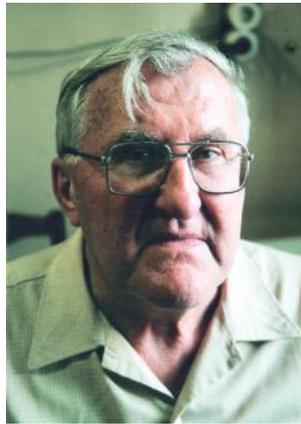




Уникальная тектоника Земли

В.П. ТРУБИЦЫН,
член-корреспондент РАН
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Институт теории прогноза землетрясений РАН

Только на Земле верхняя холодная жесткая литосфера течениями тепловой конвекции представляет собой систему жестких литосферных плит, которые участвуют в конвективном кругообороте вещества мантии. Плиты сцеплены между собой, а при их “срыве” возникают землетрясения. На Земле кора не сплошная, она состоит из нескольких континентов, плавающих на поверхности среди литосферных плит, которые то “примерзают” к континентам, то отрываются



от них. Континенты время от времени объединяются в суперконтиненты, а затем расходятся.

При высокой интенсивности тепловой конвек-

ции на всех тектонически активных планетах горячие восходящие потоки тепловой конвекции приобретают форму узких струй – плюмов. Однако, только на Земле плюмы, прорываясь на поверхность движущихся плит, образуют на них цепочки застывающих вулканов. В настоящее время глобальная тектоника литосферных плит, плавающих континентов и мантийных плюмов может быть воспроизведена в процессе численного моделирования.

СИЛИКАТНЫЕ ПЛАНЕТЫ

Солнечная система образовалась в результате гравитационной неустойчивости газопылевого облака. Большая часть ве-

щества первичного состава сконцентрировалась в Солнце; из остатка облака возникли планеты. До их образования в гравитационном поле Солнца происходила дифферен-

циация вещества облака по химическому составу. В Солнечной системе возникли две группы планет: близкие к Солнцу планеты земной группы, состоящие из силикатных ман-

тий и железных ядер, и дальние планеты-гиганты, состоящие в основном из легких элементов (водород, гелий, вода, метан, аммиак). Вначале, после образования планет, их недра были очень горячими, а затем в процессе эволюции остывали; при этом быстрее остывали менее массивные планеты. Температуры поверхности планет земной группы варьируют, примерно от -50°C до $+500^{\circ}\text{C}$; поскольку они ниже температуры плавления силикатных пород, то все планеты земной группы имеют твердые оболочки-литосферы.

Температуры поверхности планет-гигантов варьируют в пределах от -100 до -200°C . До середины 1950-х гг. предполагалось, что недра планет-гигантов успели остыть, и при очень высоком давлении вещество недр этих планет могло стать твердым; поэтому долгое время планеты-гиганты считались ледяными, имеющими толстую газовую атмосферу. Однако измерения показали, что из недр Юпитера поступает небольшой поток тепла. На основании этих данных в ИФЗ РАН в 1966 г. автором статьи определена температура в центре Юпитера: 20 000 К. При таких температурах (даже при очень высоких давлениях) водород и гелий хотя по своим свойствам и становятся более по-

хожими на жидкость, но не затвердевают. Доктор физико-математических наук В.Н. Жарков и автор статьи рассчитали форму и гравитационное поле гидростатически равновесного вращающегося Юпитера. Измерения, выполненные при пролетах АМС “Пионер-10” 4 декабря 1973 г. и “Пионер-11” 3 декабря 1974 г., подтвердили соответствие газожидкому состоянию Юпитера. Эта концепция о газожидком состоянии всех планет-гигантов стала общепринятой.

Кроме “силикатных” планет земной группы и Луны в Солнечной системе есть еще два больших спутника Юпитера – Ио, состоящий из силикатов, и Европа, у которого поверх силикатной мантии плещется аномально глубокий водный океан, покрытый 100-километровым слоем льда.

Несмотря на вековое остывание (благодаря выделению тепла радиоактивных изотопов недр) силикатные планеты и спутники до сих пор горячие и размягченные; в их мантиях продолжается тепловая конвекция, она и является движущей силой всех тектонических проявлений на этих планетах.

Для характеристики тектонической активности силикатных планет и спутников Р. Штерн (США), Т. Геря и П. Такли (Швейцария) в 2018 г. ввели понятие условного индекса

активности и показали, что он равен трем – для Земли и Венеры, двум – для Марса, Ио и Европы, одному – для Меркурия и нулю – для Луны. Благодаря малым размерам в Меркурии тепловая конвекция затухает, а Луна почти затвердела.

