

ПРОБЛЕМА ТРЕТЬЕГО СЛОЯ СОВРЕМЕННЫХ И ДРЕВНИХ ОКЕАНОВ

А.А. Ефимов

*Институт геологии и геохимии УрО РАН**620151 Екатеринбург, Почтовый пер., 7**E-mail: efimov@igg.uran.ru**Поступила в редакцию 27 августа 2001 г.*

Два тезиса: (1) «Современная океаническая литосфера зарождается в зонах спрединга – срединно-океанических хребтах и им подобных» и (2) «Офиолиты суть фрагменты древней океанической литосферы» – в настоящий момент неоспоримы. Принято считать, что в осевой зоне хребта на твердом перидотитовом фундаменте в результате затвердевания гигантской стационарной магматической камеры образуются кумуляты (расслоенные габбро) мощностью до 4-6 км, соответствующие 3-му геофизическому слою океана, еще выше – комплекс параллельных базальтовых даек (КПД), базальтовые лавы и пелагические осадки. Общепризнано, что фундамент сложен остатком (реститом) от выплавления в мантии базальтовой жидкости, запечатленной в дайках и лавах, однако трактовка 3-го слоя уязвима по трем причинам. (1) Сейсмические исследования не обнаружили в современных зонах спрединга гигантских бассейнов жидкой магмы; идентифицированы лишь ничтожные скопления базальтовой магмы – фидеры КПД. (2) Нет надежных доказательств существования древних магматических камер в офиолитовых комплексах. Граница между КПД и габбро есть граница истинной (вулканической) океанической коры с подстилающим твердым 3-м слоем, структурное единым с океанической мантией. (3) Возможна альтернативная трактовка расслоенности габбро без привлечения идеи фракционирования. Единственным местом генерации 3-го слоя может быть сектор аномальной верхней мантии под океаническими хребтами до глубин в 20-25 км, где высокие температуры сочетаются с низкими давлениями и где существует восходящий астеносферный мантийный поток. Вещество габбро приходит в этот сектор кристаллическим и горячим вместе с базальтовыми выплавками и истощенным перидотитом. Протолитом габбро могут быть *эклогиты*, составляющие 3-7% объема верхней мантии. Переход *эклогит* → габбро сопровождается инверсией плотности, в результате чего гравитационная сепарация в среде с реологическими свойствами вязкой жидкости неизбежно должна привести к формированию 3-го океанического слоя. Океанический разрез состоит из двух кристаллических, структурно и фациально единых, но химически отличных мантийных слоев – перидотитового и габбрового – и вулканического слоя, отделенного от двух первых резким геологическим, реологическим и термодинамическим разделом – поверхностью конвекционной ячейки зоны спрединга.

Ключевые слова: *габбро, дайковый комплекс, декомпрессия, древние океаны, кумулятивные структуры, кумуляты, магматическая камера, магматическое фракционирование, мантийный *эклогит*, метаморфическая дифференциация, океаническая кора, океаническая литосфера, океаническая мантия, океанический спрединг, офиолиты, переход *эклогит-габбро*, пластическое течение, расслоенность, скрытая расслоенность, современные океаны, срединно-океанические хребты, третий слой океана.*

UNESCAPABLE REVISION OF INTERPRETATION
OF THE THIRD LAYER OF MODERN AND ANCIENT OCEANS: A PROGNOSIS

A.A. Efimov

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

The modern oceanic lithosphere is generated in spreading zones of mid-ocean ridge type. Ophiolites are fragments of the ancient oceanic lithosphere; these theses are undisputable. It is assumed that a giant steady magma chamber exists in the axial zone of a ridge on solid mantle basement. Cumulates (layered

gabbros) corresponding the 3rd oceanic layer 4-6 km thick are formed in such a chamber. Upsection they are changed by sheeted dyke complex, basaltic lavas and sediments. A future revision of petrogenetic interpretation of the 3rd layer seems to be unescapable by the following reasons: (1) Large magmatic chambers have not been detected in modern spreading zones; (2) There is no direct evidence of existence of ancient magma chambers in ophiolitic complexes; the limit between the sheeted dyke complex and gabbro is the limit between true (volcanic) oceanic crust and solid 3rd layer which is in structural unity with oceanic mantle; (3) Layered structure of gabbro can be interpreted as the result of plastic flow and metamorphic differentiation. The three independent lines of evidence allow to suppose that gabbro of the 3rd oceanic layer and gabbro of the ophiolite suite were formed not from a liquid. The only place of gabbro generation may be high temperature – low pressure region of the upper mantle beneath MORs at depths less than 20-25 km where the troctolite assemblage (anorthite + olivine) is stable. Hot and solid gabbro substance which is chemically different from basaltic one comes to this geodynamic cell together with basaltic melts and depleted peridotite. Eclogite (basic residual matter) that composes 3-7% of the upper mantle can be considered as the gabbro protolith. The eclogite → gabbro transition gives gabbro parageneses. At the depth 25-20 km or less the transition is followed by a gravitational differentiation accompanied by flotation and accretion of gabbroic bodies which are much less dense than the magnesian residue. This leads to the formation of the 3rd oceanic layer.

