

УДК: 551.24.01

“ВЕЛИКАЯ ДИСКУССИЯ” О ПЛЮМАХ: ТАК КТО ЖЕ ВСЕ-ТАКИ ПРАВ?

© 2009 г. В. Н. Пучков

*Институт геологии Уфимского научного Центра РАН, 450000,
Уфа, ул. К. Маркса 16/2*

Поступила в редакцию 05.02.2008 г.

Анализ состояния современной теории мантийных плюмов в соотношении с классической плейт-тектоникой показывает, что “плюмовое” направление геодинамики переживает серьезный кризис. Растет количество публикаций, в которых критикуются представления сторонников плюмов. Оспариваются, и не без оснований, первоначально утвердившиеся представления о том, что все плюмы рождаются на границе ядро–мантия, что они имеют широкую головную часть и тонкую хвостовую, что они всегда сопровождаются поднятиями земной поверхности и что геохимические признаки (в том числе, изотопное гелиевое отношение) позволяют их уверенно опознать. Появились также достаточные доказательства того, что плюмы не могут служить жестко закрепленной референтной системой для движущихся литосферных плит. В конечном итоге, само существование плюмов подвергается серьезному и отчасти обоснованному сомнению. Выдвинуты альтернативные представления о том, что все плюмы (или “горячие точки”) связаны напрямую с плейт-тектоническими механизмами и их появление вызывается близповерхностными тектоническими напряжениями, последующей декомпрессией и плавлением мантии, обогащенной базитовым веществом. Делаются альтернативные попытки объяснить регулярность изменения возраста вулканов в океанических хребтах “бегущей трещиной” или дрейфом плавящихся вкраплений обогащенной мантии в субгоризонтальном потоке астеносферы.

По мнению автора, путь преодоления кризиса лежит через возвращение к истокам плюмовой теории и через адекватное уточнение признаков плюмов. К плюмам следует относить лишь мантийные потоки с источниками, расположенными ниже астеносферы, и таким образом, не связанными напрямую с плейт-тектоническими механизмами типа пассивного рифтогенеза с последующей декомпрессией и плавлением в верхах астеносферы. Эти потоки очерчивают линии последовательно омолаживающихся вулканов на поверхности плит, имеют подастеносферные корни, отражающиеся на сейсмотомографических схемах, и в большинстве своем расположены над краями “суперсвеллов” – областей замедления сейсмических волн на границе ядро–мантия.

ВВЕДЕНИЕ

В истории наук о Земле неоднократно отмечались кризисы, сопровождавшиеся бурными дискуссиями. В качестве примеров можно привести хорошо известные споры непутистов и плутонистов, катастрофистов и эволюционистов, мобилистов и фиксистов. Эти “Великие дискуссии”, которые первоначально инициировались непримиримыми оппонентами с их крайними точками зрения, приводили в дальнейшем к плодотворным поискам все новых аргументов и фактов “за” и “против”, попыткам опровержений и компромиссов, и в конечном счете – к спокойному пониманию рамок, в пределах которых правы “те” и “другие”.

За последние 10 лет в науках о Земле разгорелась новая дискуссия, касающаяся вопроса о существовании так называемых плюмов или их отсутствии. Причисляя ее к “Великим”, я обращаю внимание читателя не только на ее порою страстный или даже пристрастный характер, но и на великую значимость самого предмета дискуссии, поскольку она касается процессов, идущих во

всем объеме мантии (в особенности – в нижней мантии), и их проявлений в земной коре. От конечного исхода дискуссии могут зависеть наши представления о конкретном характере этих процессов, мере и способе их влияния на тектонику и металлогению земной коры, наше понимание объема тектоносферы и другие фундаментальные теоретические положения, определяющие развитие глобальной геодинамики.

Данная статья представляет собой попытку разобраться в логике аргументов, выдвигающихся представителями противоборствующих сторон, и по возможности избегая эмоций и ангажированности, свойственных немало количеству участников полемики, дать свою оценку создавшегося положения.

ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ, ГОРЯЧИЕ ПОЛЯ, ПЛЮМЫ, СУПЕРПЛЮМЫ, LIPs И ДРУГИЕ

Идея о том, что цепи вулканов, наблюдаемые на океаническом дне, являются “горячими точка-

ПУЧКОВ

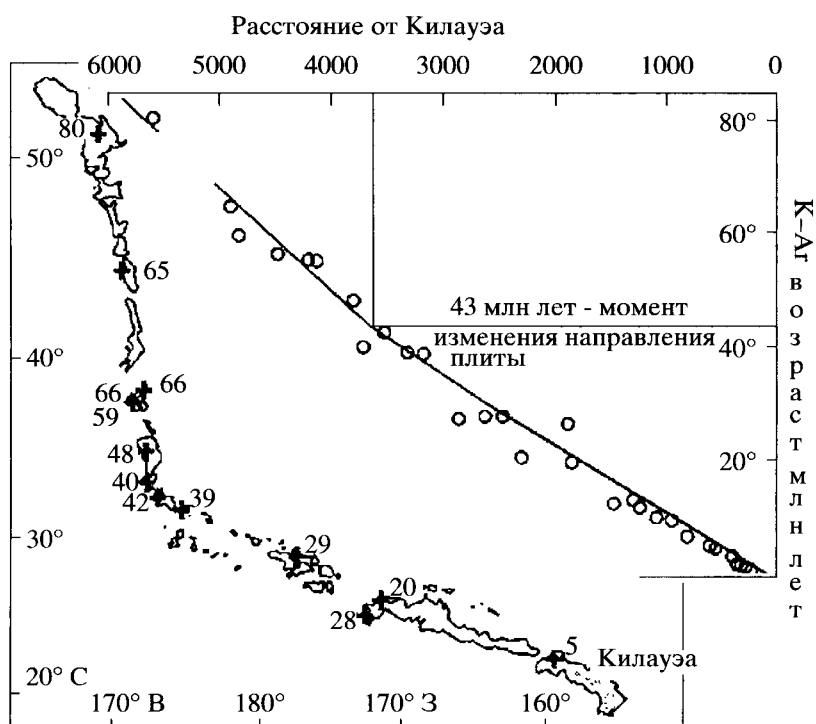
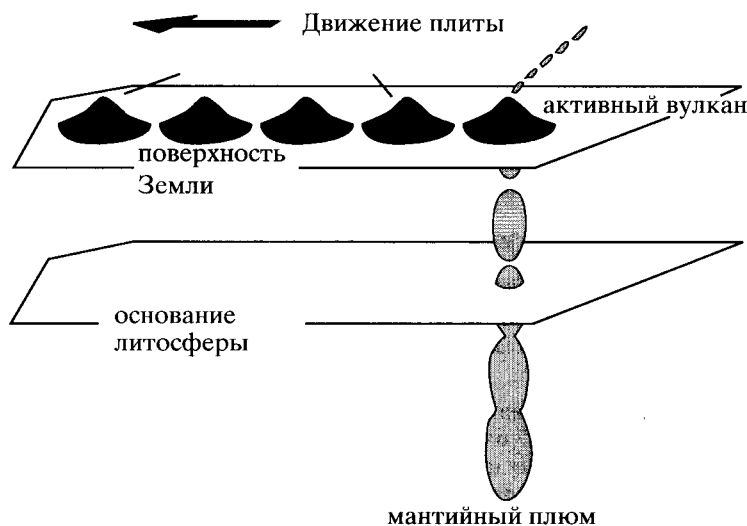


Рис. 1. Вверху: Классическая модель формирования горячей точки согласно плюмовой гипотезе. Мантийный плюм проникает в литосферу, вызывая образование вулкана. Литосфера движется относительно плюма, что обуславливает формирование цепочки вулканов. Внизу: схема вулканической цепи Гавайи–Императорский хребет с указанием возраста вулканических пород. Рядом – график соотношения возраста и расстояния от действующего вулкана Килауэа (Гавайи) [53].

ми” – поверхностными проявлениями аномальных участков плавления в мантии – была высказана более 40 лет тому назад Дж.Т. Вильсоном [71]. Вслед за тем идея была развита [51] в виде концепции мантийных плюмов (“перьев”, “плюмажей”), – пространственно зафиксированных вертикальных конвективных потоков, “апвеллингов” горячего легкого вещества, поднимаю-

щихся от границы ядро-мантия. Вулканический след этих потоков на земной поверхности зависит от движения литосферных плит, что позволяет использовать проекцию любого из них на земную поверхность в качестве относительно стабильной точки отсчета при анализе движений плит. Классическим примером считается хребет Императорский-Гавайи (рис. 1).

Идея о плюмах переключается – хотя и не совпадает – с идеей В.В. Белоусова [2] об астенолитах: столбах легкого разогретого вещества, поднимающихся в мантии. Правда, в отличие от идей В.В. Белоусова, защитники представлений о плюмах не стремятся подменить ими представления о горизонтальных перемещениях литосферных плит на поверхности Земли, а наоборот, считают плюм-тектонику существенным дополнением к классической тектонике литосферных плит.

За последние 35 лет плюм-тектоника активно развивалась, вовлекая в сферу рассмотрения такие передовые направления науки как сейсмогеография, петрология, геохимия, изотопная геология. Начали оформляться представления о горячих полях [5], или LIPs [26], – грандиозных короткоживущих магматических провинциях (в переводе на русский – Крупные Магматические Провинции, КМП). Уточненная недавно характеристика КМП [19] звучит следующим образом: “Крупные Магматические Провинции образованы породами преимущественно основного состава (с подчиненными кислыми и ультраосновными компонентами, хотя есть и преимущественно кислые), занимают площади >0.1 млн. км²; объемы изверженной массы >0.1 млн. км³ и максимальная продолжительность активности ~ 50 млн. лет: это внутриплитные образования и характеризуются магматическими импульсами короткой продолжительности ($\sim 1\text{--}5$ млн. лет), в течение которых изливается и внедряется большая часть ($>75\%$) всех магматических пород”.

С проявлением КМП исследователи вскоре связали распад суперконтинентов – прежде всего, Пангеи [4, 64], а затем и Родинии [48, 49 и др.]. Образование КМП на определенном этапе стали отождествлять с суперплюмами – широкими плюмоподобными воздыманиями мантийного вещества, вызывавшими сравнительно короткое по времени выплавление и излияние колоссальных объемов вулканических пород. Обнаружилась связь между плюмами и суперплюмами, а тех и других – с суперсвеллами: областями пониженных скоростей в слое D" на границе коры и мантии (см. ниже). Общедоступным источником сведений о КМП является веб-сайт <http://www.largeigneousprovinces.org>.

ПРИЗНАКИ И СВОЙСТВА ПЛЮМОВ И СУПЕРПЛЮМОВ

По мере развития теории, предлагался целый набор признаков и свойств, которые с той или иной степенью обоснованности приписывались плюмам и суперплюмам. Среди них:

1. Уже упоминавшееся наличие цепочек вулканов с закономерным последовательным омоложением возраста, т.е. регулярных, ранжированных во времени (time-progressive volcanic chains), – они-то и навели на мысли о “горячих точках” и плюмах; первоначально предполагалось, что положение плюмов жестко закреплено и они могут служить точкой отсчета для движения плит. К настоящему времени получены изотопные датировки, подтверждающие существование по крайней мере двух десятков таких цепей (рис. 2).

2. Выявляемое сейсмотомографией под активными плюмами наличие вертикальных столбов или наклонных зон разуплотненного вещества мантии, простирающихся на большие глубины, часто превышающие первые сотни километров, а в ряде случаев достигающих границы верхней и нижней мантии или даже границы ядро–мантия [75 и др.] (рис 3). Тектонофизическое моделирование позволило предположить [24], что это субвертикальные цилиндрические структуры, которые характеризуются тонким подводным каналом и широкой головной частью (структура “голова–хвост”); головная часть, упираясь при подъеме в литосферу, расширяется на большие территории и дает объемные выплавки (КМП); с течением времени объемы выплавок, связанные с питающим каналом, сокращаются.