Холодная твердая оболочка силикатных тектонически активных планет – литосфера – состоит из двух частей: легкой коры, выплавленной из силикатной мантии, и верхнего холодного слоя мантии. Вследствие этого толщина и прочность литосферы двояко зависят от температуры недр. В недрах менее горячей планеты возникает более толстый мантийный слой литосферы; в слишком горячей – наиболее толстая кора. В результате на всех планетах земной группы (кроме Земли) литосфера покрывает всю поверхность в виде цельной плиты и представляет собой тепловую и механическую “крышку”. Например, в недрах Марса горячее вещество прорывается через литосферу только в виде отдельных мощных струй, порождающих большие вулканы. На Венере – тепло долгое время накапливается под литосферой; затем горячее вещество взрывается и перемешивается (это происходит лишь эпизодически). Поскольку вещество, находящееся на поверхности Венеры,

имеет возраст около 0,5 млрд лет, то предполагается, что таков же интервал между “перестройками” ее литосферы.

ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИКИ ЗЕМЛИ

Мантия Земли нагревается снизу потоком тепла, идущего из ядра, и изнутри – при распаде радиоактивных элементов. Поэтому в мантии при перепаде температур около 4000°С происходит интенсивная тепловая конвекция.

Только на Земле (в частности, благодаря размягчению водой) литосфера под океанами (состоит из коры толщиной 6 км и холодного слоя мантии толщиной в среднем 60 км) оказалась относительно не такой толстой и непрочной; благодаря этому течения тепловой конвекции постоянно “раскалывают” литосферу на части – литосферные плиты. Они, подобно ледоходу на реке, мантийными течениями перемещаются по поверхности.

Главное отличие литосферных плит от льдин состоит в том, что лед легче воды и не тонет; а вещество плит имеет состав, близкий к мантийному, но оно более холодное и, следовательно, более тяжелое. По этой причине плиты, подобно листам фанеры на воде, с одного края погружаются в ман-

тию, в результате дно океанов перемещается подобно конвейерным лентам, движущимся со скоростями порядка 1–10 см в год и обновляющимся в среднем через 60 млн лет. Земля составлена из семи крупных плит, нескольких средних и множества мелких. На шести крупных плитах находятся континенты, и только одна, большая, не имеет континента – Тихоокеанская плита. Границы между плитами могут быть трех видов: дивергентные, трансформные и конвергентные; в них плиты, соответственно, рождаются, смещаются друг относительно друга и погружаются в мантию.

Рождаются плиты в срединно-океанических хребтах. Система этих хребтов представляет собой гигантскую трещину в литосфере, опоясывающую всю Землю. С севера она идет через Атлантический океан, далее огибает с юга Африку, проходит с запада на восток через Индийский океан, огибает с юга Австралию, идет с юга – на север через Тихий океан, уходит под Северную Америку, поворачивает под Евразию. В будущем она может “замкнуться” через Северный Ледовитый океан. В эту трещину снизу из мантии постоянно поступает горячее вещество, оно расталкивает плиты и “примерзает” к ним. Со стороны молодого Атлантического океана дно “при-

морожено” к континентам Северной и Южной Америки, Евразии и Африки (такие окраины континентов называют пассивными). Поскольку плиты расходятся в разные стороны (каждая со скоростью около 1,5 см в год), то в результате Атлантический океан расширяется со скоростью около 3 см в год. Горячее вещество, выходящее из мантии в хребте Тихого океана, также “расходится” в стороны и “примерзает” к плитам. Самая большая на Земле Тихоокеанская плита движется на северо-запад со скоростью около 10 см в год, охлаждается, становится тяжелой и погружается в мантию в зонах субдукции под Курильские острова, Камчатку и Японию. Вещество хребта, движущееся на восток, также наращивает плиты Наска и Кокос, которые погружаются в зонах субдукции, соответственно, под континенты; Южная Америка и Северная Америка. Такие окраины континентов называют активными.

Благодаря силе трения, движущиеся с разными скоростями плиты, постоянно деформируясь, долгое время остаются сцепленными. Когда же напряжения достигают критического значения, то возникают локальные разрывы между плитами, вызывающие землетрясения. При этом раздробленность ли-



Карта современной поверхности Земли. Толстой красной линией показана система срединно-океанических хребтов, в которых горячее вещество выходит из мантии и, застывая, “наращивает” плиты. Красными кружками отмечены горячие точки Земли – места выхода на поверхность мантийных плюмов – горячих конвективных струй, поднимающихся со дна мантии (Schubert et al., 2014).