Key words: gabbro, sheeted dyke complex, decompression, ancient oceans, cumulative structures, cumulates, magma chamber, magmatic fractionation, mantle eclogite, metamorphic differentiation, oceanic crust, oceanic lithosphere, oceanic mantle, oceanic spreading, ophiolites, eclogite-gabbro transition, plastic flow, layering, cryptic layering, modern oceans, mid-oceanic ridges, third oceanic layer.

Введение

Около 30 лет существует схема, согласно которой современная океаническая литосфера и ее древний аналог – офиолиты – зарождаются в зонах спрединга – срединно-океанических хребтах (СОХ) и им подобных [Greenbaum, 1972; Parrot, Ricou, 1976; Coleman, 1977]. Согласно этой схеме (рис. 1), в осевой зоне хребта на твердом мантийном перидотитовом фундаменте возникает гигантская стационарная приповерхностная магматическая камера – бассейн жидкой магмы, в котором непрерывно образуются расслоенные габбро (кумуляты), в процессе спрединга формирующие слой мощностью до 4-6 км. Габбро перекрываются параллельными базальтовыми дайками (*sheeted dyke complex*, КПД), базальтовыми пиллоу-лавами и маломощными пелагическими осадками. Эти стратиграфические единицы соответствуют геофизическим слоям океана: фундамент – верхней мантии (сейсмические скорости около 8 км/с), габбровые кумуляты – 3-му геофизическому слою (скорости около 6,5 км/с), дайки и лавы мощностью до 2-4 км – 2-му слою (скорости около 4-5 км/с), осадки – 1-му. Три последних стратиграфических единицы приня-

то называть океанической корой. Сходство разрезов и находки всех членов наземной офиолитовой ассоциации в океанах делают данную схему глобальной парадигмой, а тезис: “офиолиты суть фрагменты древней океанической литосферы” – в настоящий момент неоспоримым [Nicolas, 1989].

Однако ревизия сложившихся представлений кажется неизбежной: в этой, казалось бы, незыблемой области назревает некая революционная ситуация.

Во-первых, сообществом западных морских геофизиков установлено, что сейсмическая аппаратура высокого разрешения не обнаруживает в современных зонах спрединга постулируемых петрологами гигантских бассейнов магматической жидкости. Удалось идентифицировать лишь ничтожные по размерам скопления базальтовой магмы – фидеры дайкового комплекса. Отсутствие современных магматических камер резко противоречит представлениям петрологов о кумулятивной природе 3-го слоя.

Во-вторых, данные по офиолитовым комплексам свидетельствуют, что и здесь прямые доказательства постулируемой петрологами древней магматической камеры отсутству-

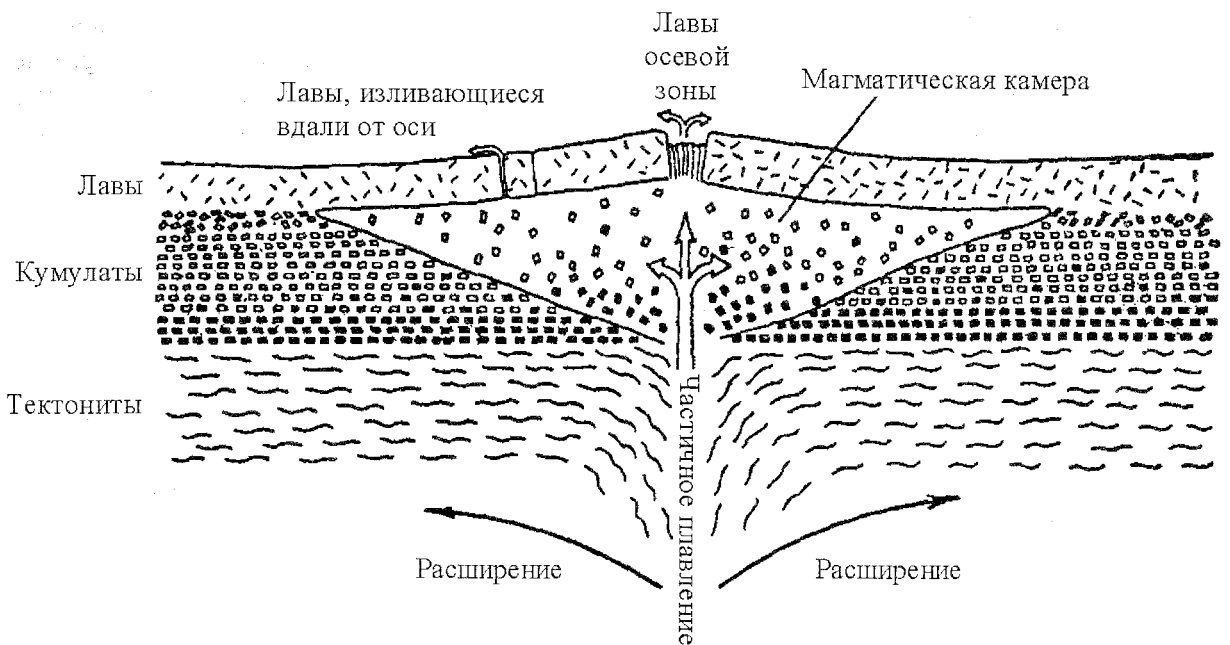


Рис. 1. Принципиальная каноническая схема образования океанического разреза и офиолитовой ассоциации [Parrot, Ricou, 1976].

