

# ГЛУБИННАЯ ГЕОДИНАМИКА — ОСНОВНОЙ МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

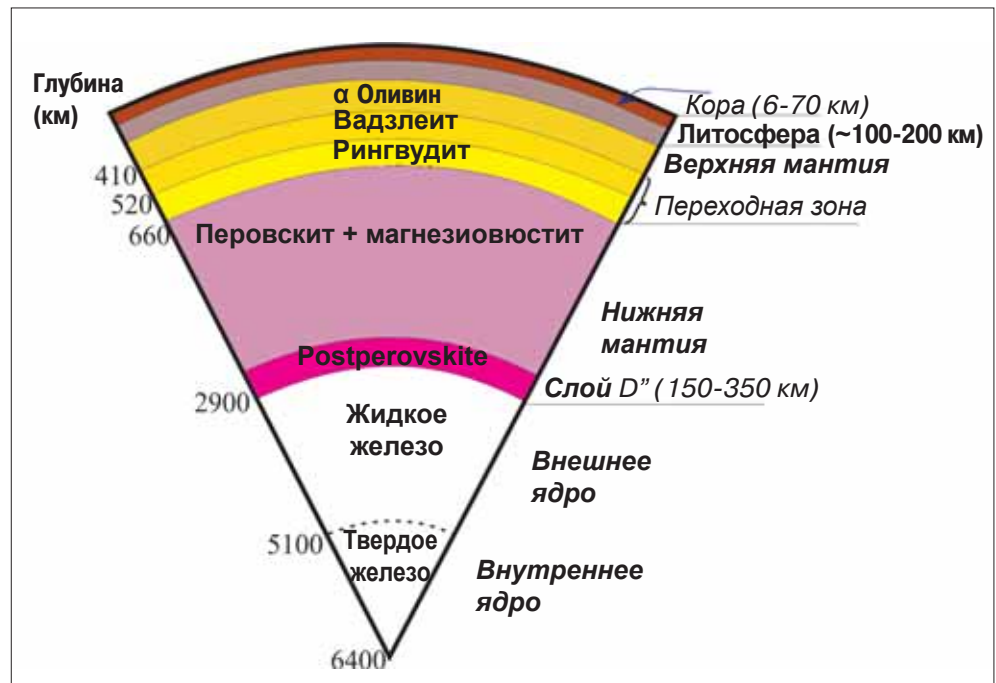
---

Академик Михаил КУЗЬМИН, Институт геохимии  
им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск),  
Академик Владимир ЯРМОЛЮК, Институт геологии  
рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН (Москва),  
профессор Вадим КРАВЧИНСКИЙ, Университет Альберты  
(г. Эдмонтон, Канада)

---

**Большие изменения в геологических знаниях произошли за последние полвека. Благодаря успехам сейсмической томографии в глубинах Земли обнаружены две огромные области более горячей материи, простирающиеся до самого ядра планеты. Интересно, что их проекции на поверхность практически совпали с так называемыми горячими полями мантии, которые были выделены советскими геологами еще тридцать лет назад по косвенным показателям. Данные открытия легли в основу концепции глубинной геодинамики, позволившей установить взаимодействие глубинных процессов в мантии с геологией, формирующей поверхность нашей планеты.**

**Внутреннее строение Земли.**  
Граница между верхней и нижней мантией — 660 км. В верхней мантии находится частично расплавленное вещество, поэтому она часто сопоставляется с астеносферой.



## ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

В 30-х годах XIX в. выдающийся британский геолог Чарльз Лайель в фундаментальном труде «Основы геологии» сформулировал положения об актуализме (т.е. современные наблюдения позволяют делать выводы о геологических процессах прошлого) и униформизме (при всех преобразованиях в природе законы, их определяющие, остаются постоянными). Несколько позднее американский геолог Джеймс Холл и его соотечественник Джеймс Дэна (иностраный член-корреспондент Петербургской АН с 1858 г.) выдвинули концепцию геосинклиналей (упрощенно говоря, подвижных поясов Земли), объяснявших возникновение складчатых горных массивов. А с именем русского геолога академика Александра Карпинского связано выделение стабильных участков на Земле — платформ (1887, 1894). Работы всех этих ученых стали основой парадигмы геологии конца XIX и первой половины XX в., сменившейся в 1960-х годах концепцией тектоники плит. О ней пойдет речь чуть ниже, а пока обратимся к схеме внутреннего строения Земли.

Наша планета состоит из ряда сфер (оболочек) неодинаковой толщины, имеющих различный минеральный и химический состав и четкие сейсмические границы. Самая верхняя — литосфера (ее мощность от 100 км в океанах до 200 км и более на континентах). Венчает ее земная кора толщиной от 6 до 70 км. Литосфера относительно хрупка и именно в ней происходят землетрясения, вызывающие сколы и разрывы, через которые горячее вещество мантии\* может достигать земной поверхности.

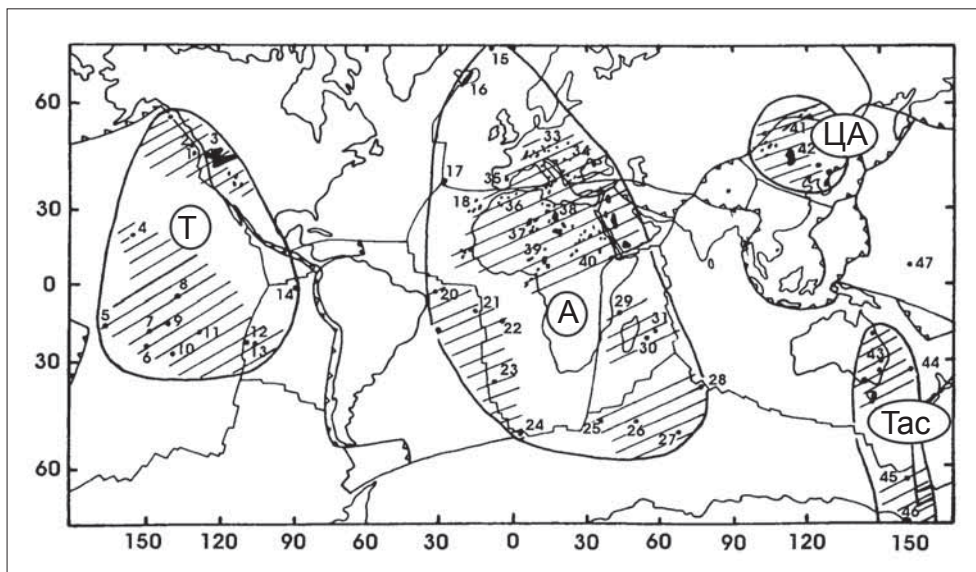
\*Мантия — часть Земли, расположенная непосредственно под корой и выше ядра, т.е. до глубины ~ 2900 км; в ней разделяют верхнюю мантию (до 660 км) и нижнюю (прим. ред.).