3. Связь индивидуальных плюмов и суперплюмов с глобальными областями разуплотнения в нижней мантии (рис. 4). Посредством сейсмотомографии под южной частью Тихого океана и Африкой выявлено существование двух “медленных” аномалий, LLSVPs (Large Low Shear Velocity Provinces), [21], которые имеют размеры до тысячи километров в плане, простираются вверх, постепенно распадаясь, на всю мантию и концентрируются преимущественно над двумя супервздутиями поверхности D" над ядром – (superswells). В свою очередь, размещение двух крупнейших суперсвеллов – Тихоокеанского и Африканского – коррелируется с формой геоида.

Ряд исследователей отмечает, что “суперсвеллы”, расположенные на D", имеют частично резкие границы и не могут быть чисто термальными, а отражают вещественные неоднородности [1, 21, 38, 70 и др.]

4. Связь плюмов с куполовидными поднятиями земной поверхности.

5. Петрологические и геохимические особенности вулканизма, сопровождающего плюмы. Были предложены критерии отличия базальтов индивидуальных плюмов от базальтов срединно-океанических хребтов, заключающиеся в более высоких содержаниях литофильных элементов с крупными ионными радиусами, легких РЗЭ, и в

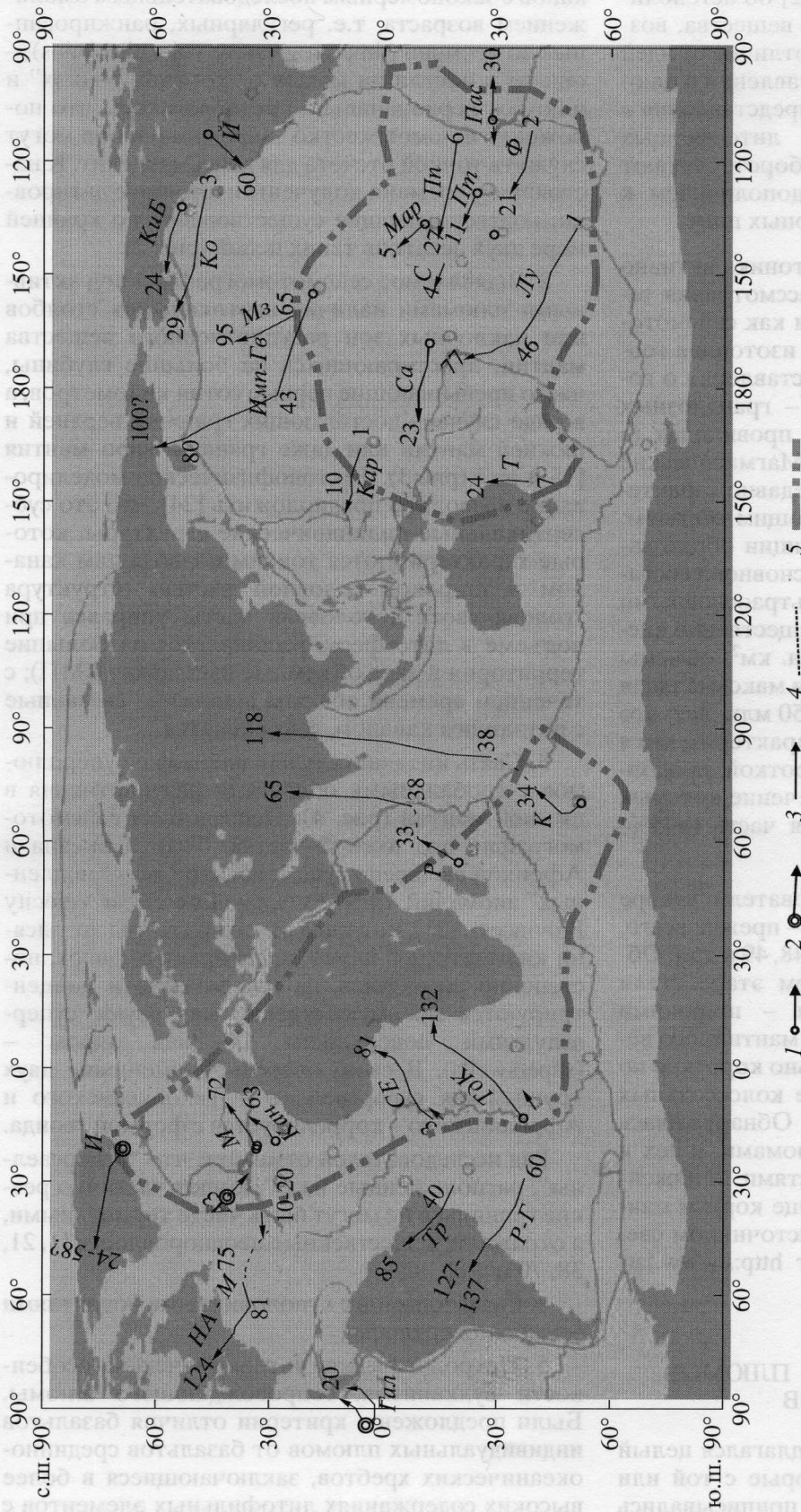


Рис. 2. Местоположение мезозойских и кайнозойских регулярных вулканических цепей (хребтов с направленным изменением возраста). Схема построена на основе данных, опубликованных по Тихому, Индийскому и Атлантическому океанам и их континентальным окраинам [17, 24, 25, 27, 37, 39, 41, 46, 52-56, 59].

1 – вулканические цепи с активным или сравнительно недавно (менее 1 млн. лет) потухшим вулканом на одном из концов. Стрелка указывает направление удорожения (по сути, это направление движения литосферной плиты без поправки на значительное более слабое перемещение самого шлома). На другом конце цифровой указан возраст наиболее древнего вулканического события (в случае континентальных проявлений – это траппы, кольцевые интрузии, карбонаты); 2 – головной вулкан находится на СОХ, 3 – вулканические цепи, в которых наиболее молодой вулкан потух более 1 млн. лет тому назад (цифрой указан возраст вулкана). Остальное – как в первом пункте; 4 – линия, связующая вулканы, в прошлом принадлежавшие единой цепи, пересекающей активную зону спрединга и впоследствии разделенной ею; 5 – вертикальные проекции на земную поверхность примерных контуров двух супервеллов, или областей пониженных скоростей (Large Low Shear Velocity Provinces (LLSVPs), – Африканского и Тихоокеанского – на границе кора-мантия [21]) Все активные или недавно потухшие вулканы регулярных вулканических цепей находятся внутри этих контуров – кроме двух расположенных близ Аляски (Кобб; Кодиак-Боуи), которые, вероятно, связаны с провинцией Колумбия Ривер на западе Северной Америки и обнаруживают связь с малым супервеллом [21].

Буквенные обозначения шломов (от северо-западного угла схемы против часовой стрелки): И – Исландский, Аз – Азорский, НА-М – Новая Англия-Метеор, М – Мадейра, Кан – Канарский, СЕ – Святая Елена, ТдК – Тристан да Кунья, Р-Г – Рио-Гранде, Т – Реюньон, К – Кергелен, Р – Тасманский, Кар – Каролинский, Са – Самоа, Лу – Луисвилль, С – Сосайети, Мар – Маркизовы, Имн-Ге – Императорский-Гавайи, Мз – Музыкантион, КиБ – Кодиак-Боуи, Ко – Кобб, Пн – Пука-лука, Пт – Питкерн, Пас – Пасхи, Ф – Фаундейшн, Гал – Галапагос, Й – Йеллоустон.

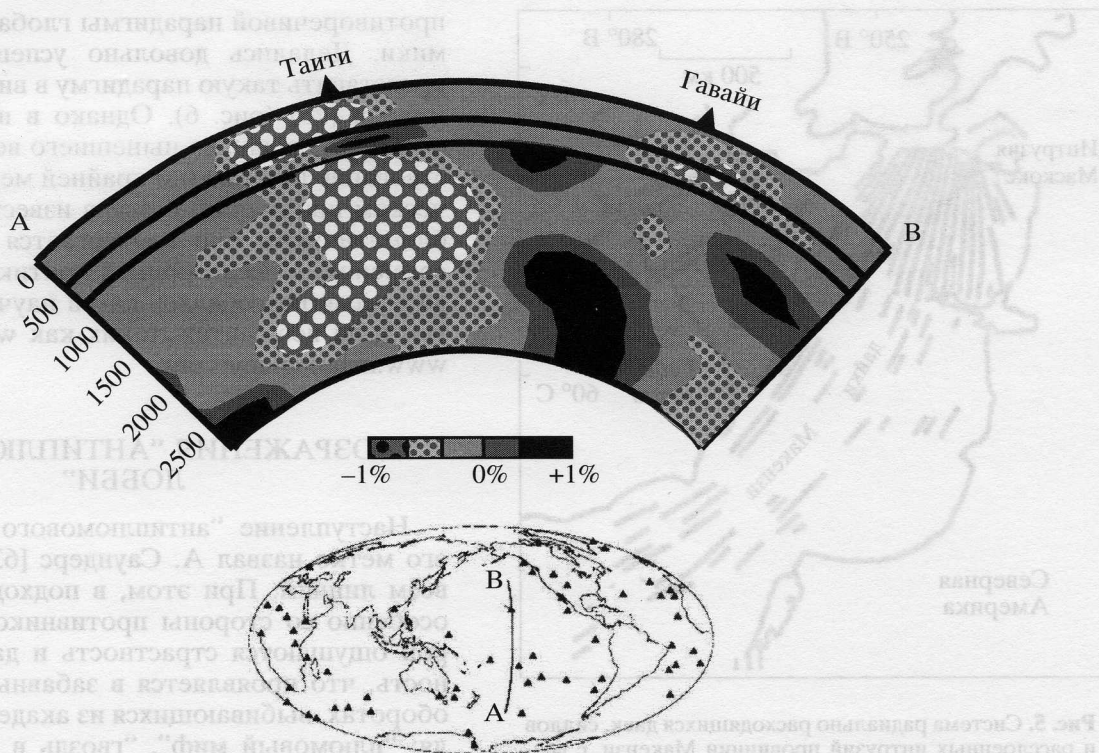


Рис. 3. Вертикальный разрез аномалий скоростей продольных волн по профилю, проходящему через Гавайи и Южно-Тихоокеанский суперсвелл. Шкала отклонения скоростей от средней величины и положение разреза показаны ниже. Треугольники на разрезе указывают положение Гавайской и Таитянской горячих точек [75].

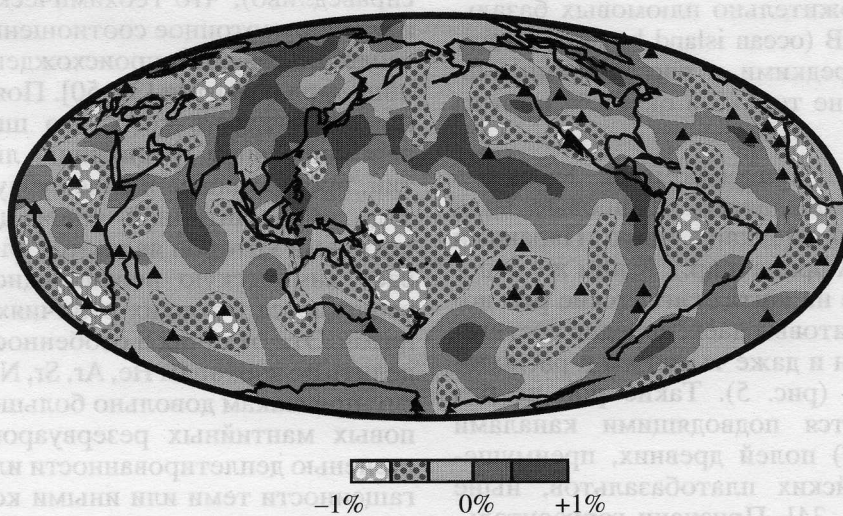


Рис. 4. Аномалии скоростей продольных волн близ границы ядро–мантия (глубина 2730 км). Шкала изменения скоростей дана под схемой. Треугольниками показаны горячие точки на поверхности Земли [75].

