



УДК 551.21+551.248.2

Перепутье геодинамики: гипотеза литосферных плит против гипотезы мантийных плюмов

С. В. Рассказов (rassk@crust.irk.ru)

Аннотация. Книга Ж. Р. Фулджер «Плиты против плюмов: геологическая полемика» поднимает важный вопрос о степени обоснованности гипотезы нижнемантийного происхождения плюмов, которые, как предполагается, порождают внутриплитный магматизм. В отличие от постулатов гипотезы плитной тектоники, постулаты гипотезы плюмов не подтверждаются геологическими наблюдениями. Распространение внутриплитного вулканизма находит удовлетворительное объяснение моделями растяжения литосферы и локальной верхнемантийной конвекции.

Ключевые слова: геодинамика, плитная тектоника, плюмы, внутриплитный вулканизм.

Введение

В 2010 г. вышел в свет учебник Ж. Р. Фулджер «Plates vs. Plumes: A Geological Controversy» (Плиты против плюмов: геологическая полемика) [15]. Книга рассчитана на продвинутого студента Университета Дарэма, Великобритания, интересующегося современным состоянием геологической науки. Критический анализ этого нового учебника, полезный для англо-говорящего студента, был опубликован нами в журнале «Geodynamics & Tectonophysics» [24]. Важность поднятых в книге вопросов заставила меня, однако, снова вернуться к содержанию книги и подготовить новый расширенный вариант ее обзора, который должен помочь сориентироваться в текущем переплетении геодинамических гипотез студенту геологической специальности российского вуза.

Геодинамика – наука о глубинных силах и процессах, возникающих в результате эволюции Земли как планеты и определяющих движение масс вещества и энергии внутри Земли и в её внешних твёрдых оболочках. Как преподнести студенту современное понимание геодинамики? Вопрос может показаться риторическим, ибо правильный ответ на него непременно должен звучать так: «Нужно дать студенту новейшие знания, принятые геологической общественностью с позиций здравого смысла». В новом учебнике Ж. Р. Фулджер утверждает, что постулаты плюмовой гипотезы, введенной в использование с позиций здравого смысла, воплощенного в «главном потоке геологии» (mainstream geology), не подкреплены научной аргументацией. В некоторой степени такое утверждение изначально звучит парадоксально, поскольку модели современной кинематики плит основываются на вулканических прогрессиях горячих пятен и считается, что сме-

шение вулканизма хорошо согласуется с движениями плит, по крайней мере, во временном интервале последних 3 млн лет [16]. В книге, с одной стороны, выступают построения тектоники плит, с другой – построения, предполагающие участие в глубинной динамике Земли восходящих мантийных струй (плюмов). Полемический прием книги оправдан тем, что в обеих гипотезах используются одни и те же объекты, подходы и методы. Студенту предлагается самому разобраться в степени их обоснованности.

Развитие естественных наук нередко переходит в плоскость повторяющихся описаний, которые с течением времени множатся без каких-либо прорывов и потрясений. К примеру, концептуальные основы геоморфологии, заложенные Вальтером Пенком в начале 20-го столетия преимущественно по объектам Европы [2], в дальнейшем служили для систематизации знаний о развитии рельефа разных территорий Мира. Многочисленные описательные геоморфологические этюды не меняли изначально принятые постулаты. Несколько иначе обстоит дело в областях знаний, в которых новые фактические материалы вступают в противоречия с *mainstream geology*. Точка зрения лорда Кельвина на физическую природу остывающей Земли затормозила развитие геологии на 50 лет, а с открытием радиоактивности утратила значение «здорового смысла». Гипотезы геосинклиналей и «холодной ранней Земли», казалось бы, остались в прошлом, но по-прежнему находят фрагментарное отражение в текущих геологических изданиях.

Новые подходы и идеи часто не принимались геологической общественностью. Не сразу вошли в категорию *mainstream geology* идеи Альфреда Вегенера. А плюмовая гипотеза У. Дж. Моргана [19] оказалась принятой для всеобщего употребления удивительно быстро (рис. 1). В ней было постулировано существование современного подъема вещества от глубокой части мантийной геосферы (ее нижнего термального граничного слоя) до поверхности Земли. Во многих работах плюмовый механизм стал рассматриваться в качестве универсального для объяснения любого внутриплитного вулканизма. Тонкость построений заключалась в том, что поскольку аргументация поступления вещества из верхней мантии не вызывала сомнений, его подъем с больших мантийных глубин аргументации уже не требовал, а принимался в качестве аксиомы.

В предисловии и анонсе к книге перед читателем открывается профессиональное кредо ее автора – Жиллиан Р. Фулджер, профессора геофизики. Ее сомнения в отношении плюмовой гипотезы порождены личным опытом сейсмологических работ в Исландии. Она предприняла систематические исследования плюмовой проблемы, организовала сайт www.mantleplumes.org, соединив в нем публикации о достоинствах и недостатках гипотезы, подготовила тематические сборники статей: *Plates, plumes, and paradigms* [21] и *Plates, plumes, and planetary processes* [22]. В 2007 и 2008 гг. Фулджер организовала специальную секцию «Melting anomalies» (Расплавные аномалии) в рамках сессий Генеральной ассамблеи Европейского союза геологических наук в Вене. В 2005 г. ее усилия по организации дискуссии проблемы плюмов были отмечены медалью Королевского астрономического общества Великобритании.