ют. Дайки секут твердое габбро. Граница между габбро и дайковым комплексом вероятнее всего представляет собой тектонический раздел двух твердых сред – истинной (вулканической) океанической коры и подстилающего ее кристаллического 3-го слоя, структурно единого с перidotитовой мантией.

В-третьих, становится возможной альтернативная трактовка полосатых текстур (расслоенности). Расслоенность габбро можно рассматривать как совместный результат двух процессов – высокотемпературного пластического течения и метаморфической дифференциации в низкбарической (не более 7 кбар) области. Западные исследователи, только начинающие распознавать в расслоенности габбро признаки пластического течения, а в классических кумулятах – признаки, противоречащие кумулятивному генезису, находятся на полпути к тому же радикальному выводу.

Три независимые линии доказательств дают основания усомниться в том, что зародившийся в современных и древних центрах спрединга 3-й океанический слой возник путем фракционирования ликвидусных фаз в приповерхностном бассейне жидкой магмы. По-видимому, в его веществе записан принципиально иной процесс. Рассмотрим отдельные стороны этой глобальной проблемы.

Проблема современной магматической камеры

В том, что мантийный перidotитовый фундамент океана сложен остатком от выплавления базальтовой жидкости, запечатленной в дайках и лавах, разногласий, по сути дела, нет. Что касается 3-го слоя, то существует как будто бы полное единодушие в том смысле, что в его разрезе записан процесс фракционной кристаллизации в магматической камере [Boudier et al., 1996; Kelemen et al., 1997 и др.]. Представление о магматических камерах – краеугольный камень кумулятивной гипотезы – перенесено на океан и офиолиты из учения о расслоенных интрузиях, разработанного главным образом Л.Уэйджером в 30-х годах [Wager, Deer, 1939]. Следовательно, если в 3-м слое современного океана записан тот же процесс, что и в древних расслоенных интрузиях континентов, то в современных зонах океанического спрединга совершенно неизбежно существование гигантских *современных* магматических камер шириной в десятки и глубиной в несколько километров, подобных изображенной на рис.2. Если подобные магматические камеры в современных океанах существуют, парадигма превращается в научный факт. С другой стороны, если камер нет – возникает серьезная проблема, по-

могла бы быть благоприятной: здесь имеются признаки современной интенсивной вулканической и гидротермальной активности, возможно, вызванной магматическим телом. Однако обнаруженная здесь зона пониженной плотности под неовулканическим хребтом не может быть уверенно отождествлена с магматической камерой и с не меньшим успехом может быть интерпретирована как интенсивно переработанная гидротермальными растворами зона разлома в океанической коре [Ballu et al., 1998].

Некоторые из морских геофизиков с большей уверенностью предполагали возможность существования осевых «магматических резервуаров» под хребтами быстрого спрединга, имея в виду в первую очередь зону пониженных скоростей сейсмических волн, обнаруженную на сегменте Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) примерно от 9 до 13° с.ш. между трансформами Клиппертон и Сикейрос. Итоги многолетнего изучения этого ключевого объекта подведены в последние годы.

Дж. Кент и др. [Kent et al., 1993] указывают: «... магматическая камера, ограниченная тонким слоем расплава... находится в согласии с полученными сейсмическими данными... тонкая линза расплава (10-50 м) является возможной моделью магматической камеры». И далее: «... рефлектор осевой магматической камеры ... не представляет собой кровлю стабильного магматического очага, но может означать путь миграции расплава между инъекцией из мантии и излиянием вдоль неовулканической зоны... предпочитаемая нами модель есть тело расплава, состав которого подобен таковому комплекса параллельных даек, находящегося выше». И, наконец, предельно ясная формулировка: «... отражатель ... представляет собой не кровлю стабильной магматической камеры, а транспортный путь между поступлением расплава из верхней мантии и неовулканической зоной».

На разрезах (рис. 3) магматическая камера имеет ничтожную, менее 50 метров, мощность, а в плане представляет собой узкую (250-700 м) ленту, испытывающую смещения вместе с сегментами хребта. Под магматической камерой фиксируется низкоскоростная зона шириной до 1200 м, погружающаяся относительно раздела дайки/габбро. Предполагается, что это зона «кристаллической каши», содержащей не многие проценты частичного расплава, подстилающая магматическую линзу и латерально переходящая в зону горячих твердых габбро.

Низкоскоростная зона, очевидно, с не меньшим успехом может рассматриваться как зона локальных скоплений базальтовой жидкости в твердой габбровой матрице, питающая снизу магматическую линзу. Таким образом, «магматический резервуар» ВТП не имеет ничего общего с той грандиозной камерой, какая требуется петрологам для подтверждения кумулятивной модели образования 3-го слоя. Многолетние усилия морских геофизиков привели в конечном счете к тому, что удалось идентифицировать незначительные скопления базальтовой магмы, локализованные *между габбро и дайками* (а не между мантийным перидотитовым фундаментом и вулканическим слоем), которые в лучшем случае можно рассматривать как фидеры дайкового комплекса.

