuity and dynamics of upwelling hot plumes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.10.005>
- Ito G., Keken P.E. Hot Spots and Melting Anomalies. *Treatise on Geophysics* / Eds. Bercovici D., Schubert G. Elsevier. 2007. V. 7. P. 1–30.
- Karason H., van der Hilst R.D. Constraints on mantle convection from seismic tomography, in *The History and Dynamics of Global Plate Motion* / Eds. Richards M.R., Gordon R., van der Hilst R.D. Washington: American Geophysical Union. 2000. V. 121. P. 277–288.
- Kojitani H., Inoue T., Akaogi M. Precise measurements of enthalpy of postspinel transition in Mg_2SiO_4 and application to the phase boundary calculation // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2016. V. 121. P. 729–742. doi:10.1002/2015JB012211
- Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Burdick S. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008. V. 9. Q05018. doi:10.1029/2007GC001806
- Lobkovsky L.I., Kotelkin V.D. Numerical analysis of geodynamic evolution of the Earth based on a thermochemical model of the mantle convection // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2004. V.6 (1). P. 49–58.
- Machetel P., Weber P. Intermittent layered convection in a model mantle with an endothermic phase change at 670 km // *Nature*. 1991. V. 350. P. 55–57.
- Ohtani E., Litasov K.D. The Effect of Water on Mantle Phase Transitions // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2006. V. 62. P. 397–420.
- Ricard Y. Physics of Mantle Convection. In *Treatise on Geophysics* / Eds Bercovici D., Schubert G. Elsevier. 2007. V. 7. P. 437–505.
- Ritsema J., Deuss A., van Heijst H.J., Woodhouse J.H. S40RTS: A degree-40 shear-velocity model for the mantle from new Rayleigh wave dispersion, teleseismic traveltime and normal-mode splitting function measurements // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 184(3). P. 1223–1236.
- Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle convection in the Earth and Planets. Cambridge: University Press. 2004. P. 940.
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Nikogosian I.K. Recycled oceanic crust observed in 'ghost plagioclase' within the source of Mauna Loa lavas // *Nature*. 2000. V. 404. P. 986–989.
- Tackley P. Self-consistent generation of tectonic plates in time-dependent, three-dimensional mantle convection simulations. Part 2: strain weakening and asthenosphere. G3. 2000. doi:10.1029/2000GC00043
- Tackley P.J. Mantle Geochemical Geodynamics. In *Treatise on Geophysics* / Eds Bercovici D., Schubert G. 2007. Elsevier. V. 7. P. 1–30.
- Tackley P.J. Self-consistent generation of tectonic plates in time_dependent, three_dimensional mantle convection simulations. 2. Strain weakening and asthenosphere // *Geochem. Geophys. Geosystem*. 2000. V. 1. 1026. doi:10.1029/2000GC000043
- Tackley P.J., Stevenson D.J., Glatzmaier G.A., Schubert G. Effects of multiple phase transitions in a three-dimensional

spherical model of convection in Earth's mantle // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 15877–15901.

Tauzin B., Ricard Y. Seismically deduced thermodynamics phase diagrams for the mantle transition zone // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 401. P. 337–346.

Tolstikhin I., Hofmann A.W. Early crust on top of the Earth's core // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2005. V. 148. P. 109–130.

Trønnes R.G. Structure, mineralogy and dynamics of the lowermost mantle // *Miner. Petrol.* 2010. V. 99. P. 243–261. doi: 10.1007/s00710-009-0068-z

Trubitsyn V. P., Evseev M.N. Pulsation of mantle plumes // *Russian Journal of Earth Science*. 2016. V. 16. ES3005. doi:10.2205/2016ES000569

Yoshida M. Dynamic role of the rheological contrast between cratonic and oceanic lithospheres in the longevity of cratonic lithosphere: a three dimensional numerical study // *Tectonophysics*. 2012. V. 532/535. P. 156–166.

Yoshida M. Preliminary three dimensional model of mantle convection with deformable, mobile continental lithosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 295. P. 205–218.

Yoshida M., Santosh M. Supercontinents, mantle dynamics and plate tectonics: a perspective based on conceptual vs. numerical models // *Earth Science Reviews*. 2011. V. 105. P. 1–24.

Zhong S. Constraints on thermochemical convection of the mantle from plume heat flux, plume excess temperature, and upper mantle temperature // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. B04409. doi:10.1029/2005JB003972

Problems of Global Geodynamics

V. P. Trubitsyn^{a,b,*}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^b*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

*E-mail: trub@ifz.ru

Received May 28, 2018

Global geodynamics is determined by thermal convection in the mantle which manifests itself on the surface by movements, relief, heat flow, and volcanism. Thermal convection in the Earth is complicated by the fact that the lithosphere is broken into rigid plates, the crust is broken into six separate floating continents and a number of islands, on the mantle bottom there are two giant piles of heavy material, at high convection intensity the ascending convective flows acquire a plume shape, and phase transformations take place in the mantle. The impacts of many factors on the mantle structure have been thoroughly studied and fairly well understood. It is pertinent to reconcile the new data on phase transformations at depths of 650 to 700 km with the seismic data on the positions of these boundaries. The ultimate problem of global geodynamics has not yet been solved; the three-dimensional structure of the whole-mantle flows, consistent with the observations in geophysics, geochemistry, geology, and numerical modeling, is not known even on a semischematic level.

Keywords: global geodynamics, thermal convection, mantle flows