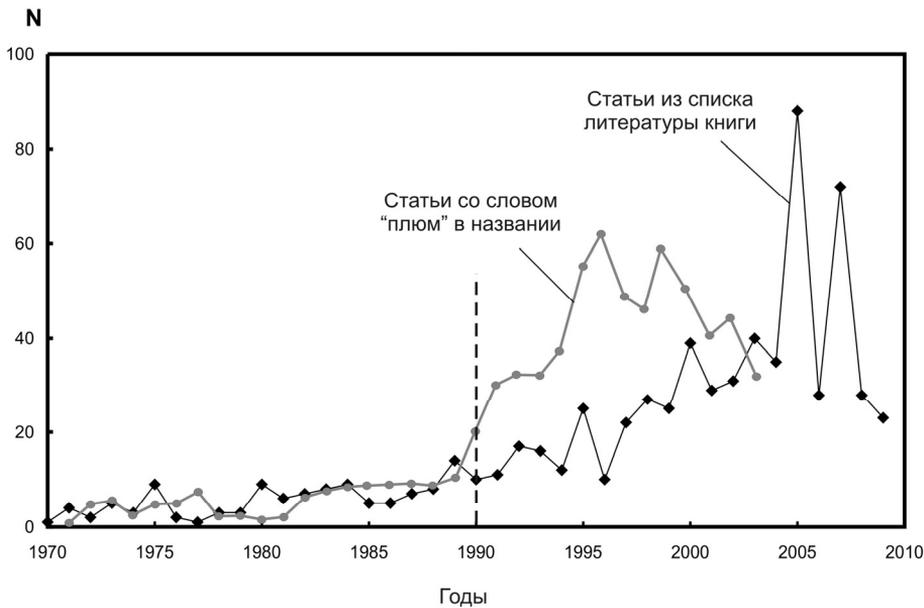


Рис. 1. Сопоставление по годам вариационных линий N – числа опубликованных работ по плюмовой тематике и числа статей (всего 699 наименований), цитированных в книге Ж. Р. Фулджер.

Штриховой вертикальной линией 1990 г. отмечено заметное возрастание количества публикаций по плюмам. Количество статей списка цитированной литературы книги в это время последовательно повышается и дает максимумы 2005 и 2007 гг. благодаря опубликованным сборникам статей: *Plates, plumes, and paradigms* и *Plates, plumes, and planetary processes*. Таким образом, книга подготовлена по опубликованным работам главным образом двух последних десятилетий. Вариационная линия числа статей со словом «плюм» в названии приведена по рис. 1.8 книги Ж. Р. Фулджер, по данным GeoRef data base

Учебник представляет собой взгляд геофизика на проблему литосферных плит и плюмов с анализом данных геофизического, геологического, геохронологического, геохимического и петрологического содержания. Обширный список литературы книги имеет ограничения по национальному признаку. К примеру, из 699 литературных источников в нем насчитывается только десять, опубликованных российскими авторами. Другое ограничение книги касается выбора объектов. Основное внимание в ней уделено Исландии и Гавайям, считающимися классическим вулканическим воплощением плюмовой динамики, но как следует из выполненного анализа, в сущности, представляющими собой уникальные расплавные аномалии Земли. Для развития курса лекций в Иркутском госуниверситете нам была небезынтересна оценка проблемы по областям континентального рифтогенеза Азии и в сравнительном плане – Восточной Африки и Северной Америки.

Мы должны отметить, что книга хорошо иллюстрирована и отличается ясным изложением точки зрения автора. В восьми разделах содержатся: введение, предсказания плюмовой и плитной гипотез, наблюдения и обсужде-

ния результатов. Перед прочтением очередного раздела было полезно заглянуть сначала в перечень упражнений для студента, звучавших большей частью неожиданно и нередко ставивших в тупик. Что представляет собой «нормальный» и «аномальный» вулканизм? Может ли ответить на этот вопрос обычный вулканолог? Да, если прочтет соответствующий раздел книги.

От плитной тектоники к плюмам и назад

В начале вводного раздела «From plate tectonics to plumes and back again» подчеркивается исключительность вулканизма как отражения глубинных процессов Земли, а в конце студенту предлагается 6 упражнений. Ни одно из них не претендует на осмысление соотношений сравниваемых гипотез. Основная коллизия между ними еще впереди, поэтому преподаватель пока щадит студента.