Влияние этих данных на интерпретацию офиолитов уже ощутимо. В относительно недавней модели А. Николя [Nicolas, 1989; Boudier, Nicolas, 1996] ширина камеры, венчающей мантийный диапир, уже не превышает 1 км, зато наличествует мощная зона «кристаллической каши». Вся эта картина предположительна, как, например, и множественные небольшие магматические камеры, изображаемые по данным глубокого бурения в офиолитах Кипра [Malpas et al., 1989].

Мировая петрологическая мысль не может смириться с отсутствием магматических камер в океанах. Предпринимаются попытки объяснить, почему при огромных мощностях кумулятов и 3-го слоя камера столь мала [Sinton, Detrick, 1992]. Авторы статьи под симптоматическим названием «Пластическая деформация и происхождение расслоенных габбро в офиолитах» [Quick, Denlinger, 1993] искренне пытаются примирить свою веру в кумуляты с данными морской геофизики. Для этого им приходится фактически признать, что камера с жидкой магмой имеет крайне незначительные размеры, а большая часть кумулятов представлена деформированными кристаллическими породами, испытавшими крупномасштабное пластическое течение (они называют их «кристаллической кашей», хотя существование горных пород, в которых такое агрегатное состояние вещества было бы запечатлено, сомнительно). Авторы предлагают модель «габбрового ледника» – гипотетический образ растекающейся в стороны от хребта массы почти 100%-но кристаллических кумулятов. Эта модель фактически уже не имеет ничего общего с классичес-

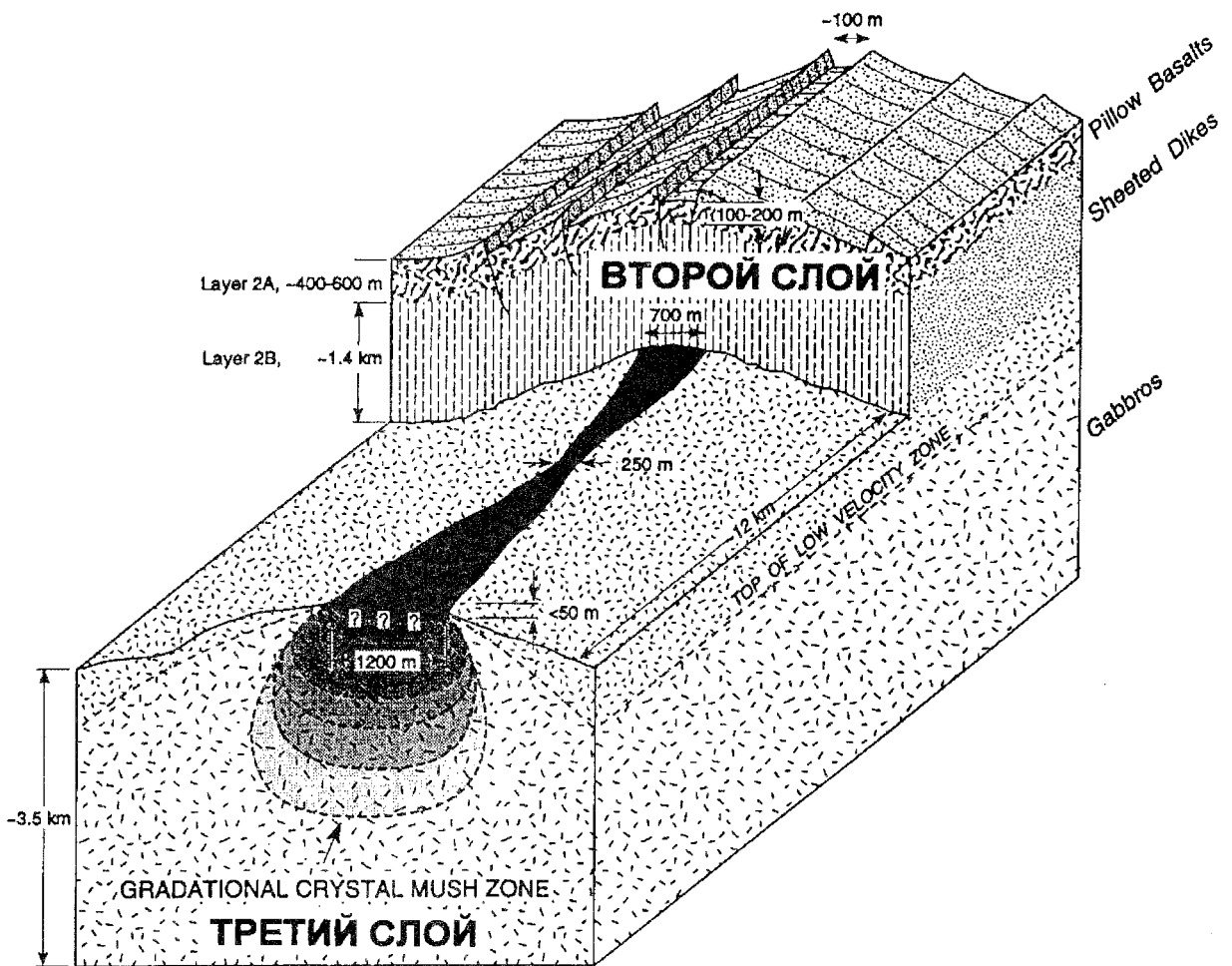


Рис. 3. Модель современной магматической камеры под Восточно-Тихоокеанским поднятием на $9^{\circ}30' N$ [Kent et al., 1993].