Ниже этого слоя следует астеносфера, отвечающая верхней мантии и характеризующаяся наличием частично расплавленного вещества, в связи с чем в ней возникают конвективные потоки. В срединно-океанических хребтах (СОХ) она подходит к поверхности Земли и отвечает за выплавление базальтов СОХ с низким содержанием литофильных элементов\*. Астеносфера «потеряла» большинство их ~1,8–2 млрд лет назад, что было связано с массовым образованием земной коры. А нижняя мантия в этих процессах не участвовала, поэтому ее состав в большей степени отвечает первичной мантии Земли. Следует отметить, что почти половина массы нашей планеты состоит из Mg-перовскита, устойчивого в широком интервале давлений. Это основной минерал нижней мантии.

Важное значение для понимания процессов глубинной геодинамики имеет слой D'', открытый в 1980-х годах. Он расположен в подошве мантии, имеет мощность 150–350 км и характеризуется высоким градиентом температуры: порядка 4000°C в основании и 3000°C на верхней границе. Именно через этот слой происходит взаимодействие мантии с ядром.

Большим успехом экспериментальной минералогии стало открытие в 2002–2004 гг. постперовскита. Химический состав его такой же, как и у перовскита, а плотность на 1,2% выше. Экспериментальные данные показали: существующие сегодня в недрах Земли температуры соответствуют образованию этого минерала на глубине 2600–2900 км, т.е. в слое D''. Оценки термической эволюции недр планеты приводят к выводу, что формирование постперовскита началось после существенного охлаждения Земли примерно

\*Литофильные элементы — группа химических элементов (всего их 53), слагающих основную массу минералов земной коры (прим. ред.).



По поверхностным проявлениям внутриплитового магматизма за последние 15 млн лет выявлены 47 «горячих точек». Они группируются в четыре обширные (до 10 тыс. км в поперечнике), но компактные зоны, названные «горячими полями мантии Земли»: Африканскую, Тихоокеанскую, Центрально-Азиатскую и Тасманскую (по Зоненшайну, Кузьмину, 1983).

2,3 млрд лет назад. С этого времени начинают быстрее (почти в 2 раза) расти континенты, т.е. уже работает тектоника плит, приуроченная к верхней мантии.

### КОНЦЕПЦИЯ ТЕКТОНИКИ ПЛИТ

В 1961 г. английский геофизик Роберт Дитц и американский геолог Гарри Хесс, анализируя батиметрическую карту дна океанов, пришли к выводу, что протяженные горные хребты, возвышающиеся над абиссальными (глубоководными) долинами на 1–2 км, приурочены к центральным частям океанов. Было показано, что в рифтовых структурах этих хребтов происходит образование новой коры. Процесс разрастания океанического ложа они назвали «sea flow spreading» (растекание морского дна).

В 1963 г. британские геофизики Фред Вайн и Друм Мэтьюз подтвердили спрединг (разрастание) наличием полосовых магнитных аномалий, образование которых определяется намагниченностью пород океанической коры в соответствии с полярностью планетного магнитного поля — она периодически меняется во времени с прямой (современная полярность) на обратную.

В 1965 г. канадский геофизик Джон Вилсон выделил особый тип разломов — трансформных, образующихся при горизонтальном перемещении океанической литосферы в стороны от срединно-океанического хребта. В 1968 г. американский геофизик Джейсон Морган и ряд других исследователей показали существенные различия глубинных геофизических структур указанных хребтов и зон островных дуг. Для последних характерен подвиг — опускание океанической литосферы в мантию до глубин около 600 км. Этот процесс был назван субдукцией.

После окончательного формулирования основных положений тектоники плит, объясняющей современную динамику Земли, эта теория быстро завоевала признание мировой науки. Ее положения достаточно просты для понимания.

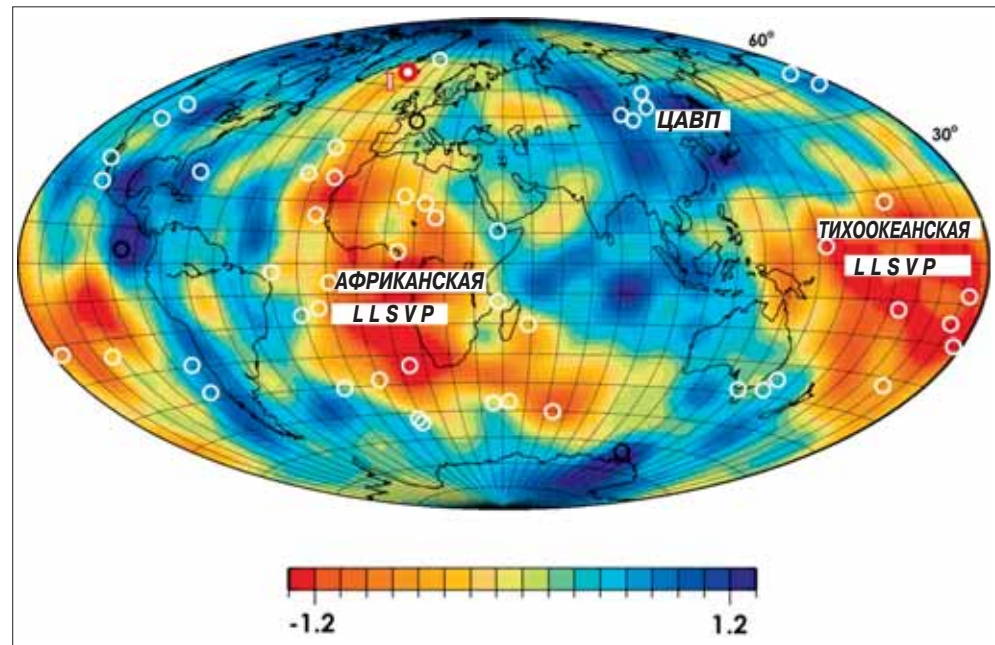
Две внешние оболочки планеты — литосфера и астеносфера — взаимодействуют. Вещество последней способно к течению, в связи с чем в ней может возникать конвекция, поддерживаемая энергией из внутренних оболочек Земли. Литосфера представляет собой внешнюю твердокаменную оболочку Земли, пассивно реагирующую на процессы, протекающие в астеносфере. Она расчленена узкими поясами — зонами, характеризующимися высокой тектонической (в частности, сейсмической) и магматической активностью: рифтовыми срединно-океаническими хребтами и зонами субдукции. Эти зоны, а также трансформные разломы «разбивают» литосферу на ряд жестких литосферных плит, которые под действием сил вязкого трения, вызванных конвективными (или иными) потоками в астеносфере, перемещаются относительно друг друга.

### ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ

Еще в 1963 г., когда только закладывались основы тектоники плит, Джон Вилсон обратил внимание на действующие вулканы внутри океанических плит, образующие вулканические цепи, ориентированные противоположно по отношению к вектору перемещения плиты. Было сделано предположение, что эти цепи связаны с горячими точками мантии, прожигающими литосферу по мере ее прохождения над ними.

К началу 1970-х годов гипотеза горячих точек мантии была принята многими исследователями. Предполагалось (а позднее и подтвердилось), что они представляют собой геохимические аномалии, так как их магматические породы (по сравнению с базальтами СОХ) обогащены многими редкими литофильными химическими элементами, а это нетипично для продуктов плавления верхней мантии. Такие породы связаны с «пятнами» разогретой астеносферы, которые неподвижны и, в свою очередь, питаются мантийными плюмами — струями, поднимающимися из глубин нижней мантии, возможно, от границы «ядро-мантия». В

Границы «горячих полей» примерно совпадают с контурами «низкоскоростных мантийных провинций (LLSVP)», называемых также суперплюмами. Их связь с современными проявлениями вулканизма подтверждается локализацией на поверхности планеты всех известных на сегодня 49 горячих точек, а сами мантийные провинции определены методом сейсмографии (по Зоненшайну, 1991; Бьерку, Торсвику, 2004).



океанах внутриплитовый магматизм представлен главным образом базальтами плато и островов, выделяемых в особый геохимический тип — ОИВ (Ocean Island Basalt). К их составу близки базальты трапповых\* провинций, например, сибирские.

Представления о горячих точках предполагали наличие узких (порядка 150 км в поперечнике) мантийных струй (или столбов), пронизывающих всю толщу мантии, но остающихся неподвижными (по сравнению с литосферными плитами) на протяжении десятков миллионов лет. Внутри такой плиты, проходящей над «пятном» разогретой мантии, формируется вулкан; при смещении плиты относительно горячей точки над ней образуется еще один, а в итоге сегодня мы видим цепь потухших вулканов: они фактически трассируют след, прожигаемый горячей точкой. В этом отношении впечатляющим примером служит Гавайская горячая точка, с которой связано возникновение Гавайско-Императорского хребта в Тихом океане, существующего уже почти 100 млн лет.

Однако ряд исследователей, например, английский геолог Кейт Ранкорн, указывали, что геологические и физико-химические параметры мантии делают маловероятным существование таких столбов, и выдвигали разные гипотезы для объяснения природы горячих точек. Впрочем, все эти гипотезы не предполагали наличия каких-либо глубинных мантийных структур, влияющих на геологические процессы в верхних оболочках Земли.

### ГОРЯЧИЕ ПОЛЯ МАНТИИ

К 1980 г. внутриплитовая магматическая активность была установлена как в океанах (вулканические острова и плато), так и на континентах. Однако работ по

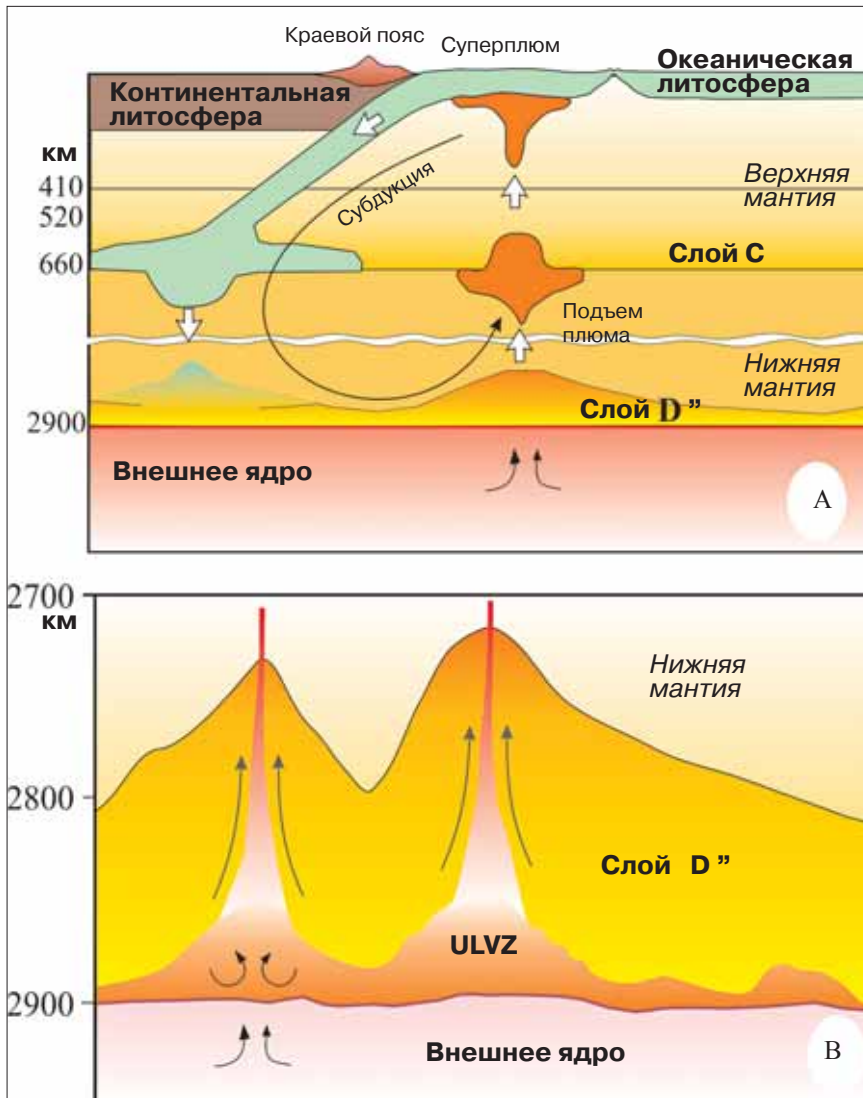
\*Траппы — континентальные плато, состоящие из диабазов, долеритов, базальтов, габбродиабазов и габбро (прим. ред.).