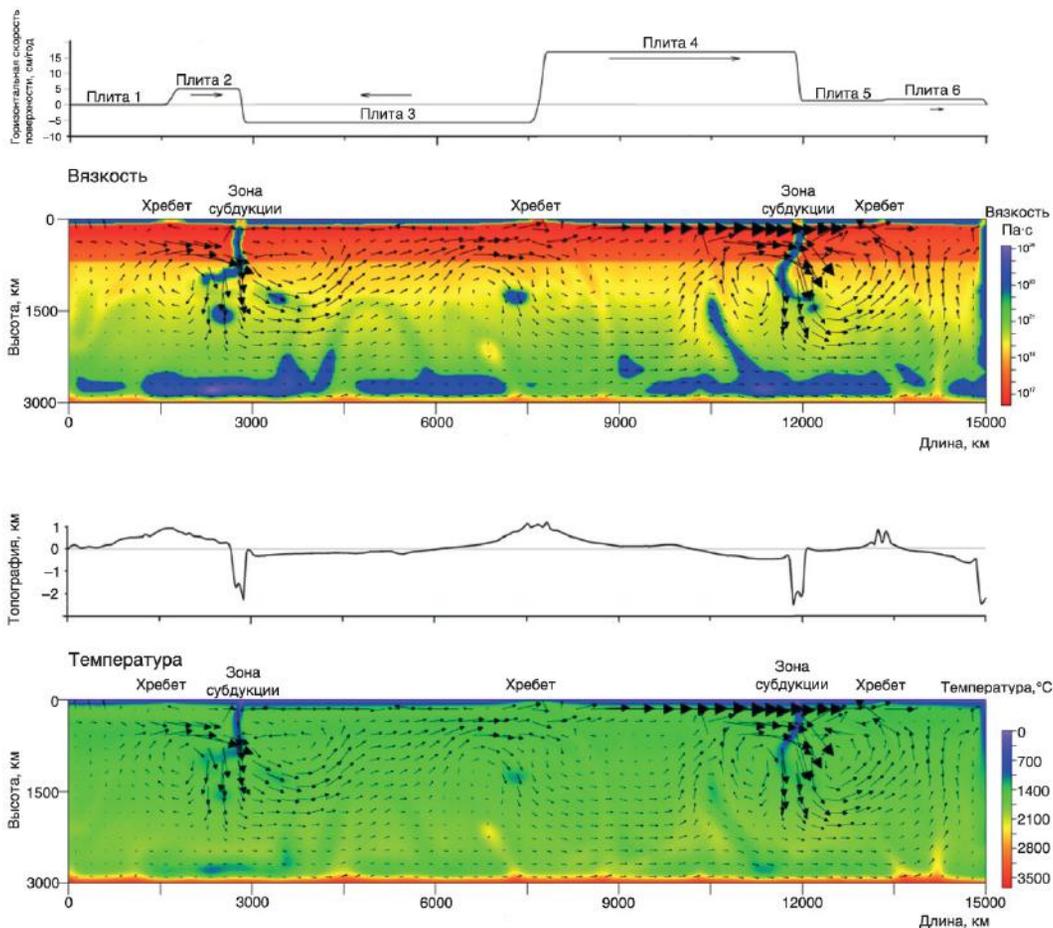
тосферы на плиты не дает возможности накапливаться катастрофическим напряжениям, которые могут спровоцировать катаклизм.

Океаны на Земле занимают только 70% земной поверхности, остальная часть занята континентами, состоящими из коры средней толщиной 50 км и нижележащей холодной части мантии, с “корнями” толщиной до 200 км. Второй особенностью тектоники Земли является то, что континентальная кора, выплавившаяся из мантии, покрывает поверхность Земли не сплошь (как на других планетах), а только

местами – образуя шесть континентов и несколько крупных островов.

В 1912 г. немецкий геофизик и метеоролог, создатель теории дрейфа материков Альфред Вегенер, еще на примере Пангеи (суперконтинента, существовавшего в конце палеозоя и начале мезозоя, объединявшего практически всю сушу Земли 335–175 млн лет назад) показал, что континенты дрейфуют, объединяются в суперконтиненты и затем опять расходятся. Эти процессы были поняты только после открытия конвекции в мантии Земли и тек-

тоники литосферных плит. “Легкие” континенты плавают на вязкой мантии, среди океанических плит, которые временно “примерзают” к континентам, но потом, охлаждаясь и утяжеляясь, погружаются в мантию. В мантии вещество плит нагревается, размягчается, размешивается и выходит на поверхность в срединно-океанических хребтах. За время дрейфа континента в течение нескольких миллиардов лет океанические плиты “примерзают” к нему и отрываются от него много раз. В настоящее время основные физические



Модель конвекции в мантии с вязко-пластической реологией (расчет автора). Распределения вязкости (а) и температуры (б), возникающие при конвекции; показаны цветом, шкалы приведены справа. Скорость течений показана стрелками, с максимальным значением 15 см в год. Вверху приведено распределение горизонтальных скоростей движения возникших плит. Верхняя, холодная высоковязкая литосфера, мантийными течениями была разбита на шесть плит: с тремя хребтами и двумя зонами субдукции.