повышенных соотношениях изотопов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pd}/^{204}\text{Pd}$, и особенно $^3\text{He}/^4\text{He}$ (т.е. отношение первичного, “солнечного” гелия к радиогенному, что должно было свидетельствовать о глубинном характере источника) [5]. Предполагалось, что такие характеристики свидетельству-

ют о связи этих вулканитов с верхней мантией Земли. В областях древней, мощной континентальной литосферы (а иногда и на океанских островах) с проявлениями плюмов и сопутствующими процессами щелочного метасоматоза связывают образование карбонатитов и кимберлитов.

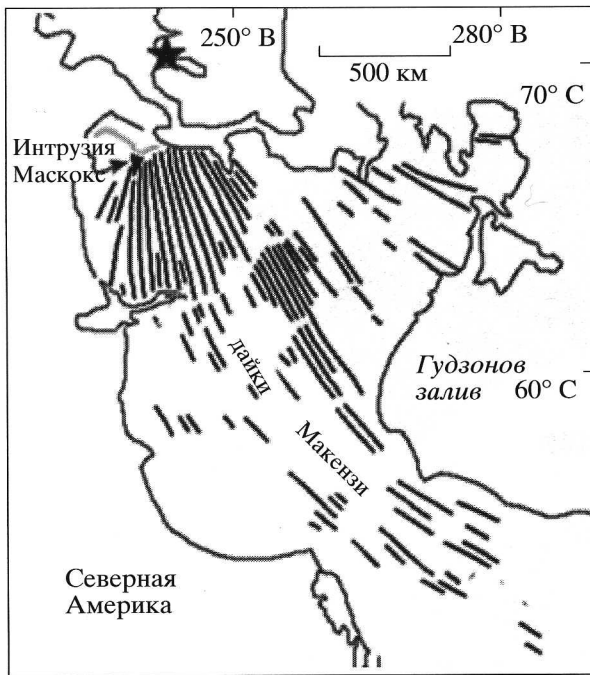


Рис. 5. Система радиально расходящихся даек, силлов и расслоенных интрузий провинции Макензи, с возрастом 1270 млн. лет. Пример глубоко эродированной протерозойской КМП, в которой вскрыта ее подводящая система ("plumbing system") [32, 34].

Была установлена преимущественная принадлежность предположительно плюмовых базальтов к категории ОИВ (ocean island basalts), обогащенных многими редкими и рассеянными элементами – причем не только в океанах, но и на континентах [36].

6. Связь КМП с суперплюмами. К ним в первую очередь принадлежат трапповые поля фанерозоя (Сибирь, Деккан, плато Парана и Этендека, Южная Африка и др.). К ним же относят расположенные на щитах гигантские рои докембрийских долеритовых даек, нередко достигающих в длину сотен и даже тысяч км и расположенных радиально (рис. 5). Такие рои не без оснований считаются подводящими каналами ("plumbing systems") полей древних, преимущественно докембрийских платобазальтов, ныне эродированных [32, 34]. Признаки горизонтального движения магмы по этим каналам позволяют избежать представлений о "морях магмы" под трапповыми полями.

Несмотря на определенные проблемы, казалось, что плейт- и плюм-тектоникам, существовавшим первоначально как "параллельные" парадигмы, из которых первая отвечала преимущественно за верхнюю тектоносферу, а вторая за нижнюю, суждено достаточно бесконфликтное развитие и быстрое слияние в рамках единой не-

противоречивой парадигмы глобальной геодинамики. Делались довольно успешные попытки представить такую парадигму в виде упрощенной модели [28] (рис. 6). Однако в последние годы (примерно с начала нынешнего века) само существование плюмов (по крайней мере, в их классическом понимании) стало в известной мере проблематичным: оно подвергается все большему сомнению и всесторонней критике. Оживленная дискуссия разгорелась как в научных журналах, так и на веб-сайтах, таких как www.geolsoc.org; www.mantleplumes.org.

ВОЗРАЖЕНИЯ "АНТИПЛУМОВОГО ЛОББИ"

Наступление "антиплюмового лобби" – как его метко назвал А. Саундерс [63] – ведется по всем линиям. При этом, в подходе к проблеме, особенно со стороны противников плюмов, порой ощущаются страстность и даже пристрастность, что проявляется в забавных лексических оборотах, выбивающихся из академического стиля: "плюмовый миф", "гвоздь в гроб плюмов", "любовная интрижка с плюмами", "черт-те-что" (а не плюм) и др.

В частности:

1. Утверждается (и как кажется, достаточно справедливо), что геохимические метки и даже гелиевое изотопное соотношение не обязательно свидетельствуют о происхождении плюма на границе ядра и мантии [33, 50]. Появляется все больше свидетельств того, что широкомасштабное перемешивание (рециклинг) литосферы и мантии, происходящее в ходе субдукции (а точнее, в ходе общемантийной конвекции, восходящими потоками которой являются плюмы), обуславливает химическую неоднородность мантии, что выражается в тонких отличиях геохимии вулканитов. Эти отличия и особенности позволили выделить по изотопам He, Ar, Sr, Nd, Hf, Os, Pb и другим признакам довольно большое количество типовых мантийных резервуаров, отличающихся степенью деплетированности или, наоборот, обогащенности теми или иными компонентами (эти резервуары обозначаются аббревиатурами PM, BSE, PREMA, UM (MORB), DM, EMI, EMII, SOPITA, HIMU, SCLM, FOZO и др. [3, 76], расшифровка которых в данной публикации не требуется). В описании сложной структуры мантии, где соседствуют участки недеплетированные, деплетированные, вторично обогащенные в результате метасоматоза (refertilised) и принадлежащие рециклированной литосфере, стали использоваться такие экспрессивные термины как "marble cake", "spaghetti", "plum cake" и др. Некоторые исследо-

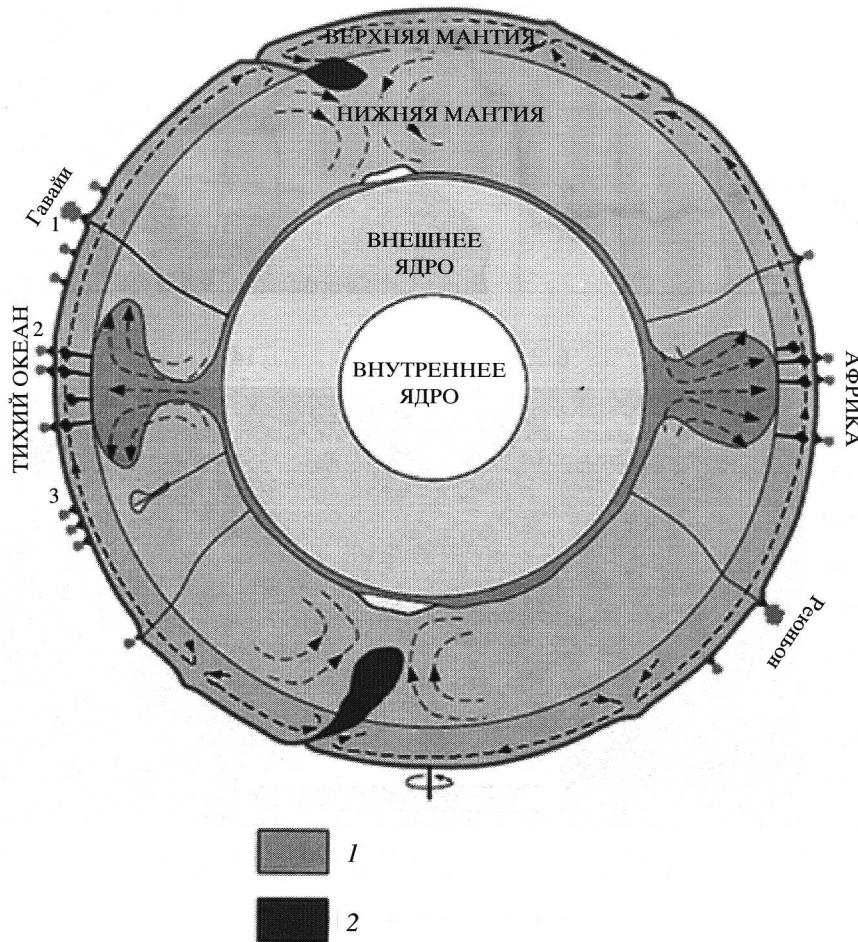


Рис. 6. Модель соотношения плит- и плюм-тектоники [29].
1 – суперплюмы, 2 – погружающиеся литосферные слэбы.

ватели видят в этом возможность обмена изотопными гелиевыми метками между участками мантии различного типа в течение длительных промежутков геологического времени [14].

2. Высказывается сомнение в реальности образов плюмов, получаемых с помощью сейсмотомографии, – вплоть до утверждения, что улавливаемые сейсмологами аномалии скоростей продольных и поперечных волн находятся “на уровне шумов” [44]. Действительно, далеко не все плюмы прослежены до ядра (хотя если “хвост” плюма тоньше длины используемой волны, то он и не будет виден). Не подтверждается и их грибообразная форма. И все-таки, при всех несовершенствах сейсмотомография видит удивительно много. На рис. 7, иллюстрирующем профиль вдоль Срединно-Атлантического хребта, видны горячие и “холодные” его зоны (видно даже то, о чем не говорят авторы, а именно – зону “сухого”, т.е. слабовулканического спрединга Центральной Ат-

лантики), а корень Исландии пронизывает всю верхнюю мантию.

Следует заметить, что сейсмотомография – достаточно узкоспециализированный вид научного исследования и здесь последнее слово за экспертами. Однако именно из рук специалистов мы получаем с каждым годом все более детальные сведения по этому вопросу [47, 60, 66, 72 и др.], умножающие, а не опровергающие сейсмотомографические построения – не только по части плюмов, но и по части зон субдукции. До появления сейсмотомографии зоны субдукции следились до глубины 700 км по глубокофокусным землетрясениям. Сейсмотомография проследила холодные “слэбы” литосферы глубоко в нижнюю мантию (рис. 8). Нужно обладать большой смелостью, чтобы, не будучи сейсмологом, оспаривать, как Дж. Фоулджер [35], эти данные.

3. Утверждение, что все плюмы предвзрываются поднятиями земной поверхности, оказалось не со-