анализу общих взаимосвязей горячих точек (в качестве глубинных образований) и поверхностных геологических структур не было. Чтобы восполнить этот пробел видный советский геолог член-корреспондент РАН Лев Зоненшайн (1929–1993) предложил одному из авторов данной статьи Михаилу Кузьмину рассмотреть эту проблему. Подход был исключительно простым — найти чисто географические закономерности распределения на земной поверхности продуктов внутриплитового магматизма. Причем во внимание были приняты лишь объекты, имеющие сравнительно небольшой (0–15 млн лет) возраст, чтобы возможный дрейф континентов не вносил больших искажений.

Из полученной в итоге карты распределения горячих точек следует, что существуют четыре области распространения современного внутриплитового магматизма: две больших — Тихоокеанская и Африканская и две малых — Центрально-Азиатская и Тасманская. Наиболее крупные достигают 10 000 км в поперечнике (Африканская и Тихоокеанская) и сопоставимы с размерами главных литосферных плит, однако границы последних не совпадают с контурами областей.

Результаты были обобщены в статье «Внутриплитовый магматизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли» (Л. Зоненшайн, М. Кузьмин. Геотектоника, 1983), а области распространения внутриплитового магматизма авторы публикации назвали горячими полями Земли. Было отмечено, что последние совпадают с крупными положительными аномалиями в рельефе, а также положительными отклонениями формы геоида. Судя по геохимическим особенностям слагающих пород, этим областям отвечают аномалии существенного состава, по-видимому, связанные с нижней мантией.

Таким образом, выделенные горячие поля мантии Земли можно было представить как области, где про-



В зоне субдукции происходит погружение литосферной (океанической) плиты в мантию (А). Большая часть плиты задерживается в слое С, но частично материал литосферы опускается и до слоя D'', в котором происходит зарождение суперплюма (В).

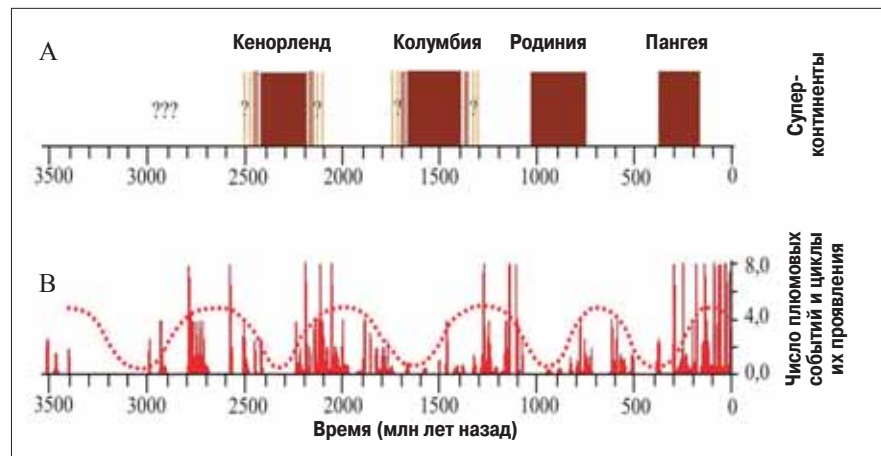
исходит подъем вещества и энергии нижней мантии к поверхности планеты, а располагающиеся между ними холодные поля (связанные с зонами субдукции литосферных плит) — как зоны, в которых вещество опускается в низы мантии. В совокупности вырисовывалась согласованная система конвекционных мантийных течений.

Если процессы, ассоциируемые с верхними оболочками, можно было описать в рамках тектоники литосферных плит, то обнаружение горячих полей позволило говорить о том, что конвективные явления имеют более глубинную природу. Иными словами, на основе полученных результатов впервые удалось высказать представления о взаимосвязи процессов в нижней и верхней мантии. Узкие мантийные струи, с которыми связаны горячие точки, могли представлять собой плюмы\*, отходящие от границы раздела нижней и верхней мантии, куда подходило разогре-

\*Плюм — горячий мантийный поток,двигающийся независимо от конвективных течений в мантии (прим. ред.).

тое вещество нижней мантии. Именно они порождают внутриплитовый магматизм и создают систему горячих точек. Заметим, что все эти выводы были сформулированы до появления в 1980-х годах сейсмотомографии — ее методы помогли геологам понять внутреннюю структуру мантии во всем ее объеме. В частности, японским и американским ученым удалось установить существование в мантии планеты крупных объемов вещества, связанного как с высокими, так и пониженными значениями скоростей сейсмических волн. Основные выводы этих исследований сводятся к следующему: на Земле существуют две большие низкоскоростные мантийные провинции (LLSVP) — Африканская и Тихоокеанская (в настоящее время их называют также суперплюмами). По данным сейсмотомографии здесь происходит подъем глубинного вещества слоя D'' до поверхности. Следует отметить, что проекции низкоскоростных мантийных провинций на поверхность Земли совпадают с выделенными ранее горячими полями мантии.

**В истории Земли предположительно существовали как минимум четыре суперконтинента. Установлены временные интервалы их возникновения и раскалывания под действием суперплюмов (А). Эти события происходят циклично и коррелируют с плюмовой активностью (В) (по Ли, Зонгу, 2009; Торсвику, 2004).**



В отличие от низкоскоростных провинций высокоскоростные ассоциированы с зонами субдукции, в пределах которых происходит опускание литосферных плит в мантию. Субдуцированная (поглощаемая) литосфера частично остается на границе верхняя-нижняя мантия, а какая-то часть погружается до границы «ядро-мантия». Поступающее в слой D'' вещество литосферы под влиянием тепла от ядра формирует частично расплавленные массы, являющиеся зародышами поднимающихся к поверхности земли горячих плюмов. Этот подъем способствует расширению объема при переходе от слоя D'' постперовскита в нижней мантии в перовскит, а также поступлению летучих химических элементов, в первую очередь C, S, O, H. Как следует из разностей плотности вещества во внутреннем и внешнем ядре, они содержатся в последнем и транспортируются в мантию, участвуя в формировании плюмов. Таким образом, выделение низко- и высокоскоростных мантийных провинций помогает вызвать два потока: опускание холодного вещества в низы мантии и подъем горячего к земной поверхности.

Сопряженность этих потоков в мантии позволяет полагать тесную связь глубинной геодинамики как с тектоникой плюмов, так и тектоникой плит. Убедительным аргументом в пользу этого является взаимосвязь процессов образования суперконтинентов и суперплюмов в единых циклах. В настоящее время установлено, что в процессе эволюции Земли возникали суперконтиненты, объединяющие практически все континентальные массы. В дальнейшем они разрушались под действием суперплюмов, а движения отдельных континентов становились центробежными. Предполагается, что в разное время на нашей планете существовали как минимум четыре суперконтинента (Кенорленд, Колумбия, Родиния и Пангея).

### ВНУТРИПЛИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ СИБИРИ

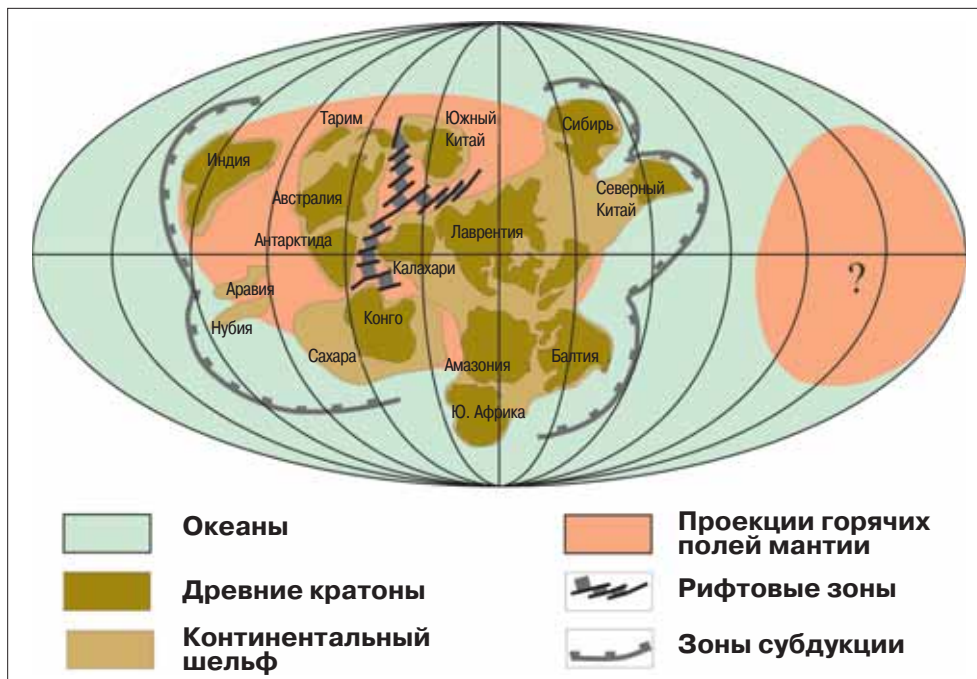
Сибирь была составной частью Родинийского континента, который сформировался около 1 млрд лет тому назад, но спустя примерно 250 млн лет начал распадаться под воздействием расположенного под ним Родинийского суперплюма. Предполагается, что од-

новременно с Родинийским существовал антиподальный ему суперплюм, расположенный в противостоящем Родинии секторе Земли. После распада Родинии составляющие ее континенты, в том числе и Сибирь, переместились в область позднерифейского океана.

Сибирь в то время не отличалась большими размерами, она состояла только из Сибирского кратона (платформы). Затем последовало присоединение к ней горно-складчатых орогенических поясов, в первую очередь Центрально-Азиатского, через который к Сибири примкнули Казахстанский и Китайский континенты, а закрытие Палеоуральского океана привело к созданию огромного Евро-Азиатского континента. Все эти процессы связаны с тектоникой плит, определивших возможность присоединения к Сибири малых и крупных континентальных масс, что подробно рассмотрено в монографии Льва Зоненшайна, Михаила Кузьмина и Льва Натапова «Тектоника литосферных плит территории СССР» (1990 г.).

Важная особенность Сибири — присутствие многочисленных комплексов внутриплитового магматизма. В разных ее областях обнаружены большие объемы пород, сходных с уже упоминавшимися базальтами типа ОИВ. Из этого следует, что в океане, окружавшем Сибирский континент, около 600 млн лет назад существовали острова, образованные горячими точками. Такие же точки воздействовали и на сам континент, в результате чего в его пределах сформировался ряд областей внутриплитового магматизма. Практически весь фанерозой\*, вплоть до самого последнего времени (> 25 млн лет), континент и его ближайшее океаническое окружение находились под влиянием горячего мантийного поля — суперплюма (Ярмолюк и др., 2006; Kuzmin et al., 2010). В раннем и среднем палеозое (~540–360 млн лет назад), уже после распада Родинии, это привело к образованию двух крупных магматических провинций — Алтае-Саянской и Вилюйской. Позднее (310–190 млн лет)

\*Фанерозой — геологическая эпоха, длящаяся последние ~540 млн лет, ее еще называют временем «явной» жизни. Подразделяется на три геологические эры: палеозой (540–252 млн лет назад), мезозой (252–66 млн лет назад), кайнозой (66 млн лет назад — настоящее время) (прим. ред.).



*Результат реставрации Родинийского плюма, который был ответствен за раскол Родинии (по Ли, Зонгу, 2009). В противоположном секторе Земли показан антиподальный суперплюм.*

сформировалось еще несколько внутриплитовых магматических провинций. Одна из них — Баргузинская, охватывающая территорию более  $2 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup>, характеризуется зональным строением: периферию образуют рифтовые зоны, а в центре ее располагается гигантский Ангаро-Витимский гранитоидный батолит объемом свыше 0,5 млн км<sup>3</sup>, образование которого произошло из-за масштабного плавления коры под тепловым влиянием мантийного плюма.

Важнейшим событием конца позднего палеозоя на Северо-Азиатском континенте стало образование в очень коротком интервале времени (3 млн лет) гигантской магматической провинции, объединяющей трапповую область Сибирской платформы и рифтовую систему Западной Сибири, которая прослеживается в фундаменте Западно-Сибирской низменности, имея протяженность свыше 1500 км.

В этот же период внутриплитовым магматизмом было охвачено и южное складчатое обрамление Сибири. Здесь сформировались траппы Тарима и сопряженная с ними система субпараллельных рифтовых зон в пределах Монголии: Гоби-Тянь-Шаньская и Главного Монгольского линиамента (разлома). Прогрессивному смещению центров плюмовой магматической активности в глубь Сибирского континента отвечают две другие рифтовые системы: Гоби-Алтайская и Северо-Монгольская. Одновременно со становлением последних двух рифтовых зон между ними возник Хангайский гранитоидный батолит, формирование которого, подобно Ангаро-Витимскому, также связывается с плавлением коры над мантийным плюмом. Развитие рифтовой системы завершилось образованием зонального Монголо-Забайкальского магматического ареала в раннем мезозое (~200 млн лет назад).