При чтении вводного раздела студент почерпнет общие сведения о происхождении вулканов. Наши современные представления о их природе были заложены прежде всего в книге А. Вегенера (1880–1930 гг.) «Die Entstehung der Kontinente und Ozeane» (Происхождение континентов и океанов), впервые опубликованной в 1915 г. Идея о расхождении континентов в то время уже не была новой, новым оказался подход А. Вегенера. Он собрал воедино междисциплинарные наблюдения, свидетельствующие в пользу раскола континентов, развил идеи о механизме континентального дрейфа и обеспечивающих его силах и дал название Пангея (земля всех) великому исходному суперконтиненту. В результате была создана главенствующая в настоящее время геологическая парадигма плитной тектоники.

Серьезную проблему в построениях А. Вегенера составляла неопределенность судьбы океанической коры. Ее решение было предложено Артуром Холмсом (1890–1965 гг.), который в 1929 г. предположил, что континенты движутся подкоровыми конвективными течениями и высказал идею о рециклировании коры у краев континентов посредством ее превращения в эклогит при гравитационном погружении. Эта модель во многом похожа на современную плито-тектоническую концепцию субдукции.

Только через полвека после публикации книги А. Вегенера гипотеза континентального дрейфа была наконец принята «главным потоком геологии». Ее окончательное признание произошло, когда были получены независимые палеомагнитные данные о симметричном распределении прямой и обратной намагниченности пород, слагающих дно океана с обеих сторон срединно-океанических хребтов. Был заложен «краевой камень» о жестких плитах, смещающихся относительно друг друга.

В рамках гипотезы тектоники плит было определено место для 90 % всего вулканизма Земли, обусловленного процессами на границах плит – в срединных океанических хребтах и субдукционных зонах. Стало ясно, что часть вулканизма аномальна и не вписывается в общую картину. Особенно выделялся о. Гавайи и связанная с ним цепь островов, известная с работ Джеймса Двайт Дана (1813–1895 гг.) как прогрессирующая во времени. В

1963 г. Дж. Тузо Вилсон предположил, что Гавайский архипелаг образовался при движении дна Тихого океана над горячей областью мантии. Через восемь лет в журнале «Nature» была опубликована плюмовая гипотеза У. Джесона Моргана [19], который выделил на Земле около 20 «горячих пятен» (hot spots). Он выдвинул гипотезу о том, что горячие пятна подпитывались струями (плюмами), поднимавшимися с больших глубин мантии.

Первоначально плюмовая гипотеза была основана на шести постулатах (предсказаниях): 1) плюмы фиксированы в пространстве один относительно другого, 2) из них испускаются временные прогрессии вулканических цепей, 3) их корни находятся в глубокой мантии, откуда они переносят вверх первичную мантию, 4) они разламывают континенты, 5) они двигают плиты и 6) они являются горячими. Количество публикаций по плюмам резко возросло в начале 1990-х гг.¹ (рис. 1).

С течением времени начальная плюмовая гипотеза претерпевала изменения. Современная стандартная плюмовая модель предполагает 5 основных предсказаний: 1) сводовое поднятие, предшествующее вулканизму, 2) извержение флуд-базальтов, 3) наличие узкого проводящего канала до коромантийной границы, 4) временная прогрессия вулканической цепи и 5) высокие температуры в магматическом источнике. Для определения проводников, протягивающихся под расплавленными аномалиями от границы ядро–мантия, может использоваться в настоящее время единственный метод – сейсмологический.

В течение двух десятилетий после появления плюмовой гипотезы обсуждались и альтернативные факторы, вызывающие внутриплитный вулканизм, такие как распространяющиеся разрывы, внутренняя деформация литосферной плиты, мембранная тектоника, самопертурбирующая вулканическая цепь, рециклированные субдуцированные слэбы и раскол континента (propagating cracks, internal plate deformation, membrane tectonics, self-perpetuating volcanic chains, recycled subducted slabs and continental breakup). Ж. Р. Фулджер констатирует, что плюмовая гипотеза дала чрезмерно упрощенный вариант природных процессов, поэтому новая информация по конкретным территориям привела к отрицанию ее основных предсказаний. Проявления внутриплитного вулканизма нашли более удовлетворительное объяснение моделями растяжения литосферы и локальной верхнемантийной конвекции.

Важнейший постулат плюмовой гипотезы, допускающий высокие температуры в магматическом источнике, соблюдается только на Гавайях. Ж. Р. Фулджер ставит под сомнение употребление термина «hot spot» (горячее пятно), введенного Дж. Т. Уилсоном еще до появления плюмовой

¹ В это время нами были впервые получены геохронологические данные о последовательном смещении позднекайнозойского вулканизма в Восточном Саяне в направлении с востока на запад. Этот факт был истолкован как свидетельство движения литосферной плиты над мантийной струей в восточном направлении в последние 21 млн лет со средней скоростью 0,8 см год⁻¹ [3].

гипотезы и предлагает заменить его нейтральным термином «melting anomaly» (расплавная аномалия)¹.