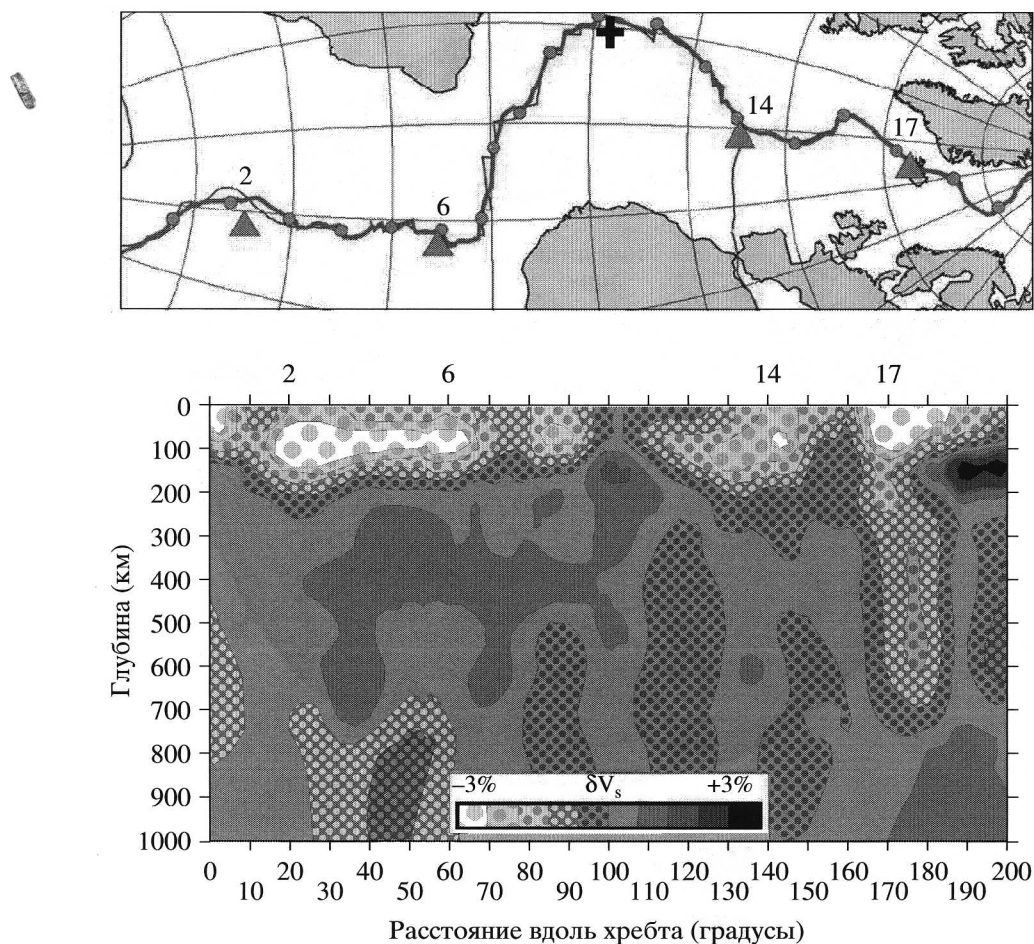


Рис. 7. Томографический разрез вдоль Срединно-Атлантического хребта (по [61], с дополнением автора). Вверху: географическое расположение разреза. Сплошной жирной линией показана ось хребта, серые кружки – пикеты, расположенные на 10° по широте один от другого. Треугольники – горячие точки (пикеты 2, 6, 14, 17 – Тристан, Асунсьон, Азоры, Исландия соответственно). Крест, добавленный автором, – область “сухого” спрединга, в которой выплавление базальтов незначительно. На томограмме внизу – аномалии скорости распространения поперечных волн. Из горячих точек только под исландской виден глубокий (до переходного слоя) столб разуплотненного вещества под ней, не имеющий видимой связи с нижней мантией, но все же уходящий глубоко в мезосферу, что позволяет причислить Исландию к плюмам. Ответа о принадлежности других горячих точек к плюмам данная диаграмма не дает.

всем верным. Называются исключения: например, Сибирские траппы; подводное плато Онтонг Джава, траппы Деккана [35, 65]. Правда, наиболее знакомый автору сибирский пример неоднозначен. Нами неоднократно подчеркивалось, что мы имеем дело с гораздо более масштабным Урал-Сибирским суперплюмом, при возникновении которого в начале триаса Урал и Западная Сибирь испытывали существенные поднятия. Что касается КМП Онтонг Джава, то это вулканическое плато возникло изначально на глубоководном океаническом дне, подъем которого не вывел его к уровню моря, и потому мог пройти незамеченным. К тому же показано [23], что воздействие плюма на сложно построенную, слоистую литосферу может иметь неоднозначное поверхностное выражение (например, в виде про-

странственного чередования поднятых и опущенных участков).

4. Представление о том, что плюмы могут служить абсолютными точками отсчета для постоянно перемещающихся литосферных плит, также оказалось неточным. Были описаны смещения верхних частей плюмов относительно нижних по данным томографии [40, 73, 75 и мн. др.]. В ходе палеомагнитных исследований были также выявлены смещения следов плюмов на поверхности, в результате чего их было предложено рассматривать скорее в качестве “плавающих якорей”, чем закрепленных точек отсчета [31]. Существенные смещения мантийных источников ряда вулканических цепей находят палеомагнитное подтверждение также в работах О'Нейла, Б. Штейнбергера и др., [21, 55], хотя данные факты не приводят этих авторов к отрицанию плюмов: масштаб

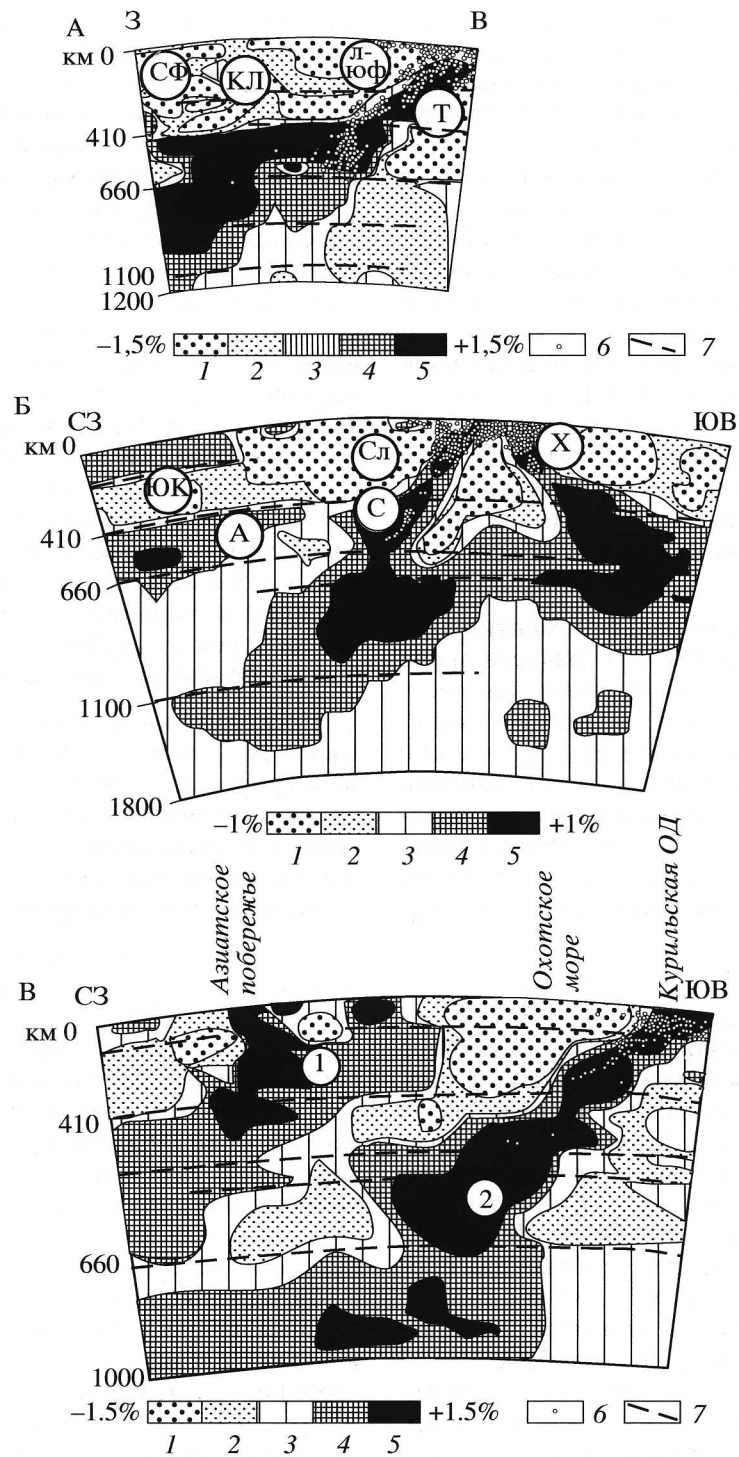


Рис. 8. Мантийная структура активной зоны перехода континент–океан, по данным глубинной сейсмической томографии (продольные волны) (по [20], с изменениями); адаптация по [8].

А, Б – разрезы Западно-Тихоокеанской системы дуг: островная дуга Тонга (А), Сангихе и Хальмахера (Б). 1–5 – участки мантии с различными сейсмическими скоростями: 1, 2 – медленными, 3 – средними, 4, 5 – быстрыми; 6 – очаги землетрясений; 7 – предполагаемые глубинные срывы. Буквами обозначены: зоны субдукции Тонга (Т), Сангихе (С), Хальмахера (Х); фрагменты брошенных зон субдукции Колвилл-Лау (КЛ) (?) миоценового возраста и Калимантан (К) мелового возраста; задуговые бассейны Лау и Южно-Фиджийский (Л-ЮФ), Северо-Фиджийский (СФ), Сулу (Сл), Южно-Китайского моря (ЮК).
 В – Глубинная структура палеозоны (1) и современной (2) зоны субдукции в Курило-Охотском регионе.

таких смещений практически на порядок меньше скорости смещения вулканического следа на поверхности плиты. Результаты сравнения траекторий кажущегося движения полюса (ТКДП) по палеомагнитным данным и данным движений горячих точек говорят о хорошей сходимости их за последние 49 млн. лет и о систематических, увеличивающихся с возрастом отклонениях в более древние эпохи [62]. Более того, сравнение положения горячих точек для Тихого океана относительно плюмов в Атлантическом и Индийском показали их взаимные отклонения при согласованности внутри этих групп [53, 59]. Было выдвинуто [53] положение о трех семействах горячих точек: Тихоокеанского, Индо-Атлантического и Исландского. Как было показано, горячие точки первых двух семейств оставались относительно фиксированными внутри каждого в течение последних 80 млн лет.

5. Оспаривается существование в мантии аномальных температур (до 300–400 градусов выше фоновых), необходимых для выплавления соответствующих магматических пород в “сухих” условиях [11]; наличие таких температур должно было бы выразиться в адекватном повышении теплового потока над активными плюмами, однако этого не наблюдается или, по крайней мере, данное утверждение не опровергнуто. К вопросу о температурах плавления в мантии мы еще вернемся.

6. Наконец, были сделаны попытки (на мой взгляд, откровенно неудачные) найти альтернативное объяснение феномену закономерного омоложения/удревления возрастов вулканов в цепях подводных и надводных гор, относимых за счет деятельности плюмов. Оспаривать наличие значительного количества таких хребтов сейчас невозможно (новейшие сведения о них использованы автором при составлении рис. 2). Необходимость как-то объяснить этот неудобный для противников плюмов факт вернул к жизни полузабытую идею Дж. Дана, – гипотезу бегущей трещины [35, 69]. Казалось бы, наиболее естественный подход к проверке гипотезы бегущей трещины должен был состоять в анализе тех сил, которые движут литосферными плитами и деформируют их. Следовало бы показать, что сложение или трансформация этих сил ведет к растяжению, поперечному к предполагаемой трещине, и соответственно, к вулканической цепи. Однако в наиболее очевидном случае хребта Гавайи–Императорский и других подобных хребтов в Тихом океане, представления о классических силах и деформациях, действующих на тектонические плиты: тяга слэба и откат его шарнира, волочение плиты мантийным потоком, раздвигающие силы

в СОХ (subduction slab pull and rollback, mantle drag and ridge push) – не приводят к представлению о растягивающих напряжениях. Наоборот: как было показано большой группой исследователей [77], максимальный горизонтальный стресс обычно субпараллелен абсолютному направлению движения плит, указывая на то, что силы,двигающие плиту, определяют распределение стресса и внутри ее. Однако в недавно опубликованной работе, посвященной обоснованию механизма бегущей трещины [69], эти соображения не были приняты во внимание. Решалась задача оценки термоэластического стресса, возникающего при остывании Тихоокеанской плиты, которая была представлена в качестве сферической скорлупы. Избавившись от неудобных обстоятельств в виде мощных сил плитного механизма, авторы получили желаемый результат в виде растягивающих сил, приводящих к образованию трещины. В физике нередко приходится отбрасывать второстепенные факторы, чтобы упростить задачу. Однако в данном случае были отброшены главные силы.

Несколько иной подход к объяснению образования регулярных вулканических цепей продемонстрирован в работе [67], где образование таких цепей связывается с перестройками плитных границ, вызывающими условия растяжения. Однако в основе этой концепции лежит то же представление о бегущей трещине.