Верхняя кора частично удалена, чтобы показать продольную сегментацию осевой магматической камеры. Ширина неовулканической зоны оценивается в 2-4 км. Всплывающий под осью хребта базальтовый расплав частично запруживается в основании комплекса параллельных даек. Предполагаемая мощность магматической камеры — около 10-50 м. Низкоскоростная зона появляется на вершине магматической камеры и обнаруживает погружение относительно раздела дайки/габбро. Предполагается, что линза расплава перекрывает зону частично расплавленной «кристаллической каши», которая переходит латерально в зону горячих затвердевших пород. Уменьшение сейсмических скоростей в пределах этой области предполагается как результат наличия горячих пород, содержащих немногие проценты частичного расплава.

кой, однако она тоже нежизнеспособна, поскольку пытается примирить непримиримое.

Итак, есть серьезные сомнения в том, что 3-й слой современных океанов образовался путем фракционной кристаллизации в гигантских магматических камерах СОХ, поскольку существование таковых не подтверждается, а идентифицируемые геофизиками скопления жидкой магмы незначительны, локализованы выше кровли 3-го слоя и могут рассматриваться всего лишь как фидеры даек. Разумеется, это еще

не решение проблемы кумулятов, хотя уже само по себе наличие или отсутствие современных камер может быть критическим моментом проверки кумулятивной идеи как таковой. Само понятие магматической камеры — база кумулятивной идеи — становится чисто умозрительной и даже мистической категорией. Однако в океанах вещество 3-го слоя недоступно для прямого изучения, и для проверки этих данных мы неизбежно должны обратиться к наземным объектам. Вопрос можно сформулировать так:

есть ли прямые доказательства существования древних магматических камер в офиолитовых комплексах?

Проблема древней магматической камеры

В мире известен, по-видимому, единственный офиолитовый комплекс, в котором литосфера древнего хребта, как считают, сохранилась в почти первозданном виде, – это офиолитовый комплекс Омана [Nicolas, 1989, 1991]. Здесь доступна детальному изучению важнейшая для наших рассуждений зона – граница габбрового разреза и дайкового комплекса. Если следовать офиолитовой парадигме, это граница магматического бассейна 4-6-километровой глубины и 2-4-километровой вулканической покрывки этого бассейна (рис. 4). Именно эта граница может дать ответ на коренной вопрос:

как связана магматическая камера, в которой, как предполагают, образовались кумуляты, с вулканитами, образовавшимися, несомненно, из базальтовой магмы?

Из имеющихся описаний следует, что кумуляты непосредственно с дайками не соприкасаются. Между теми и другими существует сложная переходная зона, в которой присутствуют так называемые «изотропные габбро», т.е. габбро без хорошо выраженных полосатых текстур, роговообманковые габбро – по-видимому, продукты водного метаморфизма нижележащих габбро, роговообманковые диориты и небольшие плагиигранитные тела, интродуцирующие габбро и дайки. Дайковый комплекс и верхи габбрового разреза сильно переработаны проникающей сверху морской водой. Нет признаков, указывающих на то, что дайки внедряются из нижележащей камеры, т.е. имеют корни в габбро; напротив, есть доказательства того, что дайки



Рис. 4. Принципиальная схема строения коровой (в общепринятом смысле) части разреза Оманского офиолитового комплекса, демонстрирующая сложное строение зоны перехода от габбро к дайкам [Nicolas, Boudier, 1991].

секут уже твердое габбро, содержат скрины габбро, и чем ниже по разрезу, тем даек меньше.

Предварительное впечатление таково: граница между габбро и дайками выглядит как тектоническая граница двух твердых сред, осложненная дислокациями, дифференциальными движениями, магматическими внедрениями, метаморфизмом в связи с проникновением морской воды и, возможно, явлениями частичного плавления. Если это впечатление верно, мы имеем здесь не верхнюю границу магматической камеры, а границу твердого вулканического слоя (истинной океанической коры, сложенной дайками и лавами) с подстилающим кристаллическим, твердым и горячим габбровым (3-м океаническим) слоем, который составляет одно структурное целое с залегающей еще ниже перидотитовой океанической мантией, на что указывают особенности строения переходной к мантии зоны [Boudier, Nicolas, 1995]. Кристаллический габбровый разрез, таким образом, как бы надстраивает разрез мантийного фундамента. Возможен радикальный вывод: лучший в мире офиолитовый комплекс Омана не дает доказательств того, что в центре древнего спрединга существовала магматическая камера. Более того: можно сделать вывод, что граница между габбро и дайками есть самый главный раздел в новообразованной океанической литосфере – раздел между сухой, твердой и горячей, пластически деформированной габбро-перидотитовой верхней мантией и недеформированным, пропитанным морской водой неовулканическим слоем. Габбро и дайки химически несходны, не связаны общим корнем, или этот корень находится очень глубоко в мантии. Ко времени внедрения даек габбро были уже твердой породой.