процессы глобальной тектоники Земли поняты, в частности, благодаря математическому моделированию.

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ, ВОСПРОИЗВОЖДАЮЩИЕ ТЕКТОНИКУ ЗЕМЛИ

Литосферные плиты. Представления тектоники литос-

ферных плит были сформулированы зарубежными учеными в 1950-х гг. на основании данных, полученных в результате наблюдений дна Мирового океана. Количественная теория участвующих в конвекции литосферных плит основана на решении уравнений тепловой кон-

векции в жидкости, вязкость которой в значительной степени зависит от температуры и возникающих в жидкости напряжений, продолжает уточняться по настоящее время.

Для того, чтобы проиллюстрировать процесс “разбивания” океанической ли-

тосферы на отдельные плиты, в 2012 г. автором в ИФЗ РАН были проведены численные эксперименты. Рассмотрен нагреваемый слой жидкости с вязкостью, зависящей от температуры и давления, соответствующей силикатному веществу мантии. В слое возникает тепловая конвекция. При этом вязкость верхнего, более холодного слоя оказывается очень высокой, порядка 10^{26} Пас, что соответствует вязкости литосферы. Далее было учтено свойство эффективной пластичности вещества Земли (с учетом микротрещин и содержания воды), при которой вязкость вещества 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 вещества значительно падает. Наибольшие напряжения при конвекции возникают над нисходящими конвективными течениями в утолщенной части литосферы.

В процессе моделирования было показано, что в слое нагретой жидкости с вязко-пластической реологией вещества, соответствующей веществу мантии Земли, возникает конвекция. При этом верхний высоковязкий слой – литосфера – разбивается на несколько жестких

плит, каждая из которых движется со своей скоростью, утолщается по мере удаления от хребта и погружается в мантию в зонах субдукции. Рассчитанный рельеф дна океана показывает глубоководные впадины и области подъема дна в хребтах.

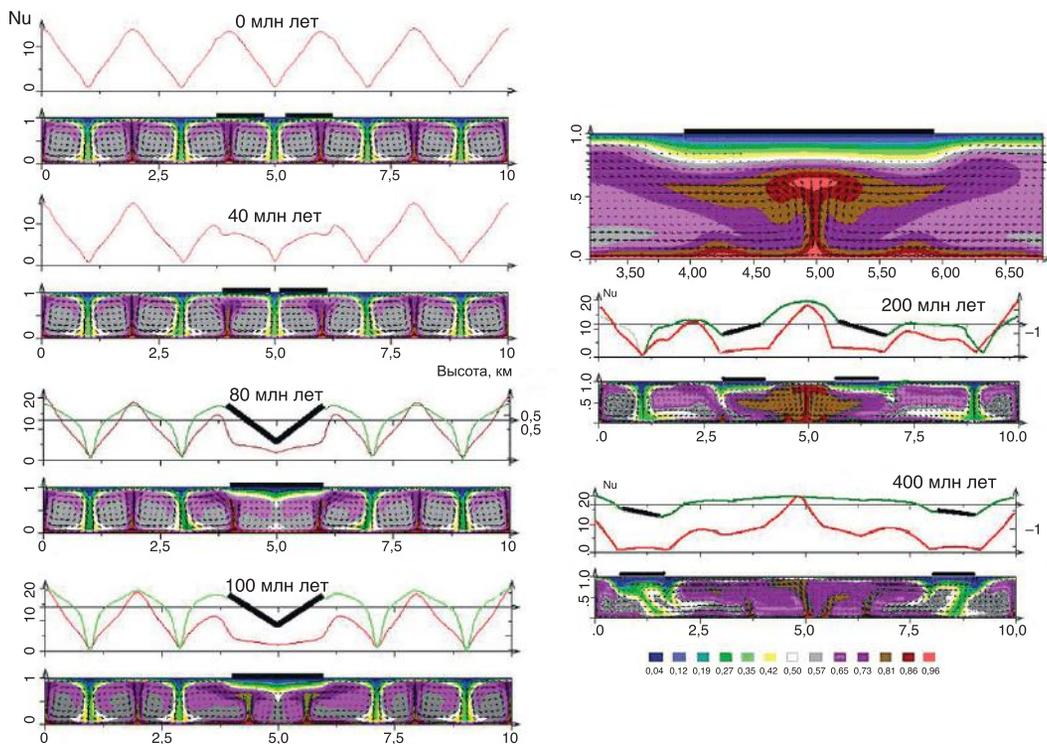
Рассчитанные в этой модели поля температур и вязкости в мантии, а также скорости конвективных течений, скорости плит и рельеф дна океана очень хорошо соответствуют наблюдаемым проявлениям тектоники литосферных плит на Земле (*Schubert et al.*, 2014).