Добавим, что эта гипотеза, в отличие от плюмовой, не дает удовлетворительного объяснения целому ряду явлений: 1. На морфологию регулярных вулканических цепей не влияет сильнейшая анизотропия океанической, переходной и краевой континентальной коры, пересекаемой цепями вулканов. 2. Сравнивая схему регулярных вулканических цепей со схемой векторов движений литосферных плит (рис. 2, 9), мы видим их поразительное соответствие. Так, вулканические цепи, расположенные по разные стороны Восточно-Тихоокеанского хребта, имеют противоположные направления изменения возраста, как это и должно следовать из рис. 9. Вулканические постройки, расположенные на СОХ (Исландия, Азоры, Галапагос), расщепляются. Вулканические цепи Реюньон и Кергелен пересекли активный СОХ (хр. Карлсберг) и прошли дальше, по другой плите, вследствие того, что сам хребет дрейфует в СВ направлении. Цепи вулканов Кодиак-Боуи и Кобб с одной стороны и Йеллоустон с другой стороны плитной границы ориентированы точь-в-точь по направлению движения вмещающих их плит. Наконец, косая (СВ) ориентировка цепей Св. Елена и Тристан точно совпадает с такой же ориентировкой движения соответствующей плиты. 3. Современные или недавно потух-

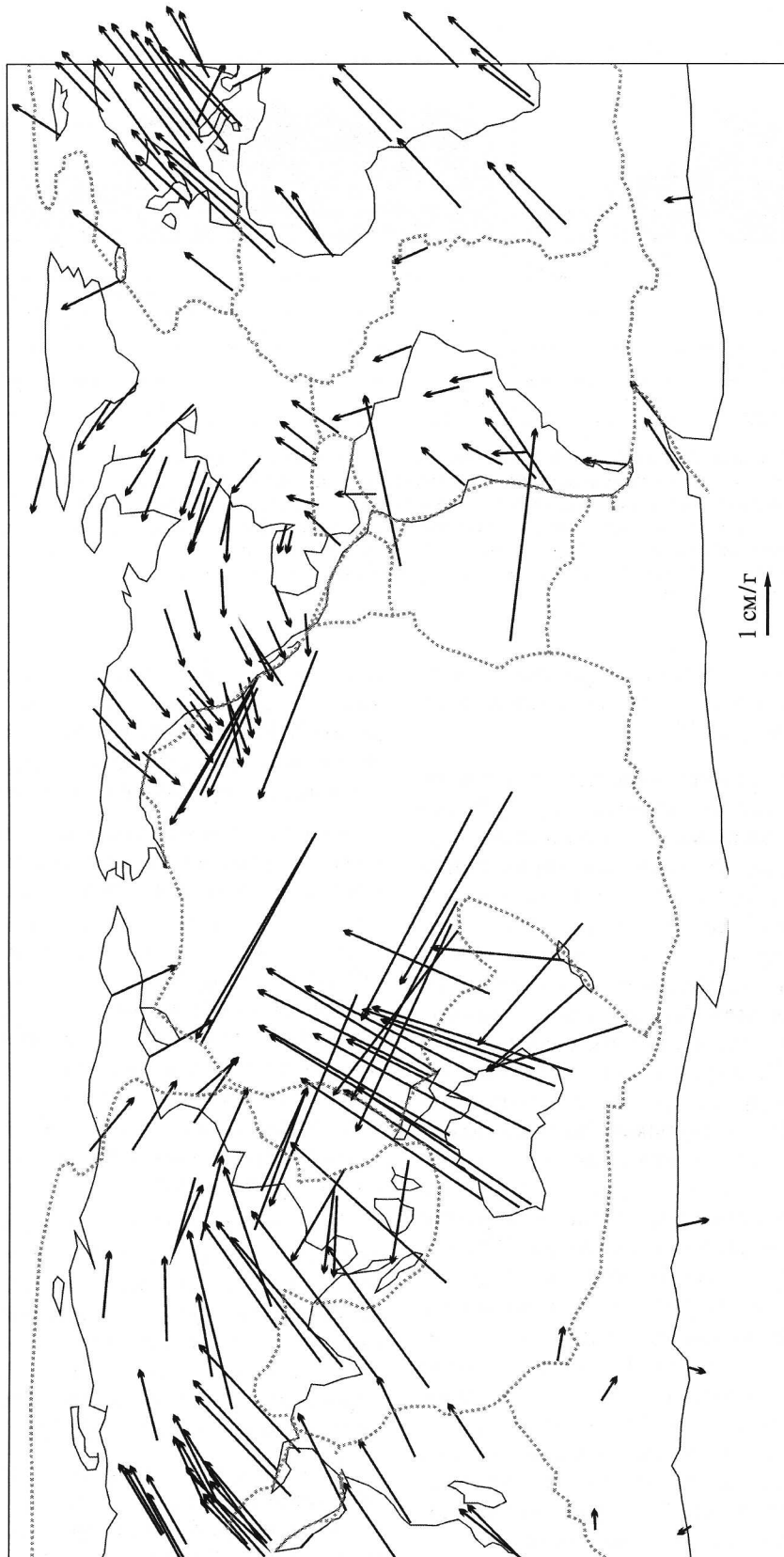


Рис. 9. Схема векторов движения литосферных плит ITRF 2005 (<http://itrf.ensg.ign.fr>). Границы плит показаны серым пунктиром.

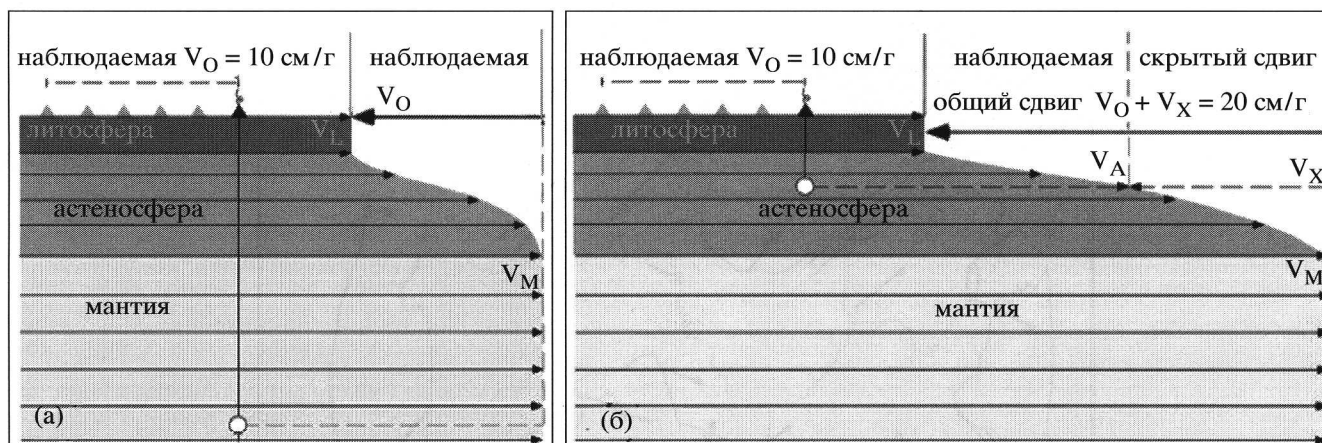


Рис. 10. Попытка объяснения возрастной последовательности вулканов хр. Императорский–Гавайи: “Гавайский вулканический след указывает, что между источником магмы и литосферой нарушена связь. Литосфера движется к ЗСЗ. Существуют две альтернативы: а) если источник находится под астеносферой (например, в подастеносферной мантии), вулканический след регистрирует полный сдвиг между литосферой и мантией; б) в случае, если источник Гавайской горячей точки находится в астеносфере, вулканический след не регистрирует полного сдвига между литосферой и субастеносферной мантией, поскольку часть его осуществляется под источником (глубокий, скрытый сдвиг).” (Doglioni et al., 2005), цит. по [30].

шие головные вулканы почти всех рассматриваемых цепей сосредоточены над суперсвеллами, ближе к их краям (см. рис. 2).

Последний факт устанавливается также и на основании палеомагнитных данных [21, 22]. Было показано, что КМП, возникшие в течение последних 300 млн. лет (т.е., со времени образования Пангеи и ее распада), лежали точно по вертикали над контурами зоны 1% замедления S-волн, окружающих Африканскую и Тихоокеанскую крупнейшие провинции замедленных поперечных волн областей пониженных скоростей на границе ядро–мантия (ЯМГ) или, в случаях Сибирской и Колумбийской КМП, окружающих меньшие по размеру “свеллы”. Крутые градиенты скоростей совпадают с этими 1% контурами. Местоположения 24 наиболее активных вулканических горячих точек совпадают с теми же границами. Таким образом, эти контуры отвечают зонам генерации плюмов (ЗГП). Вертикальная проекция ЗГП отвечает +10м контуру геоида. Регионы с более негативными значениями скоростей, составляющие около 2% общей массы мантии, вероятно, отличаются по составу от остальной мантии. Такую же точку зрения высказывают многие цитированные выше исследователи [1, 38 и др.]. Поскольку КМП возникали на поверхности Земли в течение последних 2.5 млрд. лет, можно предположить, что и “суперсвеллы” с ограничивающими их ЗГП, существовали столь же долго.

В отличие от плюмовой гипотезы, ни гипотеза бегущей трещины, ни другие альтернативные схемы (некоторые мы упомянем ниже) не дают

какого-либо объяснения вышеприведенным фактам. А если так, то зачем “от добра искать добра”? Вспомним бритву Оккама: “*entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*” – “Не умножай количество сущностей сверх необходимого”!

Однако для полноты картины следует упомянуть и другие альтернативы. В частности, были и продолжают попытки объяснить генезис регулярных вулканических цепей с помощью особым образом организованной подлитосферной конвекции – например, связанной с охлаждающим влиянием континентального края [45]. Предлагалась гипотеза мелкокомасштабной ролловой конвекции с удлиненными ячейками, параллельными движению плит [18]. Правда, сами авторы признают, что она годна для объяснения лишь некоторых цепей и (как и предыдущая) не претендует на универсальность.

Другой противник плюмовой теории, Д. Андерсон [15, 16], выдвинул гипотезу дрейфующего очага плавления (*easily melting eclogite “blob”*) в астеносфере, скорость движения которого больше скорости движения коры, но меньше скорости движения подстилающей мантии. Близкая по содержанию гипотеза была представлена в графическом виде в работе [31] (рис. 10).

В этом случае результат и того хуже, чем с “бегущей трещиной”: гипотеза была разработана *ad hoc* для хребта Императорский–Гавайи и пригодна для объяснения генезиса других цепей, удревняющихся в западных румбах. Однако, что касается всех горячих точек в Индийском и восточной части Атлантического океана, то они