Естественно, возникает вопрос о первоприроде вещества габбрового слоя, не являющегося химическим эквивалентом базальта. Однако прежде чем обсуждать проблему генезиса габбро, следовало бы ответить на ключевой вопрос, который можно сформулировать до предела просто: что такое полосатые текстуры гипербазитов и габбро?

Проблема полосатых текстур (расслоенности)

Полосатые текстуры («расслоенность») свойственны всему офиолитовому разрезу, кроме даек и лав. Их генетическое толкование за-

имствовано океанической парадигмой так же, как и понятие магматической камеры, из детально разработанной в 30-х годах [Wager, Deer, 1939] концепции образования кумулятов в расслоенных интрузиях. Нелишне напомнить, что, например, офиолитовый комплекс Бэй-оф-Айлендс в Канаде, ныне считающийся классическим примером фрагмента океанической коры Протоатлантики, ранее был описан как типичная расслоенная интрузия [Smith, 1958].

В наше время перидотитовое основание океанического разреза единодушно рассматривается как продукт горячего пластического течения истощенной астеносферной мантии, прилепившейся к океанической литосфере в зоне спрединга, а полосатые текстуры в ультрамафитах (реститах) – как динамометаморфические. В то же время такие же текстуры в габбро столь же единодушно рассматриваются как магматические; особых доказательств обычно не приводится, достаточной считается ссылка на концепцию Л. Уэйджера. Полосатые текстуры принято считать результатом гравитационной или динамической сепарации ликвидусных фаз, реже результатом жидкого магматического расслоения. Разные толкования, фактически исключающие одно другое, имеют общий исходный пункт: предполагаемый процесс фракционирования и кумуляции протекал в жидкой магме, заполнявшей магматическую камеру. Однако здесь нет необходимости обсуждать все тонкости существующих моделей. Возможен полностью альтернативный подход к трактовке расслоенности.

Пластическое течение. Около 25 лет тому назад, когда представления о пластической деформации габбро еще не существовало, автором впервые был обоснован абсолютно новый, вытекавший из оригинального уральского материала тезис: *полосатые текстуры во всех случаях суть запечатленное высокотемпературное пластическое течение, а полосатые габбро суть фемические гнейсы специфического состава* [Ефимов, 1977]. Толчком к этому послужило открытие в Платиноносном поясе Урала мощных толщ полосатых габбро – так называемых тылаитов, являющихся бесспорными высокотемпературными тектонитами. Множество фактов подтверждает динамометаморфическую природу расслоенности: дислокации в виде флексур, складок, будинажа и т.д.; проникающая внутрикристаллическая деформация; явления метаморфической дифферен-

циации; метаморфические микроструктуры. Однако и западные исследователи явно продвигаются в том же направлении и в некотором смысле находятся на полпути к тому же радикальному выводу. Приведем две цитаты.

«Структурные исследования в Омане ... показали, что магматическая расслоенность, каково бы ни было ее происхождение, переработана мощным вязким течением, аналогичным процессу, хорошо документированному в пластически деформированных метаморфических породах ...»; «... ориентация расслоенности габбро сейчас отражает поле магматического течения и в меньшей степени – позицию, связанную с процессом кристаллизации «in situ» ...» [Nicolas, 1989, p. 263].

«Возрастающее количество данных свидетельствует, что проникающая деформация могла иметь важное значение в петрогенезисе некоторых офиолитовых габбро. Текстуры, показательные для пластической деформации, описаны в габбровых породах ...» [Quick, Denlinger, 1993, p. 14020].

Из этих цитат следует, что внимательные наблюдатели начинают распознавать в расслоенности габбро все больше признаков пластического течения. Упоминания о магматическом течении, предшествовавшем пластическому течению, недостаточно убедительны и кажутся скорее данью традиции.

Микроструктуры. Указания на так называемые кумулятивные микроструктуры в полосатых породах, подтверждающие, как считают, существование двух поколений кристаллов – ранних, кумулятивных, т.е. выделившихся и осевших из первичной жидкости, и поздних, интеркумулятивных, образовавшихся из остаточной жидкости, – также являются очевидной данью традиции. Эти представления, основанные на убеждении, что степень идиоморфизма минералов отражает порядок их кристаллизации, совершенно неприемлемы: можно привести массу примеров синхронного роста кристаллов в гицидоморфных минеральных агрегатах. В то же время микроструктура мономинеральных скоплений и слоев, например, анортозитовых, обычно более или менее близка к типичной метаморфической, физически равновесной – гранобластовой, демонстрирующей рекристаллизацию твердофазного агрегата. Обычны порфирукластические (бластомилонитовые) структуры, в которых зафиксированы дробление и бластез, одновременные с образованием

расслоенности. Наконец, тщательные микрозондовые исследования обнаруживают равновесность и, следовательно, синхронность сосуществующих минералов, не подтверждая существования двух поколений кристаллов, соответствующих упомянутым категориям.