Эволюция плавающих континентов. Основы тектоники плавающих континентов были разработаны в ИФЗ РАН в 2000-х годах. Для описания взаимодействия конвективных течений и континентов и выявления закономерностей их дрейфа решалась взаимосвязанная система уравнений конвекции в жидкости и уравнений движения твердых тел Эйлера.

Понять физические процессы, проявляющиеся при взаимодействии конвективных течений с плавающими континентами, можно с помощью численного эксперимента, выполненного автором в 2005 г. Был рассмотрен слой вязкой нагреваемой жидкости, на который помещены две легкие твердые пластины. В жидкости воз-

никает 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 перестройку во всей структуре мантийных течений. Результаты этого численного эксперимента, выполненного на простейшей модели, подтверждают и иллюстрируют открытые А. Вегенером (и затем развитые Т. Вильсоном) закономерности дрейфа континентов и выявляют ряд их новых закономерностей.

Для моделирования будущего дрейфа континентов автором в 2008 г. была рассмотрена сферическая модель конвекции, максимально приближенная по параметрам к современной мантии Земли. Сейсмическая томография позволяет получить пространственное распределение скоростей сейсмических волн в мантии. Известно, как эти скорости зависят от температуры. В результате пересчета было найдено пространственное распределение температуры в недрах современной Земли. Такое распределение температуры было определено начальным состоянием. Таким образом, рассчитывалась не абстрактная модель конвекции, а



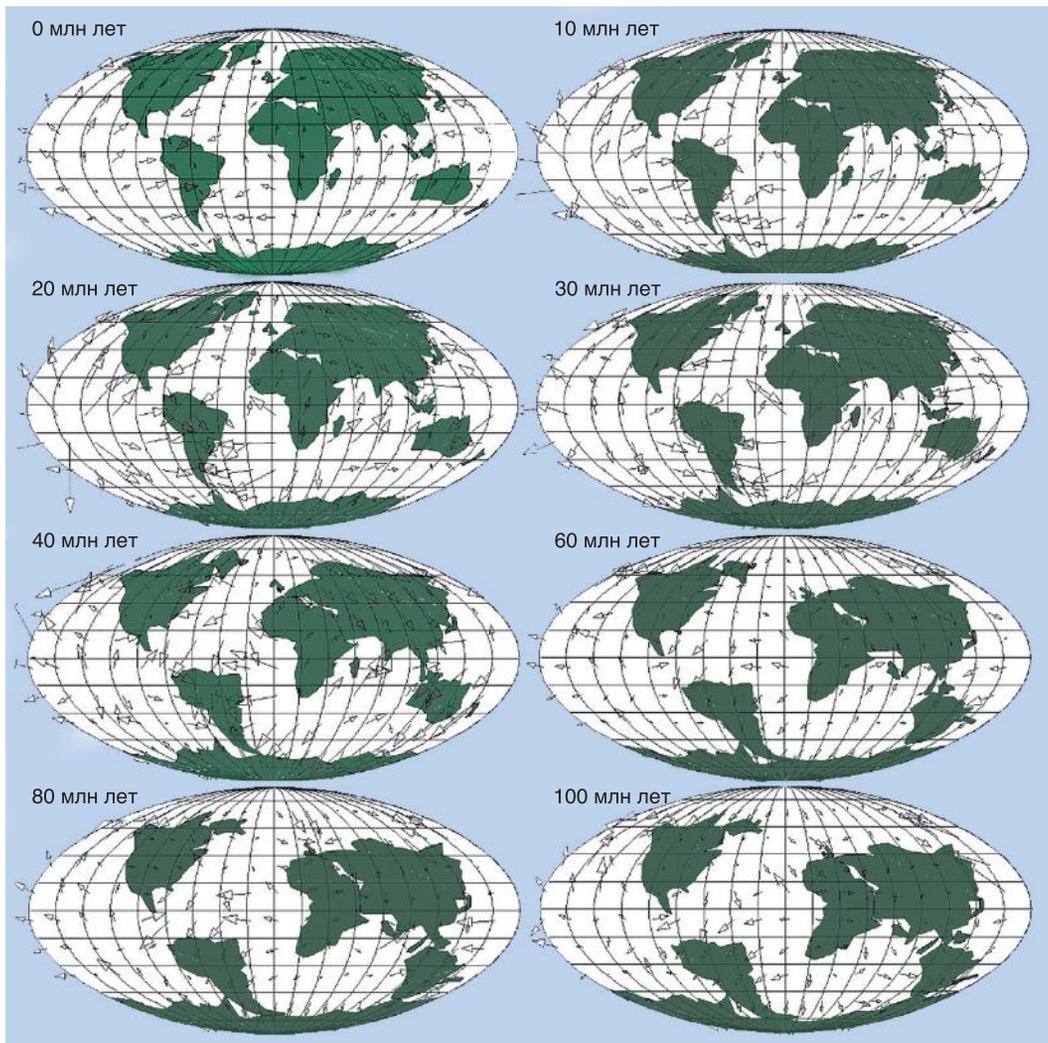
Модель эволюции конвекции с двумя плавающими континентами (расчет автора). Показано положение континентов и температура в мантии в последовательные моменты времени, в млн лет. Красной линией очерчен рассчитанный относительный тепловой поток Nu , зеленой линией – рельеф h , в км. Пластины (континенты) сначала объединяются над нисходящим конвективным потоком. Благодаря теплоэкранированию мантия под возникшим суперконтинентом прогревается, суперконтинент поднимается и разрывается. Весь цикл занимает примерно 0,5 млрд лет.