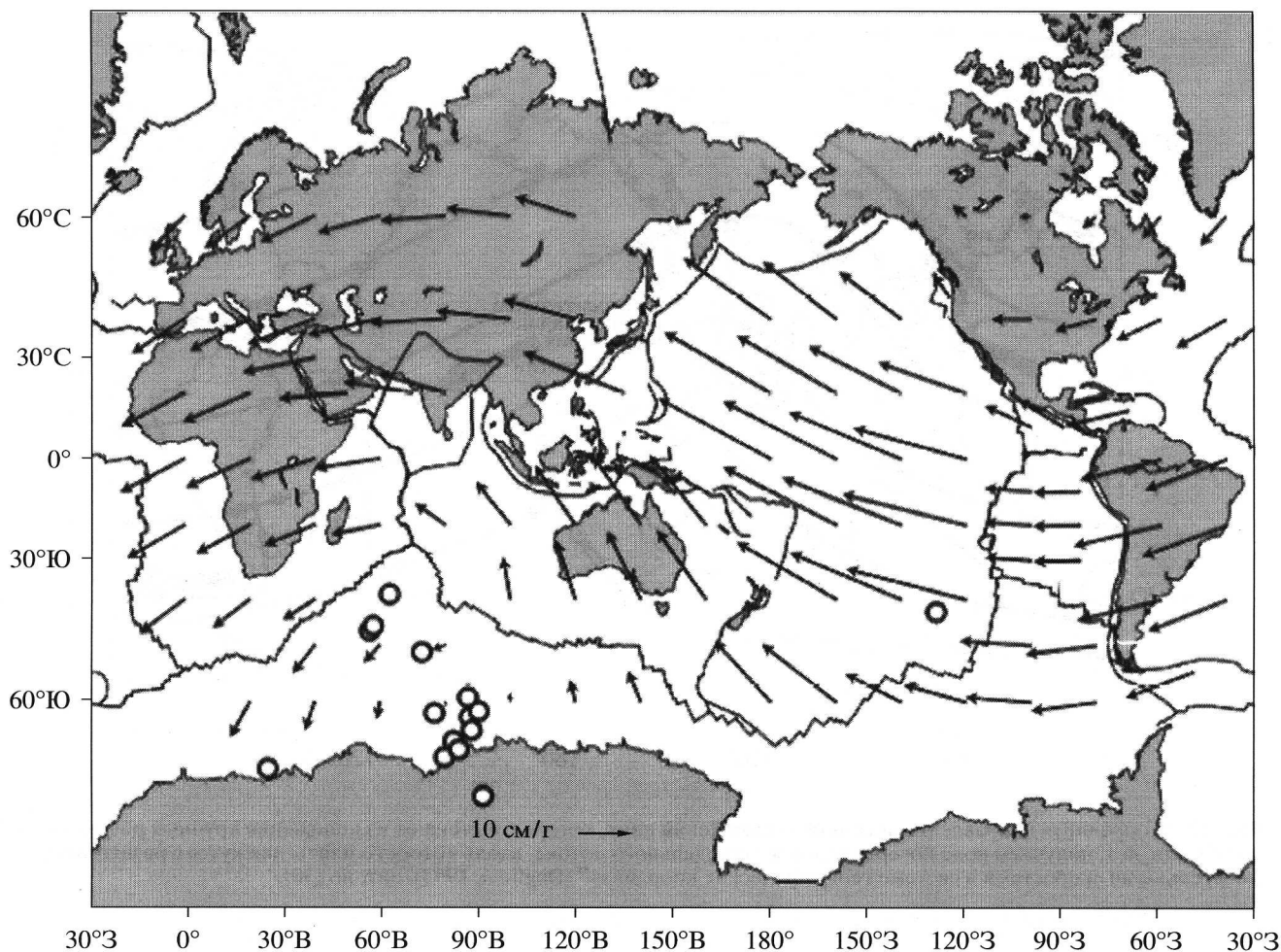


Рис. 11. “Современные скорости плит, пересчитанные из модели относительных движений плит NUVEL1A (DeMets et al., 1990; 1994) при условии, что в качестве системы отсчета берутся неглубокие горячие точки. Отметим, что в этой системе все плиты движутся на восток. Кружками обозначены полюса вращения”, цит. по [30]

удреваются в направлении, прямо противоположном тому, что предсказывает эта гипотеза (не к ЮЗ, а, наоборот, к СВ и В) (рис. 11 и 12; сравнить с рис. 2). Подробнее разбор этой гипотезы дан ранее [10]. Можно также ознакомиться с презентацией автора [58] по докладу на сессии AGU [57] и дискуссией по этому поводу на сайте <http://www.mantleplumes.org>. Отмечу, что дискуссия получилась странная: оппоненты автора ни словом не коснулись тех поразительных соответствий между векторами движения плит и ориентировкой регулярных вулканических поясов, а также совпадения положения молодых вулканов и контуров суперсвеллов, о чем шла речь выше. А ведь в них-то все и дело. Вероятность таких совпадений исчезающе мала.

7. В добавление к этим “разоблачениям”, во многом легко опровергаемым, однако же высветившим важнейшую слабую сторону разви-

вающейся плюм-тектоники (жесткую абсолютизацию предсказуемых признаков плюмов), слабость плюмовой теории проявилась в безбрежном расширении понятия “плюмы”. Его стали использовать для обозначения любого аномального или кажущегося аномальным (по отношению к классической плейт-тектонике) проявлению вулканизма – как глубинного, так и близповерхностного. Естественно, свою дозу критики плюмовая теория получает и от сторонников пассивного механизма рифтогенеза.

Именно пассивный рифтогенез представляет собой частичную альтернативу плюм-тектонике, “оттягивая на себя” малоглубинные проявления вулканизма, связанные с декомпрессией. Примером могут служить рифты Восточной Африки или Байкал.

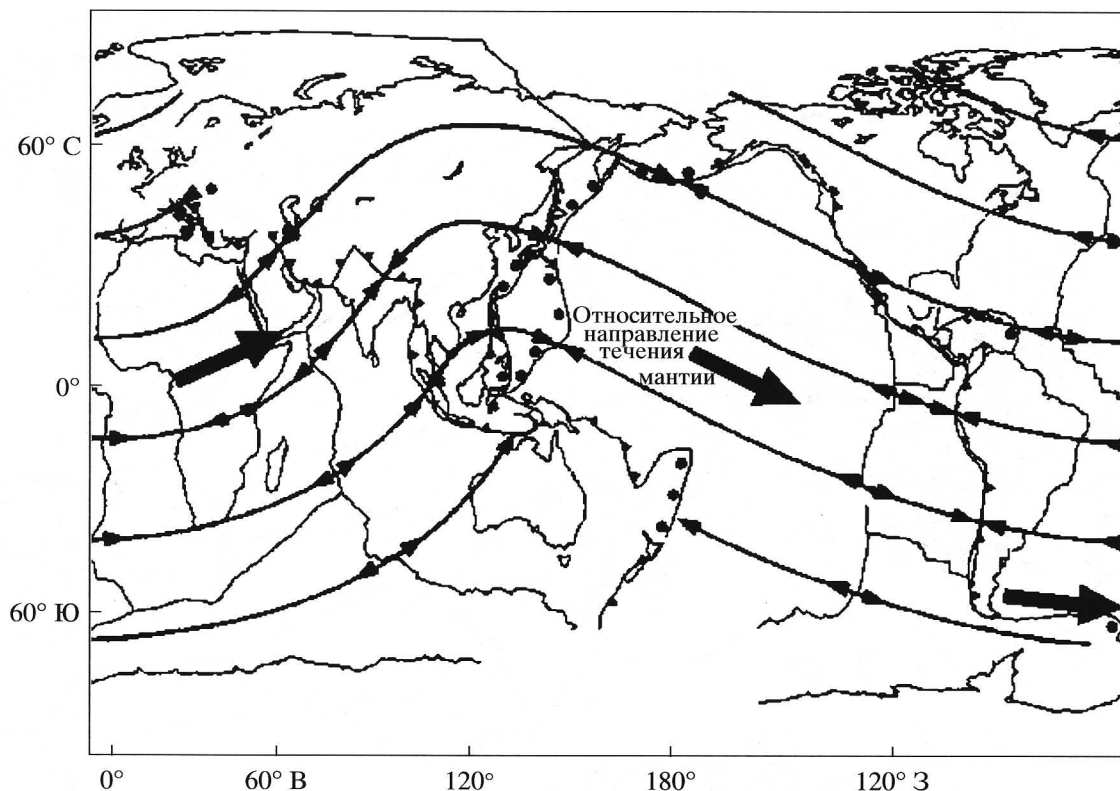


Рис. 12. “Коррелируя направления абсолютных движений плит, которые вытекают из положения крупных рифтовых зон 40 млн. лет, получаем поле когерентного синусоидального потока, вдоль которого плиты движутся с разными относительными скоростями в системе географических координат” (Doglioni, 1993), цит. по [30].

АЛЬТЕРНАТИВЫ ПЛЮМ-ТЕКТОНИКЕ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ЕЕ ПРОТИВНИКАМИ

Возвращаясь к программной статье Дж. Фоулджер [35], отметим, что универсальными условиями образования всех аномалий плавления она (автор) объявляет пассивное растяжение литосферы, декомпрессию и наличие обогащенных участков в верхах мантии и коре, подвергающихся плавлению. По сути дела ею была выбрана модель пассивного рифтогенеза, обусловленного плейт-тектоническими силами во внутриплитном пространстве. Дж. Фоулджер [35] так и называет предлагаемую ей антиплюмовую концепцию – “плитной” моделью происхождения аномалий плавления”. При этом указанная концепция объявляется всеобъемлющей. Здесь вызывает возражение только универсальный подход; остальное вполне разумно. Модель пассивного рифтогенеза неоднократно и вполне плодотворно обсуждалась и в отечественной литературе [6]. В то же время, ее позиционирование как абсолютной альтернативы “активной” модели внутриплитного вулканизма было бы вряд ли оправдано.

Статьи Дж. Фоулджер (цитированная и предыдущие) перекликаются с уже упомянутыми выступлениями Д. Андерсона [15, 16]. Согласно этому исследователю, обогащенные участки мантии, плавление которых не требует экстремально высоких температур, предусматриваемых плюм-тектоникой (см. выше, раздел “антиплюмовое лобби”, пункт 5), представлены преимущественно эклогитами, образующимися при деляминации утолщенной континентальной коры: “Мантия ниже 100 км глубины находится ниже точки плавления сухого перидотита, но ее температура выше точки плавления прошедших рециклинг обогащенных (базальтовых или эклогитовых) компонентов” (рис. 13).

Продуктивность подобного подхода была продемонстрирована в последнее время в статье [68] при объяснении геохимических особенностей гавайских вулканитов. Была предложена модель последовательного плавления в мантии. На глубине около 150 км, в зоне низких сейсмических скоростей, лежащей на глубине 130–170 км (астеносфера?) происходит плавление эклогита (продукта рециклинга литосферы), поднимающегося в центре плюма. Образовавшийся расплав, проса-

чиваясь через вышележащие перидотиты, вступает с ними в реакцию, образуя вторичный (обогащенный) пироксенит. При дальнейшем подъеме плюма происходит плавление пироксенита, а затем и перидотита, и происходит неполное смешение расплавов, что и проявляется в вариациях геохимических особенностей излившихся вулканитов. Единственное, но очень важное отличие этой модели от андерсоновской заключается в том, что она работает именно в воздымающемся мантийном потоке конвектирующей мантии, или, иными словами, в плюме. Более того: без такого потока эклогит не может зависать в астеносфере в течение десятков млн. лет, как это принимается в модели, пытающейся объяснить регулярную возрастную последовательность в вулканических хребтах [30] (см. выше). В коре и верхах мантии габбро имеет плотность 2,87; перидотит – 3,3; эклогит – 3,45. На глубине около 150 км в астеносфере базит (эклогит) будет тонуть, а на глубине менее 50 км превратится в габбро и всплывет к кровле астеносферы.

Подвергая контр-критике концепции противников плюмов, мы не должны забывать, что представления о рециклированных базитах (и, быть может, осадках) в мантии как возможных обогащенных источниках плавления, сами по себе весьма плодотворны. Они, как мы видели, не только открывают новые перспективы в решении вопросов об источниках плавления при образовании вулканитов, принадлежащих плюмам и суперплюмам [68, 74], но и в целом ряде случаев помогают обойтись вообще без представлений о плюмах, предоставляя вполне правдоподобные плейт-тектонические модели – например, в случае пассивного рифтогенеза. Важно, однако, подчеркнуть, что механизм пассивного рифтогенеза неспособен объяснить плавление в средней части астеносферы или в подастеносферном слое: декомпрессия и плавление начинаются немедленно, как только трещина в литосфере достигает астеносферы, и эта трещина не может проникнуть глубже, будь это 30 или 300 км.

Механизм пассивного рифтогенеза – не единственный вне-плюмовый механизм образования вулканических областей. В качестве альтернативы плюмовому механизму приводится пример обширной провинции, охватывающей Прибайкалье, Монголию, Северо-Восточный Китай, Центральную Японию. Под этим регионом в настоящее время методом сейсмотомографии выявлен субгоризонтальный литосферный слэб [75, 78], который не смог (в силу недостаточного удельного веса?) проникнуть ниже фазовой границы верхней и нижней мантии и в настоящее время скользит вдоль нее, вызывая плавление

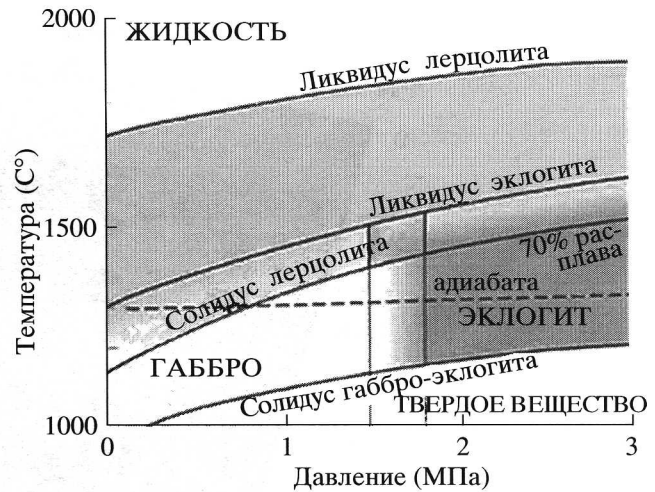


Рис. 13. Сравнение свойств перидолита и базита (габбро-эклогита) при одинаковых P–T-условиях в мантии [16].