К рубежу 190 млн лет назад внутриплитовая активность резко сократилась. Однако в позднем мезозое воздействие мантийных плюмов на литосферу Сибирского континента возобновилось, и в пределах Центрально-Азиатского обрамления Сибирской платформы образовался ряд рифтовых областей. Расцвет же тектонической и магматической активности пришелся на начало раннего мела (145 млн лет назад). А вот последующее время характеризовалось постепенным ее затуханием.

Еще одна «вспышка» пришлась на позднекайнозойскую эпоху (< 25 млн лет назад), охватив территорию Центральной и Восточной Азии. В это время сформировались новые вулканические области: Южно-Байкальская, Удоканская, Витимская и другие, что было связано с зарождением серии горячих точек (Kuzmin et al., 2010).

Чтобы понять, как происходило взаимодействие Сибири с горячими точками, как они связаны с глубинными структурами Земли, необходимы «абсолютные» (приведенные к современным географическим координатам) палеорекострукции. Попытка такой реконструкции была предпринята нами в статье, опубликованной в журнале *Earth-Science Reviews*, 102 (2010 г.). Полученные результаты позволили ответить на ряд вопросов, связанных с оценкой роли плюмов в геологической истории нашей планеты и особенно с пониманием места горячих полей мантии Земли среди движущих механизмов ее развития.

### **ДРЕЙФ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ 570 МЛН ЛЕТ**

Зарегистрированная на Сибирском континенте непрерывная внутриплитовая магматическая активность показывает, что он был расположен в границах

Продукты внутриплитового магматизма океанического типа сохранились в структурах Сибирского палеоконтинента, зафиксировав таким образом активность Африканского суперплюма.

Крупные изверженные провинции:

ранний-средний палеозой:

I – Алтае-Саянская,

II – Вилюйская; поздний палеозой:

III – Баргузино-Витимская,

IV – Центрально-Азиатская;

пермо-триасс: V – Сибирские траппы;

ранний мезозой: VI – Западно-Сибирская рифтовая система; позднемезозойские-кайнозойские рифтовые системы:

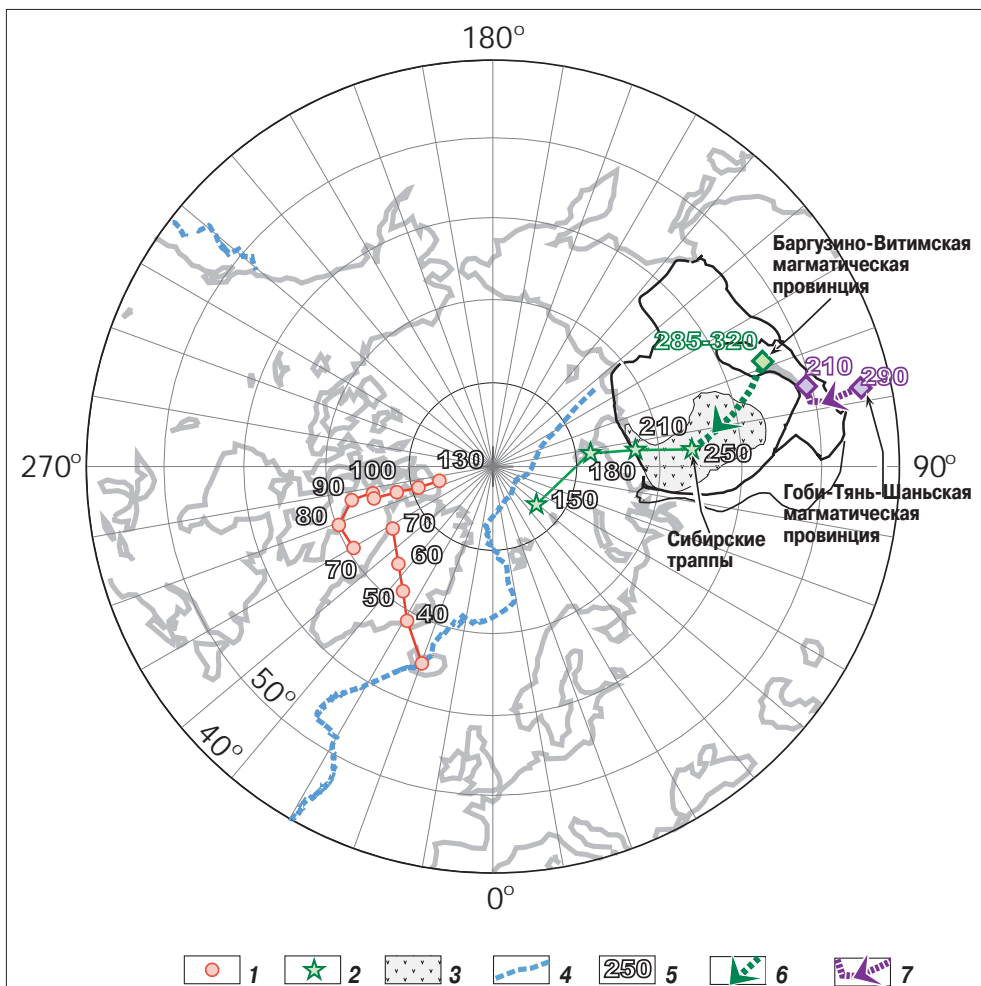
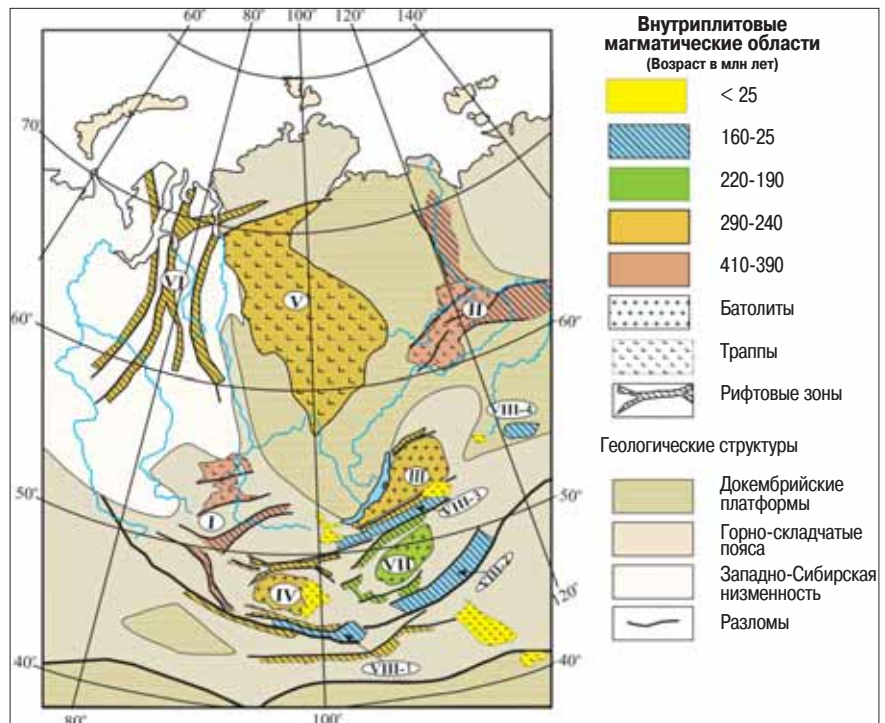
VII – Восточно-Монгольская-Забайкальская,