Каталог, состоящий из 50 современных расплавных аномалий с табулированием плюмовых критериев [13], начинается с Афарской аномалии, обладающей четырьмя из пяти плюмовых признаков. Вулканические объекты Азии в каталог не включены². В Северной Америке фигурируют расплавные аномалии Йелоустон и Рэйтон. Первая обладает временной прогрессией кальдер, объясняющейся плюмовой моделью³ [19]. Вторая является частью линеамента Хемез, не обнаруживающего временной прогрессии, поэтому никогда не рассматривалась с позиций плюмовой модели.

Подобно гипотезе плюмов, оригинальная гипотеза плитной тектоники с течением времени также претерпевала модификации. Неоднократно уточнялось положение межплитных границ. Стало ясно, что литосферные плиты не обладают жесткостью. Понимание термина «межплитная граница» стало неопределенным⁴. Дискутировались альтернативные модели плитной тектоники [17 и др.], многие годы постоянно действовала секция Международного геологического конгресса по альтернативным моделям. Тем не менее, тектоника плит в общем достаточно успешно используется для интерпретации разноплановых геологических фактов. Степень ее обоснованности оттеняет в сравнительном плане несостоятельность построений плюмовой гипотезы.

Вертикальные движения

С самого зарождения геологии как науки вертикальные движения воспринимались в качестве основной причины образования горных хребтов и накопления мощных толщ осадочных отложений. Первоначально движения объяснялись в рамках геосинклинальной гипотезы раннего прогибания бассейнов и более позднего горообразования вследствие сжатия. В качестве причины вертикальных движений рассматривался и диапиризм, например, вследствие образования соляных куполов. Поднятия и опускания коры объяснялись взаимодействием диапиров с земной поверхностью, а латеральные движения – гравитационным соскальзыванием блоков коры от поднятых областей к опущенным.

¹ На отсутствие аномально-высоких температур в «горячих пятнах» и ранее уже обращалось внимание. Например, известным экспериментатором Д. Х. Грином область внутриплитного вулканизма рассматривалась как «wet anomaly» (мокрая аномалия).

² Анализ вулканизма Центральной Монголии по плюмовым критериям, использованным К. Куртгий и др., показал наличие только одного из них – общего пространственного смещения вулканизма с юга на север [8].

³ Осталось непонятным, почему низкоскоростные аномалии фиксируются в настоящее время вдоль всего вулканического следа плюма? [20]. Пространственные соотношения этого вулканического следа с С-образным поднятием горных хребтов подобны соотношениям позднекайнозойского вулканического следа и С-образного поднятия горных хребтов Восточного Саяна в Сибири [4, 23].

⁴ К примеру, на территории Азии выделялись микроплиты [26], а подвижные системы разделялись на орогенные и рифтовые [5].

Принципы диапиризма использовались в плюмовой гипотезе; поднятие ассоциировалось с прибытием головной части плюма под основание литосферы, что обеспечивало в конечном итоге раскол континента. В плитной тектонике предлагались альтернативные модели вертикальных движений, дополняющие процессы, связанные с процессами первого порядка – расколом континентов и коллизией. В книге подчеркивается, что процессы внутриплитного растяжения и катастрофического утонения литосферы неплохо согласуются с пространственными и временными случаями поднятий и опусканий, существенно отличающихся друг от друга и от случаев, предсказанных плюмовой гипотезой. Образование последних нередко необъяснимо с точки зрения плюмовой динамики, особенно если поднятия находятся в областях, расположенных вне распространения флуд-базальтов.

Раздел «Vertical motions» предваряется эпиграфом Козьмы Пруткова: «Если на клетке с тигром написано слон, не верь глазам своим». Смысл эпиграфа становится ясным в конце раздела при обращении к 19 упражнениям для студента. Общий характер имеют только 7 из них. Упражнение № 7 касается Азии. Студенту предлагается развить плитную модель для флуд-базальтов Эмейшаня (Китай). В тексте книги находим, что самые ранние базальтовые извержения Эмейшаня происходили около 260 млн лет назад в малоглубинном морском бассейне на активной карбонатной платформе. Данные о местном размыве платформы перед извержениями расценены как недостоверные. Поскольку размыва не было, отсутствовало поднятие территории, которое служит одним из основных признаков динамической активности плюма. Чтобы достичь понимания роли магматических процессов Эмейшаня в комплексе пермо-триасовых событий¹ студенту, очевидно, требуется самостоятельная работа с литературными источниками по этой проблеме с выходом на место эмейшанских процессов в распаде Вегенеровской Пангеи.

Три других упражнения из круга наших континентальных интересов находятся в списке упражнений под № 12, 15 и 16. Что послужило причиной поднятия плато Колорадо? Могут ли вертикальные движения Красноморско-Африкано-Аравийского региона относиться в счет разрыва континента? Каковы временные соотношения поднятия, вулканизма и рифтогенеза в Афарском регионе?

Остановимся на плато Колорадо – регионе Скалистых гор, который в позднем мелу находился на уровне моря. На его территории отлагались малоглубинные морские осадки. В настоящее время эти осадки подняты на отметки >2 км над уровнем моря. Плато имеет глубоко эродированную поверхность. Поднятие было в основном амагматичным. Что же его вызвало? Предполагается, что его неизостатический подъем обусловлен ларамийской орогией, имевшей место 80–40 млн лет назад и связанной с перестройкой межплитных границ к западу от плато. Субдукционная зона сме-

¹ См. обзор проблемы пермо-триасовой границы в монографиях [7; 25].