«**Скрытая расслоенность**». Как известно, в разрезе кумулятов знаменитого Скергарда [Wager, Deer, 1939] наблюдается так называемая скрытая расслоенность (*cryptic layering, cryptic variation*), трактуемая как изменение состава ликвидусных фаз на фронте кристаллизации. Не подвергая сомнению этот конкретный случай, отметим, что в наиболее полных офиолитовых разрезах типа оманского такие вариации слабы и нерегулярны и не коррелируют со стратиграфией. Местные отклонения часто объясняют пополнением камеры новыми порциями свежей магмы (так наз. *replenishment*) – объяснение достаточно остроумное, но чисто умозрительное; геологических и геохимических доказательств этих повторных внедрений не имеется. Интересные данные получены в последние годы для классических расслоенных интрузий. В высшей степени детальным изучением Средней полосчатой серии комплекса Стиллиуотер [Meurer, Boudreau, 1996] установлено, что, несмотря на большие колебания в пропорциях минералов, в составе последних не наблюдается отчетливых стратиграфических или латеральных трендов. Отсутствие «скрытой расслоенности» авторы объясняют тем, что все доказательства первично кумулятивного генезиса расслоенной толщи были уничтожены неким посткумулятивным процессом под влиянием мощного восходящего флюидного потока (однако, заметим, этот процесс почему-то пощадил расслоенные текстуры толщи).

Интереснейшие выводы следуют из изучения распределения весьма информативного для габбро элемента – стронция – в расслоенных породах. В соответствии с предсказаниями ортомагматической модели, первичная гомогенная жидкость должна была обладать некоторым исходным ресурсом Sr, а главный концентратор Sr – плагиоклаз – должен был экстрагировать из нее этот элемент в соответствии с коэффициентом распределения Sr между кристаллами и жидкостью, всегда намного превышающим единицу. Это неизбежно должно было приводить к обеднению Sr остаточных жидкостей и поздних дифференциатов и отражаться в скрытой расслоенности. Однако, во-

первых, ни в одном из известных случаев нет признаков такой тенденции. Во-вторых, в разрезах большой мощности, например, в том же Стиллиутере [Meurer et al., 1997], *валовое содержание Sr в породах есть линейная функция количества плагиоклаза с постоянным содержанием Sr*. Этот важнейший факт, установленный ранее для уральских габбро [Ефимов и др., 1989], не находит правдоподобного объяснения, если исходить из ортомагматической модели. Однако этот же факт имеет корректное термодинамическое объяснение: постоянная концентрация компонента в фазе, при переменном ее количестве, означает равенство *химического потенциала* этого компонента в момент формирования разреза. Из этого, в свою очередь, следует, что все множество слоев находилось в состоянии химического равновесия между собой и в совокупности составляло единую *эквипотенциальную систему*, слои в которой образовались *единовременно*, но не последовательно, как это следует из традиционной трактовки. По данным прецизионного U-Pb датирования разреза известного расслоенного комплекса Дулут, весь разрез образовался практически *единовременно*, а разновременные магматические события, которые предполагались для него ранее, маловероятны [Paces, Miller, 1993].

Метаморфическая дифференциация.

Еще один важнейший фактор возникновения расслоенности габбро – метаморфическая дифференциация (миграция вещества в кристаллической фазе по градиенту химического потенциала) – вообще, по существу, не обсуждается. Для уральских комплексов описаны эффектные случаи этого процесса [Ефимов, 1984], когда в массе однородного габбро в условиях тектонического растяжения без плавления образуются крупные сегрегации анортозита, а также возникают микроочаги метаморфической дифференциации, в которых происходит разделение анортозитовых и комплементарных фемических скоплений; в расслоенных толщах при вязких разрывах меланократовых слоев образуются анортозитовые тела, дискордантные по отношению к общей расслоенности, и комплементарные фемические сегрегации. Состав минералов во всех слоях и сегрегациях строго постоянен и одинаков. Предельно доказательный случай описан автором для Восточной Сибири [Ефимов, 1989]: в почти массивном троктолите структуры растяжения типа “конского хвоста” выполнены

анортозитом, состоящим из того же плагиоклаза, что и троктолитовая матрица (рис. 5). Применительно к таким жилам вывод об их немагматической природе неизбежно следует как логическое заключение всего из двух посылок: (1) Анортозитовые жилы суть жилы выполнения, но не жилы замещения или кумулятивные образования. (2) Петрология запрещает существование плагиоклазовых жидкостей, следовательно, объяснение выполнения виртуальных полостей растяжения внедрением плагиоклазовой магмы неприемлемо.