соответствующая современному состоянию Земли. Затем на жидкость наложено шесть теплопроводных жестких плавающих пластин, соответствующих по форме современным континентам, и восемь меньших пластин, соответствующих по тому же параметру большим островам. Далее решалась система уравнений тепловой конвекции совместно с системой урав-

нений Эйлера для перемещения и вращения континентов под действием сил вязкого сцепления с мантийными течениями, с учетом обратного теплового и механического влияния континентов на конвекцию.

Расчеты показали, как холодные области мантии стали опускаться, а горячие – подниматься и как в мантии возникла тепловая конвекция.

Благодаря механическому сцеплению конвективные течения привели в движение все континенты и острова. Однако благодаря тепловому взаимодействию континенты непрерывно 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



Расположение континентов в будущем (расчет автора), время исчисляется в млн лет; максимальная длина стрелки соответствует скорости 12 см в год. Контуром показаны рассчитанные положения континентов и островов, а стрелками – скорость мантийных течений в последовательные промежутки времени в будущем, на 100 млн лет вперед. Согласно модели, Южная Америка будет двигаться к Антарктиде, а Евразия, Австралия и Африка объединятся в суперконтинент.

параметров вещества, соответствующего современному состоянию Земли), то она позволила рассчитать будущий дрейф континентов.

Численные модели, рассчитанные в ИФЗ РАН, показывают эволюцию ман-

тийной конвекции со всеми шестью плавающими континентами и крупными островами, форма которых соответствует данным наблюдений для современной Земли. В последнее время подобные

модели конвекции стали рассчитываться также за рубежом. Однако в этих моделях пока учитываются только четыре континента, при этом они упрощенно представляются в виде квадратов.

Мантийные плюмы. Представления о мантийных плюмах были введены в 1971 г. Дж. Морганом для объяснения происхождения цепочек вулканических островов типа Гавайской. Предположили, что в мантии Земли существуют горячие узкие вертикальные долговременные струиплюмы, которые “прожигают” движущиеся плиты непосредственно над плюмом. В мировой научной литературе о природе плюмов долгое время шли дискуссии: высказывались предположения о том, что плюмы зарождаются только благодаря химическим примесям легкого вещества и поднимаются в мантии, не завися от конвективных течений. Однако в последнее время было установлено определенно, что плюмы представляют собой обычные восходящие конвективные потоки, которые возникают при высокой интенсивности тепловой конвекции и при подъеме приобретают грибовидную форму с “головкой” и “ножкой”. Также выяснилось, что содержащиеся в плюмах химические примеси не ускоряют, а, наоборот, тормозят плюмы. Погружающиеся плиты и поднимающиеся мантийные плюмы приводят в циркуляционное движение все вещество мантии, при этом плиты и плюмы сложным образом взаимодействуют между собой.