VIII(1) – Южно-Хангайская (Гоби-Алтайская),

VIII(2) – Восточно-Монгольская,

VIII(3) – Западно-Забайкальская,

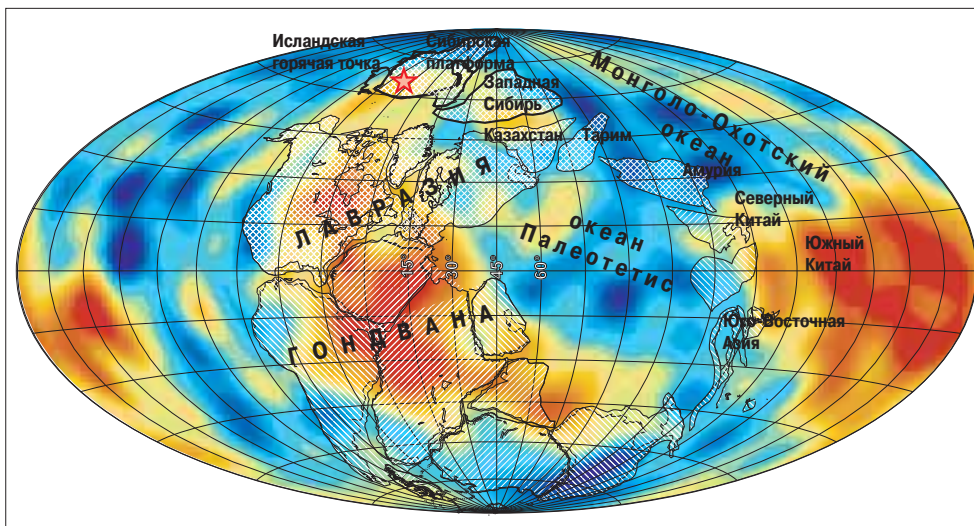
VIII(4) – Центрально-Алданская (по Ярмолюку, 2000, 2003, 2006, модифицировано).



**Схема миграции Исландской горячей точки в Арктическом бассейне в современных географических координатах:**

- 1 – до 130 млн лет назад;
- 2 – от 150 до 250 млн лет назад;
- 3 – сибирские траппы;
- 4 – срединно-океанические хребты;
- 5 – возраст магматизма в миллионах лет;
- 6 – миграция магматизма, связанного с Сибирским плюмом;
- 7 – миграция магматизма, связанного с Хангайским плюмом (по Кузьмину, 2010, Харину, 2000 и др.).





**Реконструкция Сибирской платформы и основных континентов за 250 млн лет. Под контурами континентов показано сегодняшнее распространение «мантийных провинций низкоскоростных сейсмических волн (LLSVP)» вблизи границы ядро-мантия. Ярко-красный цвет соответствует подъему горячего мантийного вещества, синий — опусканию относительно холодного. Положение основных областей LLSVP считается достаточно устойчивым на протяжении долгого геологического времени.**

горячего поля мантии, по крайней мере с ордовика до мелового периода, т.е. на протяжении 490–470 млн лет. Для выполнения «абсолютных» палеореконовструкций Сибири важно знать палеогеографическое положение областей магматизма в конце палеозоя — начале мезозоя (от 250 млн лет назад).

Следы магматической деятельности Исландской горячей точки в позднем мезозое и начале кайнозоя прослеживаются в Северной Атлантике и Гренландии (обобщение данных приведено в нашей работе (Kuzmin et al., 2010). Таким образом, след горячей точки запечатлен в литосфере мигрирующих континентальных блоков Арктического бассейна на протяжении последних 250 млн лет.

Сегодняшние координаты Исландской точки:  $65^{\circ}$  с.ш. и  $342^{\circ}$  в.д. Отметим, что палеоширота Сибирской трапповой провинции на время ее образования (250 млн лет назад) была  $62^{\circ} \pm 7^{\circ}$  — она практически та же, что и у сегодняшней Исландии. По крайней мере на протяжении пермского и триасового периодов указанная горячая точка располагалась над северной оконечностью Африканского горячего мантийного поля. Поскольку, как показано, оно остается в неизменных координатах на протяжении последних 300 млн лет (Torsvik et al., 2008), мы заключили, что Сибирь находилась в его рамках на протяжении фанерозоя. Признаки обширной внутриплитовой магматической активности в Сибири свидетельствуют, что Сибирский континент дрейфовал над горячим мантийным полем, по крайней мере, с эпохи раннего палеозоя до пермо-триасового периода. Значит, долготное положение Сибири за это время радикально не изменилось, хотя ее палеоширотное положение менялось. Африканское горячее поле находилось, как и сегодня, примерно между  $70^{\circ}$  в.д. и  $330^{\circ}$  в.д., что означает: указанный континент не выходил за эти пределы с начала фанерозоя до перми и триаса. Исходя из того, что тогдашнее местоположение Сибири и современное исландского мантийного плюма совпадают, можно определить географические координаты Сибирского континента в прошлом. В те-

чение венда-раннего кембрия он располагался возле экватора, своей современной южной—юго-восточной границы, повернутой на север. Мы (Kuzmin et al., 2010) выбрали древнюю широту  $30^{\circ}$  в.д. для кембрия Сибири в пределах Африканского горячего мантийного поля, чтобы минимизировать перемещения Сибирского континента в пределах поля и исключить резкие перемещения континента, которые превышали бы современные скорости континентального дрейфа.