вышележащей части мантии, подобной обычному надсубдукционному клину (рис. 14). Этот механизм привлекается некоторыми исследователями и для объяснения древних КМП, в частности Сибирской [42].

ОБСУЖДЕНИЕ ВЫШЕПРИВЕДЕННЫХ ДАННЫХ И НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ

Несмотря на то, что в критике плюмовой концепции содержится много рационального и требующего неперемного учета при дальнейшем развитии системы представлений глобальной геодинамики, абсолютно отрицательная оценка плюм-тектоники представляется неприемлемой. Критики плюм-тектоники так и не смогли привести убедительных аргументов против двух свидетельств существования плюмов:

1. Существование ранжированных по возрасту вулканических цепей. Предлагаемые альтернативные объяснения (бегущая трещина, или же особым образом организованная сублитосферная конвекция – например, горизонтальный противоток в астеносфере, с эклогитовым телом, почему-то надолго, на многие десятки млн. лет зависающим в ней) не могут конкурировать с плюмовой гипотезой, объясняющей не только общее поведение регулярных вулканических цепей, но и многие детали этого поведения, связанные с особенностями движения плит в том или ином конкретном регионе (см. выше).

2. Данные сейсмотомографии, которые указывают на продолжение аномалий, связанных со слэбами и горячими точками, в мезосферу (т.е. под астеносферу) (см. рис. 3, 7, 8). Это однозначно противо-

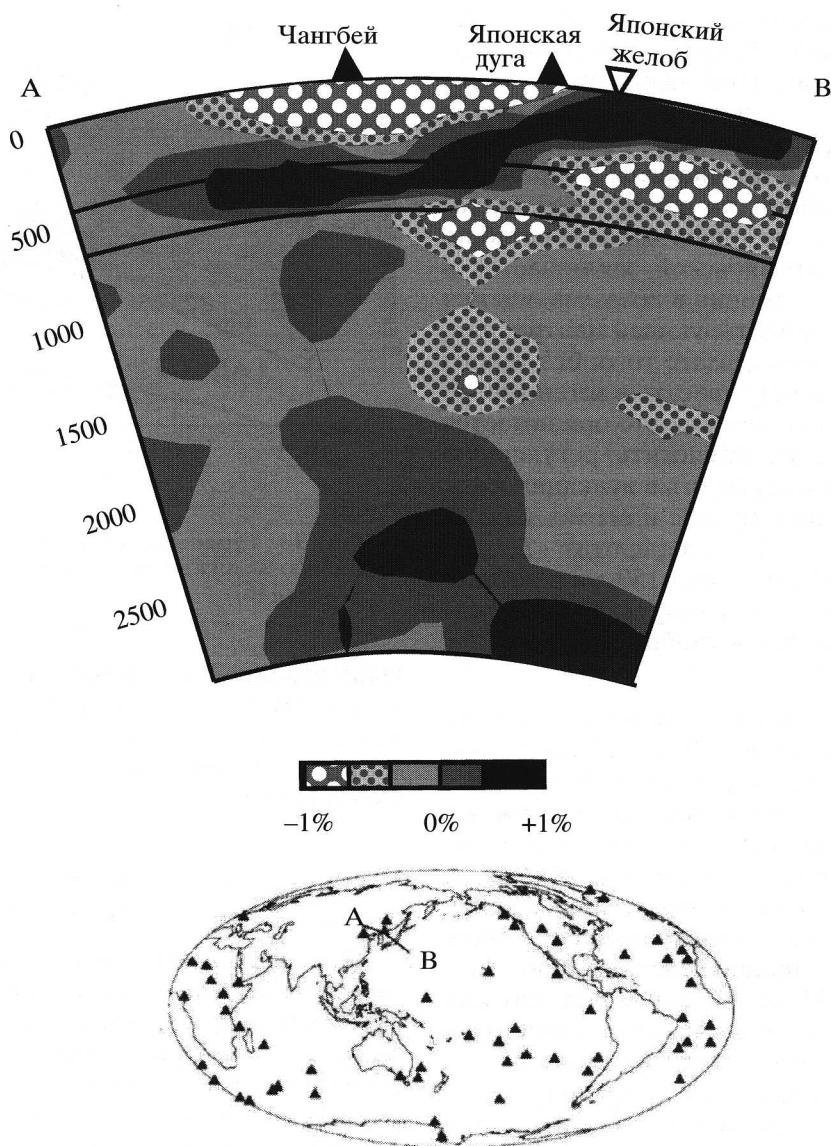


Рис. 14. Вертикальный разрез аномалий скоростей продольных волн по профилю, проходящему через Северо-Восточный Китай и Центральную Японию. Шкала отклонения скоростей от средней величины и положение разреза показаны ниже [75].

речит выводу об универсальности пассивного плейт-тектонического механизма (растяжение–декомпрессия–плавление обогащенного легкоплавкого источника), поскольку он ограничен литосферой и верхней частью астеносферы. Не может быть универсальным, по определению, и объяснение образования КМП исключительно аномальным поведением субдуцирующих слэбов, как в ЮВ Азии (рис. 14), – поскольку томография большинства слэбов как раз свидетельствует об их проникновении в нижнюю мантию (см. рис. 8) [43, 75, 60 и др.].

Итак, сейсмотомографические данные, сведения о КМП и регулярных цепях вулканов, равно

как вышеприведенный сравнительный анализ ориентировки цепей и направления движения литосферных плит, не только подтверждают наличие плюмов по отдельности, но и могут быть увязаны как между собой, так и с другими глобальными явлениями. Попутно отметим намечающуюся связь между эпохами массового формирования КМП, магнитными суперхронами и глобальными изменениями климата [30].

Справедливости ради надо сказать, что данные сейсмотомографии далеко не всегда свидетельствуют о зарождении плюмов на границе ядро–мантия; однако и разрешающая способность этого метода пока еще очень невелика.

Одним из выходов из создавшегося положения многие исследователи считают признание реальной возможности того, что мантийные плюмы могут рождаться на разных уровнях или границах внутри Земли и что существует по крайней мере три их разновидности: первичные (“моргановские”), идущие от низов мантии; промежуточные, рождающиеся в основании переходной зоны, и верхнемантийные (“андерсоновские”), возможно, возникающие в верхах астеносферы как ответ на движения плит [28], (см рис. 6). Можно решать этот вопрос и так. Однако объединение под одним названием похожих по внешним проявлениям, но столь разных по генезису типов вулканизма не является идеальным решением, и как мы видели, вызывает дополнительную критику, когда “с водой выплескивается и ребенок”.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что тектоническая парадигма, которая в идеале могла бы представлять собой гармоничный синтез плит- и плюм-тектоники, еще только создается, а современная геодинамика является достаточно противоречивой, непрерывно развивающейся системой идей, между носителями которых происходит активное и в общем плодотворное выяснение отношений на базе нового фактического материала и новых методических приемов. В конечном итоге, независимо от того, кто побеждает в частном споре, выигрывает наука.

Несмотря на все разногласия, в основе глобальной геодинамической теории по-прежнему будет лежать представление о конвекции, захватывающей как астеносферу, так и более глубокие уровни мантии [4, 7, 9, 12, 13]. Это следует уже непосредственно из сейсмоотографии, и в частности, из вывода о прослеживаемости слэбов океанической литосферы в нижнюю мантию.

Конвекционные модели, разрабатываемые в работах геофизиков, в настоящее время отражают разные стороны вероятного процесса, не охватывая его во всей полноте, и уже потому сильно отличаются друг от друга. Может ли быть построена модель, всесторонне отражающая особенность процесса, покажет будущее.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОНЗ № 6 “Геодинамика и механизмы деформирования литосферы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальшиев С.О., Иванов А.В. Низкоплотностные аномалии в мантии: Восходящие плюмы и/или разогретые литосферные плиты? // Докл. РАН. 2001. Т. 380. № 4. С. 523–527.
2. Белоусов В.В. Основные принципы геотектоники. М.: Недра, 1975. 257 с.
3. Грачев А.Ф. Идентификация мантийных плюмов на основе изучения вещественного состава вулканитов и их изотопно-геохимических характеристик // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 618–654.
4. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: ГЕО, 2001. 409 с.
5. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. 192 с.
6. Леонов Ю.Г. Континентальный рифтогенез: современные представления // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 154–173.
7. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир, 2004. 612 с.
8. Меланхолина Е.Н. Активные зоны перехода континент–океан // Планета Земля, Энциклопедический справочник. Том “Тектоника и геодинамика”. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 2004. С. 274–283.
9. Меланхолина Е.Н., Руженцев С.В., Моссаковский А.А. Развитие глубинных ап- и даунвеллингов и геодинамика Земли // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный Мир, 2001. С. 318–343.
10. Пучков В.Н. Взаимоотношения плюм- и плит-тектоники в перспективе развития глобальной геодинамической теории // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 23–51.
11. Рябчиков Н.Д. Механизмы и условия магнообразования в мантийных плюмах. // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 548–555.
12. Трубицын В.П. Основы тектоники плавающих континентов // Физика Земли. 2000. № 9. С. 3–40.
13. Трубицын В.П. Геодинамическая модель эволюции Тихого океана // Физика Земли. 2006. № 2. С. 3–23.
14. Albaredo F., Kaneoka I. Ghost primordial He and Ne // Goldschmidt Conference Abstracts. 2007. A9.
15. Anderson D.L. Large Igneous Provinces, delamination, and fertile mantle // Elements. 2005. P. 271–275.
16. Anderson D.L. The eclogite engine: chemical geodynamics as a Galileo thermometer // Plates, plumes, and planetary processes. Eds: G.R. Foulger, D.M. Jurdy. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 430, 2007. P. 47–65.
17. Avdeiko G.P., Savelyev D.P. Two types of “intra-plate” lavas on Kamchatka // Problems of sources of deep magmatism and plumes. Petropavlovsk-Kam-