нилась трансформной. Констатируется, что 400 м поднятия приходится на эффект быстрой эрозии, превышающей осадконакопление, и 300 м – на изостатическое поднятие.

Вулканизм, временные прогрессии и относительная фиксированность расплавных аномалий

Раздел «Volcanism» сводится к 21 упражнению для студента, 8 из которых – общие, а 7 – относятся к Исландии. Упражнение № 20 касается избыточного вулканизма в Афарском тройном сочленении. В раздел «Time progressions and relative fixity of melting anomalies» включено 8 упражнений, 4 из которых имеют общий характер, а 4 других касаются Тихоокеанского региона. Приведены данные только по наиболее выраженным прогрессиям вулканических цепей.

Эволюция вулканизма в рифтовых структурах Африки, Азии и Северной Америки осталась вне круга обсуждаемых проблем¹. В разделе дан обзор по крупным магматическим провинциям, соотношениям эцлогитового и перидотитового источников флуд-базальтов и другим вопросам. Материалы этого раздела тесно переплетаются с материалами, приведенными в других разделах и дополняют их.

Данные по областям со сложным пространственно-временным распределением вулканизма в Азии, Северо-Восточной Африке и Северной Америке ограничены ссылками на работы, помещенными на сайте www.mantleplumes.org. Между тем эти данные нельзя признать полными. В Центральной Азии было давно установлено смещение вулканизма позднего мела и кайнозоя Центральной Монголии в направлении с юга на север [1]. Эта временная вулканическая прогрессия была генерализована для обозначения сложных движений литосферы над мантийным плюмом [12]. Дополнительные геохронометрические работы показали, однако, что вулканизм имел место одновременно вдоль зон протяженностью до 500 км [25]. Вулканизм таких зон вряд ли может сопоставляться с океаническими временными прогрессиями вулканических цепей.

В рамках плюмовой модели переход от крупной трапповой провинции к линейной цепи вулканов объясняется переходом активности от широкой головной части плюма диаметром порядка 2000 км, расплуснутой под основанием литосферы, к перехватывающей ее плюмовой колонне диаметром 100–200 км. В каталоге К. Куртийо и др. [13] из 50 наиболее часто упоминаемых горячих пятен Земли такие соотношения имеют место только в трех случаях: плато Декан – Реюньон, Парана – Етендека – Тристан и плато Онтонг Джава – Луизвиль. Последний случай вызывает сомнения, и остаются только два случая перехода от крупной трапповой провинции к линейной цепи вулканов. Эти случаи скорее отражают исключительные ситуации, чем основополагающее правило плюмовой модели.

¹ В эволюции вулканизма рифтов Байкала, Рио-Гранде и Восточной Африки выявляются и сходства, и отличия [6; 9; 25].

Сейсмология

Раздел «Seismology» предваряется словами Конфуция «Мудрые люди честны в отношении того, что они знают и чего не знают». Эти слова относятся, прежде всего, к самой Ж. Р. Фулджер как к эксперту, глубоко понимающему современные возможности и ограничения сейсмологических методов. Модели глубинного строения и плюмов, разработанные с использованием других геофизических методов (например, гравиметрического или магнитотеллурического) в книге почти не обсуждаются.

Основное содержание раздела – одного из наиболее ценных в этой книге – составляют подходы к идентификации расплавных аномалий по сейсмическим скоростям и определению достоверности переходов от них к плюмам как неким субстанциям, расположенным под низкоскоростными аномалиями. В завершении раздела студенту предлагается 18 упражнений, 11 из которых – общие. Два упражнения сформулированы для Северной Америки: 1) Если бы низкотемпературная сейсмическая аномалия под Йелоустонским регионом была интерпретирована исключительно как температурная, как бы снижение температуры менялось по всему телу? 2) Какова настоящая глубина распространения низкоскоростной сейсмической аномалии, наклоненной из-под Йелоустона к северу?

По данным сейсмической томографии, диагностика мантийного плюма осуществляется по низким скоростям в ее переходной зоне, на глубине порядка 500 км [13]. Иногда определяется снижение скоростей с двусторонним утонением переходной зоны. Например, такое снижение регистрируется под Западной Европой в связи с активностью «малого Эйфельского плюма», представленного выходами вулканических пород на площади 600 км² и поэтому названного *baby plume*. Между тем снижение скоростей в переходной зоне и ее утонение нередко проблематично даже для классических океанических плюмов. Образование расплавной аномалии Исландии связывается одними сейсмологами – с процессами, протекающими в мантии не глубже 660 км, другими – с распространением процессов из нижней мантии с включением в аргументацию модели с утоненной переходной зоной. Представляя всю условность построений моделей, основанных на экспериментах при ультравысоких давлениях с принятым составом образцов, Ж. Р. Фулджер констатирует, что переходная зона не может использоваться в качестве термометра. Чувствительность к температуре раздела 650 км усложнена многофазовыми переходами, и глубины 410 и 650 км чувствительны не только к температуре, но и к составу и содержанию воды.