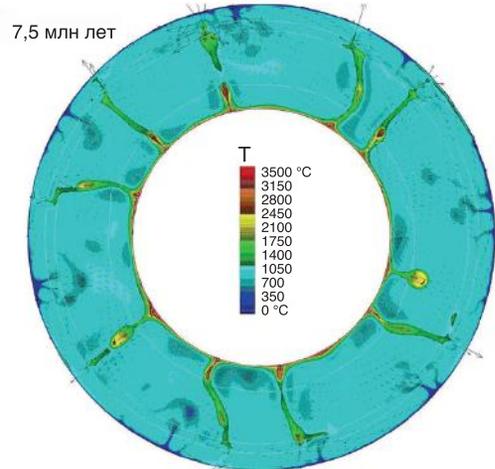
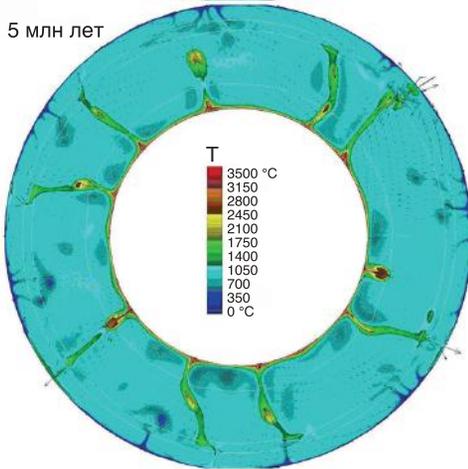
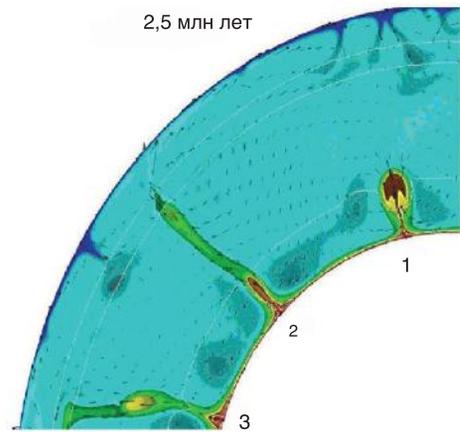
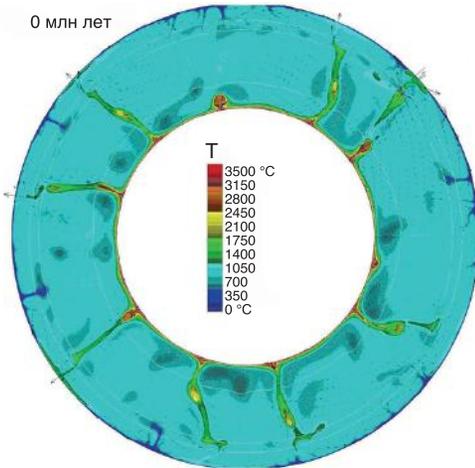
Наибольшее извержение вулкана возникает при прорыве через литосферу на поверхность Земли “головки” плюма. После застывания магмы образуется большая магматическая провинция. На суше ее называют траппом, на дне океана – базальтовым плато. Наибольшие на Земле – сибирские траппы – образовались 250 млн лет назад в результате постоянного извержения вулкана в течение нескольких лет. Существует гипотеза о том, что именно эта катастрофа привела к вымиранию первичных пресмыкающихся, освободив место для распространения динозавров на Земле. При этом, в отсутствие межвидовой борьбы, преимущество получили гигантские особи.

Другое грандиозное извержение вулкана, вызванное выходом на поверхность “головки” мантийного плюма, было 67 млн лет назад в Индии, в результате образовались Деканские траппы (крупная магматическая провинция, расположенная на плоскогорье Декан в западной и центральной частях Индии, это одно из крупнейших вулканических образований на Земле). Возможно, что это извержение погубило большую часть динозавров. Несколько позднее, после начала этого извержения, на Землю упал мексиканский астероид, который мог

“добить” динозавров. Однако все эти события, возможно, лишь “сдвинули” процесс во времени, поскольку биологическая эволюция всегда сопровождается вымиранием и рождением новых видов.