- chatsky–Irkutsk: Glazkovskaya printing House, 2005. P. 229–246.
18. *Ballmer M.D., van Hunen J., Tackley P.J., Bianco T.A.* Non-hotspot volcano chains from small-scale sublithospheric convection (a 3D-numerical study) // *Geophys. Res. Abstracts*. 2008. Vol. 10. EGU2008-A-07167.
 19. *Bryan S.E., Ernst R.E.* Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) // *Earth-Science Reviews*. 2008. Vol. 86. № 1–4. P. 175–202.
 20. *Bijwaard H., Sparkman W., England E.R.* Closing the gap between regional and global travel time tomography // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. № B12. P. 30055–30078.
 21. *Burke K., Steinberger B., Torsvik T.H., Smethurst M.A.* Plume generation zones at the margins of Large Low Shear Velocity Provinces on the core–mantle boundary // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. Vol. 265. № 1–2. P. 49–60.
 22. *Burke K., Torsvik T.H.* Derivation of Large Igneous Provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. 227. P. 531–538.
 23. *Burov E., Guillou-Frottier L.* The plume head–continental lithosphere interaction using a tectonically realistic formulation for the lithosphere // *Geophys. J. Intern.* 2005. Vol. 161. № 2. P. 469–490.
 24. *Campbell I.H.* Large Igneous Provinces and the Mantle Plume Hypothesis // *Elements*. 2005. P. 265–269.
 25. *Clouard V., Bonneville A.* Ages of seamounts, islands, and plateaus on the Pacific plate // Eds. G. Foulger, J. Natland, D. Presnall, D. Anderson. *Plates, plumes and paradigms*. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 388. 2005. P. 71–90.
 26. *Cobbold P.R., Meisling K.E., Mount V.S.* Reactivation of obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil // *AAPG Bull.* 2001. Vol. 85. P. 1925–1944.
 27. *Coffin M.F., Eldholm O.* Large Igneous Provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences // *Reviews of Geophysics*. 1994. Vol. 32. P. 1–36.
 28. *Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J.* Three distinct types of hotspots in the Earth’s mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 205. № 3–4. P. 295–308.
 29. *Courtillot V., Olson P.* Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 260. № 3–4. P. 495–504.
 30. *Cuffaro M., Doglioni C.* Global kinematics in the deep vs shallow hotspot reference frames // *Plates, plumes, and planetary processes*. Eds: G.R. Foulger, D.M. Jurdy. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 430. 2007. P. 359–375.
 31. *Davaille A., Girard F., le Bars M.* How to anchor hotspots in a convecting mantle? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 203. № 2. P. 62–634
 32. *Ernst R., Buchan K.* The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes // *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 352. 2001. P. 247–265.
 33. *Ernst R., Buchan K.* Recognizing mantle plumes in the geological record // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2003. Vol. 31. P. 459–523.
 34. *Ernst R.E., Kenneth L., Buchan, I.H.* Campbell frontiers in Large Igneous Province research // *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 271–297.
 35. *Foulger G.R.* The “Plate” model for the genesis of melting anomalies // *Plates, plumes, and planetary processes*. Eds: G.R. Foulger, D.M. Jurdy. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 430. 2007. P. 1–29.
 36. *Fitton J.G.* The OIB paradox // *Plates, plumes, and planetary processes*. Eds: G.R. Foulger, D.M. Jurdy. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 430. 2007. 998 p.
 37. *Gaina C., Müller R.D., Cande S.C.* // *The history and dynamics of global motions*. AGU Geophysical Monograph. 2000. № 121. P. 339–357.
 38. *Garnero E.J., Lay T., McNamara A.* Implications of lower mantle structural heterogeneity for existence and nature of whole mantle plumes // *Plates, plumes, and planetary processes*. Eds: G.R. Foulger, D.M. Jurdy. *The Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 430. 2007. P. 79–108.
 39. *Geldmacher J., Hoernle K., van der Bogaard P., Duggen S., Werner R.* New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and geochemical data from seamounts in the Canary and Madeira volcanic provinces: Support for the mantle plume hypothesis // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 237. № 1–2. P. 85–101.
 40. *Gorbatov A., Fukao Y., Widiyantoro S., Gordeev E.* Seismic evidence for a mantle plume oceanwards of the Kamchatka–Aleutian trench junction // *Geophys. J. Int.* 2001. Vol. 146. P. 282–288.
 41. *Hart S.R., Coetzee M., Workman R.K., Blusztajn J., Johnson K.T.M., Sinton J.M., Steinberger B., Hawkins J.W.* Genesis of the Western Samoa seamount province: age, geochemical fingerprint and tectonics // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 227. № 1–2. P. 37–56
 42. *Ivanov A.V.* Evaluation of different models for the origin of the Siberian Traps // *Plates, plumes, and planetary processes*. Eds: G.R. Foulger, D.M. Jurdy. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 430. 2007. P. 669–691.
 43. *Karason H., van der Hilst R.D.* Constraints on mantle convection from seismic tomography // *The history and dynamics of global motions*. AGU Geophys. Monograph 2000. № 121. P. 277–288.
 44. *Kerr R.A.* Rising plumes in earth’s mantle: phantom or real? // *Science*. 2006. Vol. 313. P. 1726.
 45. *King S.D., Anderson D.* Edge-driven convection // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. Vol. 160. P. 289–296.
 46. *Lagabrielle Y., Leroy S.* Le visage sous-marin de la Terre. *Elements de géodynamique océanique* // Commission de la Carte Géologique du monde (CCGM), Paris: CNRS, 2005. 49 p.
 47. *Lei J., Zhao D.* A new insight into the Hawaiian plume // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006, Vol. 241. № 3–4. P. 438–453.
 48. *Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Verni-*

- kovsky V.* Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Precam. Res.* 2008. Vol. 160. P. 179–210.
49. *Maruyama S., Santosh M., Zhao D.* Superplume, supercontinent, and post-perovskite: mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core–mantle boundary // *Gondwana Research.* 2007. Vol. 11. P. 7–37.
50. *Meibom A., Anderson D., Sleep N. et al.* Are high $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in oceanic basalts an indicator of deep-mantle plume components? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 208. № 3–4. P. 197–204
51. *Morgan W.J.* Convective plumes in the lower mantle // *Nature.* 1971. Vol. 230. P. 42–43.
52. *Murphy J.B., Hynes A.J., Johnston S.T., Keppie J.D.* Reconstructing the ancestral Yellowstone plume from accreted seamounts and its relationship to flat-slab subduction // *Tectonophysics.* 2003. Vol. 365. P. 185–194.
53. *Norton I.O.* Global hotspot reference frames and Plate motion // *The history and dynamics of global motions.* AGU Geophys. Monograph. 2000. № 121. P. 339–357.
54. *O'Connor J.M., Stoffers P., Wijbrans J.R., Worthington T.J.* Migration of widespread long-lived volcanism across the Galapagos volcanic province: evidence for a broad hotspot melting anomaly? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 263. № 3–4. P. 339–354
55. *O'Neil C.O., Muller D., Steinberger B.* Geodynamic implications of moving Indian Ocean hotspots // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 215. № 1–2. P. 151–168.
56. *O'Neil C., Muller D., Steinberger B.* On the uncertainties in hot spot reconstructions and the significance of moving hot spot reference frames // *G₃ Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2005. Vol. 6. № 4. P. 1–35.
57. *Puchkov V.* On alternative models for the origin of time-progressive volcanic chains // *Geophys. Res. Abstracts.* 2008, Vol. 10. EGU2008-A-01570.
58. *Puchkov V.* On alternative models for the origin of time-progressive volcanic chains // http://www.mantle-plumes.org/Conferences/EGU2008PPPs_Posters.html.
59. *Raymond C.A., Stock J.M., Cande S.C.* Fast Paleogene motion of the Pacific hotspots from revised global plate circuit constraints // *The history and dynamics of global motions.* AGU Geophys. Monograph 2000. № 121. P. 359–375.
60. *Replumaz A., Karason H., van der Hilst R.D., Besse J., Tapponnier P.* 4-D evolution of SE Asia's mantle from geological reconstructions and seismic tomography // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 221. № 1–4. P. 103–115.
61. *Ritsema J., Allen R.M.* The elusive mantle plume // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 207. № 1–4. P. 1–12.
62. *Sager W.W.* Divergence between paleomagnetic and hotspot model predicted polar wander for the Pacific Plate with implications for hotspot fixity frames // *Plates, plumes, and planetary processes.* Eds. G.R. Foulger, D.M. Jurdy. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 430. 2007. P. 335–359.
63. *Saunders A.* Mantle plumes: an alternative to alternative // *Geoscientist.* 2003. Vol. 13. № 9. P. 20–22.
64. *Sengor A.M.C.* Elevation as indicator of mantle-plume activity // *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 352. 2001. P. 183–225.
65. *Sheth H.C.* Plume-related regional pre-volcanic uplift in the Deccan Traps: Absence of evidence, evidence of absence // *Eds. Foulger G.R., Jurdy D. Plates, plumes, and planetary processes.* *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 430. 2007. P. 785–814.
66. *Sleep N.H.* Mantle plumes from top to bottom // *Earth-Science Reviews* 2006. Vol. 77. № 4. P. 231–271.
67. *Smith A.D.* A plate model for Jurassic to Recent intra-plate volcanism in the Pacific Ocean Basin // *Eds. Foulger, G.R., Jurdy D.M. Plates, plumes, and planetary processes.* *Geol. Soc. of Amer. Spec. Paper* 430. 2007. P. 471–497
68. *Sobolev A.V., Hofmann A.W., Sobolev S.V., Nikogosian I.K.* An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts // *Nature.* 2005. Vol. 434. P. 590–597.
69. *Stuart W.D., Foulger G.R., Barall M.* Propagation of the Hawaiian-Emperor volcano chain by Pacific plate cooling stress. // *Eds. Foulger G.R., Jurdy D.M. Plates, plumes, and planetary processes.* *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 430. 2007. P. 497–507.
70. *To Akiko, Romanowicz B., Capdeville Y., Takeuchi N.* 3D effects of sharp boundaries at the borders of the African and Pacific Superplumes: observation and modeling // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 233. № 1–2. P. 137–153.
71. *Wilson J.T.* A possible origin of Hawaiian islands // *Can. J. Phys.* 1963. Vol. 41. P. 863–866.
72. *Wolbern I., Jacob A.W.B., Blake T.A., Kind R., Li X., X. Yuan, Duennebier F., Weber M.* Deep origin of the Hawaiian tilted plume conduit derived from receiver functions // *Geophys. J. Intern.* 2006. Vol. 166. № 2. P. 767–781 .
73. *Yang Shen, Solomon S.C., Bjarnason I.T. et al.* Seismic evidence for a tilted mantle plume and north-south mantle flow beneath Iceland // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 197. № 3–4. P. 261–272.
74. *Yaxley G.M., Sobolev A.V.* High-pressure partial melting of gabbro and its role in the Hawaiian magma source // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2007. DOI 10.1007/s00410-007-0198-4.
75. *Zhao D.* Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2004. Vol. 146. P. 3–34.
76. *Zindler A., Hart S.* Chemical geodynamics // *Ann. Rev. Planet. Sci.* 1986. Vol. 14. P. 493–571.
77. *Zoback M.L., Zoback M.D., Adams J. et al.* Global patterns of tectonic stress // *Nature.* 1989. Vol. 34. P. 291–298.
78. *Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., Kozhevnikov V.M., Rasskazov S.V., Ivanov A.I.* The nature of Cenozoic upper mantle plumes in East Siberia (Russia) and Central Mongolia // *Russian Geology and Geophysics.* 2006. Vol. 47. № 10. P. 1056–1070.

Рецензенты: В.И. Коваленко, В.Е. Хаин

The Controversy over Plumes: Who is Actually Right?

V. N. Puchkov

Institute of Geology, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences, ul. K. Marksa 16/2, Ufa, 450000, Russia
e-mail: puchkov@anrb.ru

Received February 5, 2008

Abstract—The current state of the theory of mantle plumes and its relation to classic plate tectonics show that the “plume” line of geodynamic research is in a period of serious crisis. The number of publications criticizing this concept is steadily increasing. The initial suggestions of plumes' advocates are disputed, and not without grounds. Questions have been raised as to whether all plumes are derived from the mantle–core interface; whether they all have a wide head and a narrow tail; whether they are always accompanied by uplifting of the Earth's surface; and whether they can be reliably identified by geochemical signatures, e.g., by the helium-isotope ratio. Rather convincing evidence indicates that plumes cannot be regarded as a strictly fixed reference frame for moving lithospheric plates. More generally, the very existence of plumes has become the subject of debate. Alternative ideas contend that all plumes, or hot spots, are directly related to plate-tectonic mechanisms and appear as a result of shallow tectonic stress, subsequent decompression, and melting of the mantle enriched in basaltic material. Attempts have been made to explain the regular variation in age of volcanoes in ocean ridges by the running fracture mechanism or by drift of melted segregations of enriched mantle in a nearly horizontal asthenospheric flow. In the author's opinion, the crisis may be overcome by returning to the beginnings of the plume concept and by providing an adequate specification of plume attributes. Only mantle flows with sources situated below the asthenosphere should be referred to as plumes. These flows are not directly related to such plate-tectonic mechanisms as passive rifting and decompression melting in the upper asthenosphere and are marked by time-progressive volcanic chains; their subasthenospheric roots are detected in seismic tomographic images. Such plumes are mostly located at the margins of superswells, regions of attenuation of seismic waves at the mantle–core interface.