Особое внимание в разделе уделено дискуссии о Тихоокеанском и Африканском «суперплюмах». Под ними понимаются крупные тела в нижней мантии с низкими скоростями S-волн. Они были названы «суперплюмами», несмотря на их совершенно иные свойства, не сопоставимые со свойствами, изначально данными У. Дж. Морганом в определении плюма [19]. Предполагается, что «суперплюмы» должны быть горячими и плавучими, но это утверждение не соответствует действительности. Они обна-

руживают положительные аномалии валового модуля упругости и, поскольку температура влияет на валовый модуль и скорость S-волн сходным образом, положительные аномалии валового модуля упругости и отрицательные аномалии скоростей S-волн свидетельствуют о том, что они не могут быть обусловлены только одной температурой. Фактически, согласно сейсмическим моделям, эти области являются плотными, а не плавучими. Относительные магнитуды аномалий P- и S-волн предполагают отсутствие значительных температурных аномалий и объясняются в основном химической гетерогенностью, поэтому признается более правомерным использование для обозначения этих областей термина «супернагромождение» (superpile)¹.

В заключительной дискуссии студент знакомится с аргументированным заключением о том, что к настоящему времени сейсмическими методами детально изучены только три расплавные аномалии: Исландская, Эйфельская и Йеллоустонская. Им свойственны общие черты: ограничение низких скоростей верхней мантией, отклонение на разделе 410 км и отсутствие на разделе 650 км топографии, которая могла бы свидетельствовать о продолжающемся вниз горячем теле.

Температура и тепло, петрология и геохимия

Раздел «Temperature and heat» заключается 11 упражнениями, 8 из которых имеют общий характер, 1 касается Исландии и 2 – Гавайев. Основной вопрос раздела – может ли сейсмология использоваться в качестве мантийного термометра? – решается отрицательно. Раздел «Petrology and geochemistry» венчается 20 упражнениями, 12 из которых – общие, а 6 – касаются океанических островов на примере Исландии и Гавайев. Азия и Северная Америка остались вне рассмотрения. Единственный (20-й) пункт, имеющий отношение к Восточной Африке, звучит, увы, непетрологично: каково соотношение на ее территории структуры и вулканизма²?

Оригинальная плюмовая гипотеза гласит, что относительно первородный (*primordial*) материал поднимается из глубокой мантии до астеносферы

¹ К сожалению, из анализа проблемы «суперплюмов» в книге выпало рассмотрение степени достоверности в аргументации горячего состояния подошвы мантии этих областей, основанной на экзотермическом фазовом переходе перовскит – пост-перовскит, установленном в 2004 г. В логических построениях С. Маруямы и др. [18] допускается отсутствие в этих областях слоя D'' и его раздув до 350 км в области Азиатского даунвеллинга – динамического антипода Тихоокеанского и Африканского «суперплюмов».

² В статье [6] студент может почерпнуть геохронологические данные, обосновывающие начальный эпизод вулканизма 19–17 млн лет назад в провинции Рунгве Западного Рифта. По данным ⁴⁰Ar–³⁹Ar и ориентировочного K–Ar датирования, вулканизм и рифтогенез в Восточной Африке начинался в эоцене в районе Турканской седловины, отделяющей Эфиопское и Восточно-Африканское плато. Мощное термальное воздействие на литосферу первого плато выразилось в массовых вулканических извержениях, распространившихся в его центральной части вдоль Эфиопского рифта ~30 млн лет назад. На втором плато термальная эрозия литосферы была рассредоточена под периферией – в Кенийском рифте начиная с 23 млн лет назад, а в Западном рифте – с 19 млн лет назад.

ры, где он частично плавится и извергается в форме расплавной аномалии. Первородный состав был принят для плюмового материала, чтобы объяснить геохимическое отличие базальтов океанических островов (OIB) от базальтов срединных океанических хребтов (MORB). Ключевой инновацией гипотезы явилось то, что OIB свойственна особая геохимия источника, более глубокого, чем источник MORB [19]. Гипотеза приобрела новое содержание, когда было постулировано, что субдуцированные океанические слэбы погружаются до основания нижней мантии и накапливаются в виде кладбища слэбов «slab graveyard». Этот материал в дальнейшем захватывается плюмами, которые зарождаются на нижней мантийной границе. Аномальные геохимические характеристики образуются предположительно за счет рециклирования деламинированной континентальной коры и континентальной литосферной мантии.

Долгое время считалось, что первичные магмы должны быть равновесны с перидотитовой мантией и иметь $Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+}) > 70$. Но излившиеся расплавы по соотношениям Ni–Mg и Fe–Mn часто не относятся к перидотитовому источнику и могут представлять собой выплавки из источника неперидотитового типа с низким Mg#. Соответственно, энергетика глубинных процессов в источниках таких расплавов может существенно отличаться от энергетики перидотитовых плюмов.