После прохождения “головки” плюма за ним остается и постоянно действует в течение до 200 млн лет “ножка” плюма. Она создает цепочку вулканов на движущей литосферной плите. Современное место выхода горячего вещества плюма на поверхность литосферной плиты называют горячей точкой. На приведенной в начале статьи карте рельефа Земли “горячие точки” были показаны красными кружками; в частности, на ней можно видеть Гавайскую “горячую точку” и вулканическую цепочку ранее образованных островов. По направлению движения этой цепочки, учитывая возраст островов, можно рассчитать скорость движения плит. В частности, на географических картах рельефа видно, что Тихоокеанская плита ранее двигалась на север, а 65 млн лет изменила свое направление на северо-восточное.

В 2016 г. в ИФЗ РАН были построены численные сферические модели интенсивной тепловой конвекции в вязкой жидкости с параметрами, соответствующими веществу современной мантии.



Модель эволюции интенсивной тепловой конвекции в мантии (расчет автора с сотрудниками). Показана температура в мантии и поднимающиеся плюмы в последовательные моменты времени с интервалом в 2,5 млн лет. При высокой интенсивности восходящие потоки становятся нестационарными; они отмирают и вновь зарождаются. Справа вверху в большем масштабе показано, что плюм (1) при подъеме имеет головку и ножку; у плюмов (2) и (3) “головки” уже достигли поверхности и остались только пульсирующие “ножки”, внутри которых горячее вещество поднимется вверх порциями.

Эти модели показывают не только, как зарождаются плюмы, но и как они “поднимаются” и почему заканчивают эволюцию. Новым стало обнаружение явления пульсации плюмов, при котором го-

рячее вещество в “ножке” плюма может подниматься не непрерывно, а порциями. При этом оказалось, что рассчитанное время подъема “головки” плюма (15 млн лет) и время между последующими

подъемами порций горячего вещества в “ножке” плюма в течение 10 млн лет согласуются с периодами между извержениями вулканов в горячих точках Земли (Schubert et al., 2014).

Ранее Земля была более горячей. Она остывает со скоростью примерно на 50 К за млрд лет. Поскольку вязкость вещества мантии значительно зависит от температуры, то интенсивность тепловой конвекции ранее была еще выше. Рассчитанные в ИФЗ РАН модели мантийной конвекции показывают, что в более ранней Земле “ножки” плюмов разрывались и вместо плюма поднимался конвейер “головок” плюмов, называемых “термиками”. Плюмовый режим тепловой конвекции фактически является переходным от стационарной конвекции к турбулентной. Представленная численная модель может служить доказательством того, что мантийные плюмы всегда возникают при интенсивной тепловой конвекции.

К настоящему времени теория глобальной тектоники Земли в основном выстроена; при ее создании использовались данные наблюдений геофизи-

ки, геохимии и геологии, а также данные лабораторных измерений вещества. Поэтому, в частности, стало понятно, почему в мантии при температуре ниже солидуса возможна конвекция; почему холодные каменные плиты толщиной 50 км могут изгибаться при погружении в мантию и при этом не ломаться. Оказалось, что это обусловлено большой длительностью процессов, при которых диффузия успевает эффективно “придавать” твердым телам вязкие свойства.

На пути создания теории тектоники Земли были периоды выдвижения гипотез, некоторые из которых оказались ошибочными. Так, долгое время полагали, что конвекция в мантии может быть двухслойной или перемежающейся (попеременно расслоенная и общемантийная), а плюмы могут подниматься независимо от тепловой конвекции благодаря присутствию в них легких химических примесей. Эти гипотезы вы-

двигались при построении структуры мантийных течений для объяснения причины различия в химическом составе 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 главной движущей силой проявлений тектоники Земли является общемантийная тепловая конвекция. Погружающиеся холодные высоковязкие плиты, а также поднимающиеся горячие узкие плюмы приводят в циркуляционное движение все вещество мантии, взаимодействуя между собой.

Более подробно модели, воспроизводящие различные этапы эволюции Земли, и тектонические процессы изложены в приведенных в ссылке статьях¹. Процессы зарождения, подъема и отмирания плюмов можно детально посмотреть также в виде фильма на сайте: <http://rjes.wdcb.ru/v16/2016ES000569/plumes-hr.html>.

¹ Трубицын В.П. Основы тектоники плавающих континентов // Физика Земли, 2000. № 9. С. 3–40.

Трубицын В.П. Тектоника плавающих континентов // Вестник РАН, 2005. № 1. С. 10–21.

Трубицын В.П. Сейсмическая томография и дрейф континентов // Физика Земли, 2008. № 11. С. 3–19.

Трубицын В.П. Реология мантии и тектоника океанических литосферных плит // Физика Земли, 2012. № 6. С. 3–22.

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

Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle convection in the Earth and Planets. Cambridge: University Press, 2004.