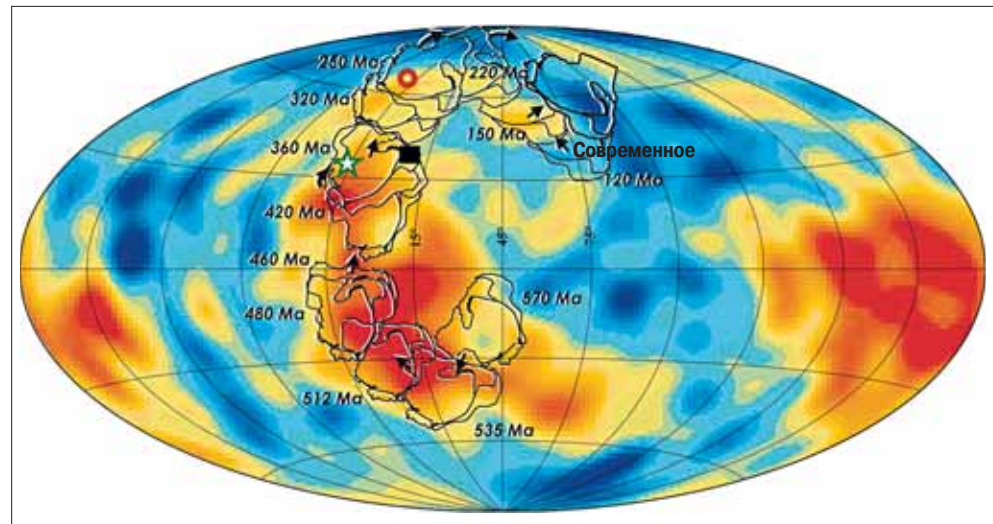
В раннем кембрии (~535 млн лет назад) Сибирь располагалась в Южном полушарии (~ $30^{\circ}$  ю.ш.,  $20^{\circ}$  в.д.). Начиная с середины того же периода (520–505 млн лет назад) и до раннего—среднего ордовика (480–460 млн лет назад) она дрейфовала на север почти до экваториальных широт. При этом скорость ее дрейфа по широте с 512 до 480 млн лет назад достигала 5 см/год (предельная для современных континентальных плит), поэтому изменения по долготе практически не должно было быть.

Внутриплитовые магматические события на Сибирском континенте связаны с горячими точками от кембрия (510 млн лет назад) до пермо-триаса (250 млн лет назад), когда Сибирь перемещалась над Африканским горячим полем. По палеомагнитным данным Сибирь в раннем палеозое (от 510 до 435 млн лет назад) дрейфовала на север со средней скоростью широтного перемещения около 7,3 см/год. Такая скорость континентального дрейфа относительно высока, значит, перемещение Сибири происходило по широте вдоль меридиана, т.е. долгота значительно не менялась.

В предложенной реконструкции (Kuzmin et al., 2010) авторы расположили Русскую и Сибирскую платформы над Африканским горячим полем, так как магматические события гигантского масштаба в девоне произошли на обеих платформах (Виллоуский рифт в Сибири и Припять-Днепровско-Донецкий рифт в Европе).

После девона отмечается миграция Сибири на север с одновременным поворотом на  $60^{\circ}$  по часовой стрелке в период от 360 до 250 млн лет назад, т.е. до време-

На основе палеорекострукции получена схема миграции Сибирского континента над Африканской мантийной провинцией за последние 570 млн лет (по Кузьмину, 2010).



ни ее расположения над Исландской горячей точкой. Средняя скорость широтного смещения составляла около 4 см/год, что соответствует современным темпам дрейфа континентов. Во временном интервале от 250 до 200 млн лет назад Сибирь отошла от Исландской горячей точки. Этот уход обусловлен открытием северной части Атлантического океана. Позднемезозойская внутриплитовая магматическая деятельность переместилась на территории Центральной и Восточной Азии и к концу мелового периода значительно сократилась. За последние 250 млн лет Сибирский континент переместился до современного положения, дрейфуя по широте через северный географический полюс со средней скоростью  $\sim 1,7$  см/год.

Суммируя все изложенное, следует подчеркнуть: Земля представляет собой самоорганизующуюся систему, развитие которой сопряжено с взаимодействием ее внутренних оболочек. Оно проявляется в процессах конвекции, важную роль в которых играют, в частности, мантийные плюмы. В настоящее время установлено, что такие восходящие струи мантии в основном сконцентрированы в двух секторах Земли, выделяемых как суперплюмы: Тихоокеанский и Африканский. Очевидно, что роль последних в формировании структуры литосферной оболочки Земли трудно переоценить. И здесь возникает вопрос об их природе — когда и почему зарождаются суперплюмы, какова длительность их существования, насколько стабилен режим их воздействия на литосферу?

Определенный вклад в решение этих вопросов внесли выполненные авторами настоящей статьи исследования. Прежде всего они зафиксировали то, что проявления внутриплитовой активности в пределах Сибирского континента в течение всего фанерозоя стали следствием его миграции над горячим полем, сопоставляемым с современным Африканским суперплюмом. Следовательно, этот суперплюм существует не менее 570 млн лет. А учитывая, что Родинийский суперплюм, разбивший Родинию, сопоставляется с Тихоокеанским (Yuen et al., 2002), оба этих

суперплюма следует рассматривать как наиболее долгоживущие глубинные структуры Земли.

Связь суперплюмов с процессами формирования и разрушения суперконтинентов в настоящее время является общепризнанной. Но последние результаты позволяют говорить, что осколки суперконтинентов после их разрушения суперплюмом-убийцей перемещаются в области Земли, контролируемые антиподальным плюмом, и образуют над ним новую суперконтинентальную агломерацию. Такая двойная роль плюмов, по-видимому, отражает их противофазную активность, вероятно, связанную с разным проявлением отвечающих им конвективных процессов, одной из причин которой, как показали исследования геохимика академика Вячеслава Коваленко с коллегами, мог стать эффект термостатирования.

Наконец, следует сделать вывод о направлении будущих исследований. Тот факт, что при образовании суперконтинента, в частности Пангеи или Евразии, отдельные континенты (Сибирь), проходя над разновозрастными горячими точками конкретного горячего поля мантии, сохраняют следы этих горячих точек, позволяет предполагать: уже в ближайшем будущем существующие методы изучения магматических пород помогут дать оценку эволюции мантийных источников как для отдельных плюмов, так и для суперплюмов в целом. В конечном итоге это будет способствовать пониманию общих закономерностей эволюции Земли.

Работа поддержана программой №4 Президиума РАН, программой №10 Отделения наук о Земле РАН, Интеграционным проектом №87 СО РАН, а также грантами РФФИ: 13-05-12043 и 13-05-12026.

Иллюстрации предоставлены авторами