Критический настрой Ж. Р. Фулджер в отношении перспектив петрологии и геохимии конечных изотопных компонентов для расшифровки процессов мантийной динамики отражает неопределенность многих построений, выполненных при изучении состава вулканических пород. Подробные обзоры работ в области изотопной геохимии базальтов океанов приводились ранее [11; 14 и др.]. В последнем издании можно познакомиться с наполненной гармоничной моделью конечных компонентов океанических базальтов, а в разделе «Изотопная геохимия континентальных пород» – с пессимистическим комментарием (далее следует перевод с английского): «Океанические вулканы, которые извергаются через тонкую, молодую литосферу, обеспечивают информацию об астеносфере и глубокой части мантии. В отличие от них, континентальные базальты и мантийные ксенолиты, внедрившиеся сквозь толстую, древнюю литосферу, могут рассказать нам о природе глубокой части коры и о литосферной мантии, а также об эволюции магм при подъеме к земной поверхности... К сожалению, континентальные магматические породы трудно интерпретировать. Это связано с тем, что они могут приобретать обогащенные элементные и изотопные характеристики трех возможных источников: мантийных плюмов, континентальной литосферы и коры. Разделение этих компонентов между собой в континентальных вулканиках и плутонах было главным в дискуссиях нескольких последних десятилетий. Был достигнут значительный прогресс, но большое число переменных делало каждый случай уникальным... Это затрудняет обобщенный подход к изучению континентальных магм и заставляет принять для иллюстрации основополагающих принципов подход частных исследований» [14, с. 174].

Соглашаясь по своему опыту с тезисом А. Дикина в целом, отметим, что кроме трех вероятных обогащенных источников обогащенный состав может иметь и источник астеносферной конвектирующей мантии [10]. Если такой компонент идентифицируется в магматических расплавах континентальной территории, в них легко распознаются и другие компоненты, поскольку общий компонент служит меткой в изотопном разбавлении других компонентов мантии и коры. Понимание систематики магматических источников невозможно без детальных реконструкций последовательностей вулканических извержений и представительных изотопно-геохимических исследований пород. Комментарии Ж. Р. Фулджер о магматических источниках не сопровождаются работами с такими подходами. Ее мнение о том, что общий изотопный компонент может быть результатом плавления одной фазы, не подкреплен конкретными данными, которые в принципе указывали бы на ее существование.

Роль расплавных аномалий на континентах – один из наиболее дискуссионных вопросов современной геодинамики. Необходимы полномасштабные исследования вулканических пород с обоснованием подходов к применению изотопных и микроэлементных данных.

Синтез и заключение

Заключительный раздел содержит 4 упражнения общего характера, заставляющих студента задуматься в конце курса о том, какое будущее ждет геодинамику? Предложенное упражнение фальсифицировать плюмовую и плитную гипотезы в сущности дает студенту право выбора – либо использовать научный подход к анализу фактов и не выходить за рамки интерпретации, которая из них следует, либо примкнуть к вере о существовании струй вещества, поднимающегося с границы ядро – мантия. Эта вера вошла в обиход *mainstream geology* и с легкостью переходит из публикации в публикацию.

Существующие геодинамические гипотезы пока не дают исчерпывающего объяснения всем фактам, которыми располагает современная геология. Острота полемики о плитах и плюмах способствует рождению новых более совершенных моделей. Выход из печати книги Ж. Р. Фулджер еще более заостряет противоречия между парадигмой плитной тектоники и гипотезой мантийных плюмов, появившейся на ее основе. Хочется надеяться, что постановка проблемных вопросов в книге заставит следующее поколение геологов – нынешних студентов – отнестись более требовательно к обоснованию геодинамических моделей внутриплитного (аномально-го) вулканизма.

Работа выполнена при финансировании в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», государственный контракт № П736.

Список литературы

1. *Девяткин Е. В.* Кайнозой Внутренней Азии (стратиграфия, геохронология, корреляция) / Е. В. Девяткин // Тр. ССМГЭ, 1981. – Вып. 27. – 196 с.
2. *Пенк В.* Морфологический анализ / В. Пенк. – М. : Гос. изд-во геогр. лит., 1961. – 359 с.
3. *Рассказов С. В.* Вулканизм горячего пятна и структура западной части Байкальской рифтовой системы / С. В. Рассказов // Геология и геофизика. – 1991. – № 9. – С. 72–81.
4. *Рассказов С. В.* Сопоставление вулканизма и новейших структур горячих пятен Йеллоустона и Восточного Саяна / С. В. Рассказов // Геология и геофизика. – 1994. – № 10. – С. 67–75.
5. Корреляция позднекайнозойских тектонических и магматических событий Байкальской рифтовой системы с событиями на юго-востоке Евразийской плиты / С. В. Рассказов [и др.] // Геотектоника. – 1998. – № 4. – С. 25–40.
6. Магматический эпизод Западного рифта 19–17 млн лет назад / С. В. Рассказов [и др.] // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 4. – С. 317–324.
7. Радиоизотопная геология в задачах и примерах / С. В. Рассказов [и др.]. – Новосибирск : Изд-во СО РАН. Фил. «Гео», 2005. – 288 с.
8. Позднекайнозойская магматическая динамика Центральной Монголии: воздействие плюмов на литосферу или влияние Индо-Азиатской коллизии? / С. В. Рассказов [и др.] // Геодинамика формирования подвижных поясов Земли : материалы междунар. науч. конф. – Екатеринбург : Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2007. – С. 245–248.
9. Геохимическая эволюция средне-позднекайнозойского магматизма в северной части рифта Рио-Гранде, Запад США / С. В. Рассказов [и др.] // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 29, № 1. – С. 15–43.
10. Соотношения компонентов литосферы и астеносферы в позднекайнозойских калиевых и калинатровых лавах провинции Хелунцзян, Северо-Восточный Китай / С. В. Рассказов [и др.] // Петрология. – 2011. – Т. 19, № 6. – С. 599–631.
11. *Фор Г.* Основы изотопной геологии. – М. : Мир, 1989. – 590 с.
12. Позднемеловой – раннекайнозойский след Южно-Хангайской горячей точки мантии / В. В. Ярмолюк [и др.] // Вулканология и сейсмология. – 2007. – № 1. – С. 3–31.
13. Three types of hotspots in the Earth's mantle / V. Courtillot [et al.] // Earth Planet Sci. Letters. – 2003. – Vol. 205. – P. 295–308.
14. *Dickin A. P.* Radiogenic isotope geology / A. P. Dickin. – 2 ed. – Cambridge : University Press, 2005. – 492 p.
15. *Foulger G. B.* Plates vs. plumes: a geological controversy / G. B. Foulger. – Willey–Blackwell, 2010. – 328 p.
16. *Gripp A. E.* Young tracks of hotspots and current velocities / A. E. Gripp, R. G. Gordon // Geophys. J. Int. – 2002. – Vol. 150. – P. 321–361.
17. *Keith M.* Evidence for a plate tectonic debate / M. Keith // Earth-Sci. Reviews. – 2001. – Vol. 55. – P. 235–336.
18. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core–mantle boundary / S. Maruyama [et al.] // Gondwana Research. – 2007. – Vol. 11. – P. 7–37.
19. *Morgan W. J.* Convective plumes in the lower mantle / W. J. Morgan // Nature. – 1971. – Vol. 230. – P. 42–43.

20. *Pierce K. L.* The track of the Yellowstone hotspot: volcanism, faulting and uplift / K. L. Pierce, L. A. Morgan // U.S. Geol. Surv., Open-File Report 90-415, 1991. – 68 p.
21. Plates, plumes, and paradigms / G. R. Foulger [et al.] (eds.). – Geological Society of America, Boulder, 2007.
22. Plates, plumes, and planetary processes / G. R. Foulger, Jurdy D. M. (eds.) – Geol. Soc. Spec. Paper 430, 2007. – 450 p.
23. *Rasskazov S. V.* Magmatism related to the East Siberia rift system and the geodynamics // Bull. Centres Rech. Explor. – Prod. Elf. Aquitaine. – 1994. – Vol. 18, N 2. – P. 437–452.
24. *Rasskazov S. V.* The book by G. R. Foulger: from melting anomalies to hypotheses on plates or plumes? // Geodynamics & Tectonophysics. – 2011. – Vol. 2, N 4. – P. 418–424. doi:10.5800/GT-2011-2-4-0053
25. Radiogenic isotopes in geologic processes / S. V. Rasskazov [et al.]. – Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, N. Y., 2010. – 306 p.
26. *Zonenshain L. P.* Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia / L. P. Zonenshain, L. A. Savostin // Tectonophysics. – 1981. – Vol. 76, N 1. – P. 1–45.

The crossroad of Geodynamics: Hypothesis on Lithospheric Plates vs. Hypothesis on Mantle Plumes

S. V. Rasskazov

Annotation. The textbook by G. R. Foulger «Plates vs. plumes: a geological controversy» raises the important problem of validity for the lower mantle origin of plumes, which are expected to generate intraplate magmatism. Unlike predictions of the plate hypothesis, those of the plume one are not confirmed by geological observations. Distribution of intraplate volcanism is satisfactorily explained by lithospheric extension models and local upper mantle convection.

Key words: geodynamics, plate tectonics, plumes, intraplate volcanism.

Рассказов Сергей Васильевич
 доктор геолого-минералогических наук,
 профессор, заведующий лабораторией
 Институт земной коры СО РАН
 664033, г. Иркутск Лермонтова, 128
 Иркутский государственный университет
 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
 тел. (3952) 51–16–59

Rasskazov Sergei Vasilevich
 Doctor of Geology and Mineralogy
 Professor, Head of the Laboratory
 Institute of the Earth's Crust SB RAS
 128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
 Irkutsk State University
 1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
 tel.: (3952) 51–16–59