Все подобные случаи метаморфической дифференциации в габбро связаны с градиентами давления, которые возникают в связи с разрывом. Образование анортозитовых тел есть диффузионная компенсация виртуальных зияющих полостей растяжения. Вещество мигрирует в изотермических условиях в сторону меньшего давления, стремясь уменьшить разность химических потенциалов в матрице и в зоне разрыва, и при этом в каждый момент времени в кристаллической фазе. То же происходит и при дифференциальном скольжении слоев относительно один другого – таков возможный механизм образования анортозитовых слоев в рас-



Рис.5. Явления метаморфической дифференциации в габбро (Восточная Сибирь).

слоенных толщах. Состав минеральных фаз всегда строго одинаков в матрице и сегрегациях, из чего следует, что система матрица + жилы (или анортозитовые слои) эквипотенциальна. Из абсолютного сходства состава фаз, между прочим, следует важный методический вывод: явления метаморфической дифференциации могут быть распознаны только путем геологического наблюдения.

Некоторые выводы. Приведенные данные позволяют считать полосчатость (расслоенность) результатом главным образом двух синхронных процессов, протекающих в твердом кристаллическом веществе: высокотемпературного пластического течения и метаморфической дифференциации, сопровождаемых синтетонической рекристаллизацией, в условиях эквипотенциальной термодинамической системы, включающей весь объем расслоенной толщи.

Источник вещества габбро

Для начала отметим почти невероятный факт: ортомагматическое происхождение одной из самых распространенных в офиолитах разновидностей габбро – троктолита – запрещено надежными экспериментальными данными по модельной системе анортит-форстерит [Kushiro, Yoder, 1966]: троктолит не может кристаллизоваться из троктолитовой жидкости! Суть проблемы состоит в том, что в данной системе нет эвтектики анортит-оливин. Единственной ликвидусной фазой в широкой области троктолитовых составов является глиноземистая шпинель. Однако в природных разрезах она неизвестна, как неизвестны и шпинелевые кумуляты. Эти предельно убедительные экспериментальные данные, известные уже более 85 лет и с тех пор неоднократно подтвержденные, обычно просто игнорируются, что и было особо отмечено автором [Ефимов, 1985].

Итак, независимые доказательства, вытекающие из данных морской геофизики (отсутствие магматических камер в современных океанах), из изучения офиолитовых комплексов (сомнительность существования древних магматических камер), из изучения текстур и микроструктур полосчатых пород (указания на динамометаморфическую природу расслоенности) и из экспериментальных данных по системе анортит-форстерит, уже дают возможность предполагать, что 3-й геофизический слой океана и габбровый слой офиолитовых комплексов

образовались не из магматической жидкости, но символизируют скорее динамометаморфический процесс, протекавший в веществе габбрового состава, химически отличном от базальта, и в термодинамических условиях минеральной фации габбро. То есть габбро 3-го слоя океанов и офиолитовых комплексов имеет все черты изначально твердой породы, не прошедшей стадии магматической жидкости. Этот вывод, конечно, интересен, но он все-таки не дает ответа на вопрос об источнике вещества габбро. Может даже возникнуть впечатление, что в рассуждениях возникает некий тупик. Однако, по-видимому, это не так.

Фациальная принадлежность габбро, как метаморфической породы, может быть определена достаточно легко: это порода безводной фации, ограниченной по температуре сверху сухим базальтовым ликвидусом, а по давлению – полем устойчивости оливин-плагноклазового (троктолитового) парагенезиса – до 7 кбар [Kushiro, Yoder, 1966; Грин, Рингвуд, 1968]. Все рассуждения приводят к выводу, о том, что единственно возможной геодинамической ячейкой, где могло бы генерироваться габбро, является сектор аномальной верхней мантии под океаническими хребтами до глубин в 20-25 км, сочетающий очень высокие температуры и низкие давления. То есть это то же самое место, где имеют место интрузии (дайки) и излияния (лавы) базальтовой жидкости, где возникает 3-й слой океана и где, как считают, существует восходящий астеносферный мантийный поток, связанный с глубинной конвекцией.

Если все предыдущие рассуждения верны, неизбежен вывод, что вещество габбро приходит в этот сектор уже кристаллическим, горячим и способным пластически деформироваться. Оно может появиться здесь, в центре океанического бассейна, конечно же, только из верхней мантии, откуда появляются ультрамафический рестит и базальтовая жидкость. Но и это, конечно, еще не ответ на вопрос о природе габбро. Нам не разрешить его без хотя бы краткого рассмотрения состава верхней мантии, о котором можно судить по двум независимым источникам данных, каковыми являются глубинные ксенолиты в кимберлитах и базальтах и высокобарические эклогит-гипербазитовые комплексы. Первые довольно обычны, вторые крайне редки.

Из обширной литературы по глубинным ксенолитам вытекает очень важный факт, сей-

час общепризнанный: в перидотитовой верхней мантии существуют горные породы, химический состав которых позволяет определить их как базиты [Глубинные ксенолиты..., 1975]. Это *эклогиты*, образующие обширную химическую общность, отличную от базальтовой, но сходную с габбровой. Если представить себе полное ретроградное преобразование (декомпрессию) мантийных базитов в условиях габбровой фации, т.е. переход *эклогит* → *габбро*, мы получили бы широкий спектр габбровых пород. Это первое логическое, но все-таки умозрительное указание на возможность мантийного происхождения габбрового вещества.

Еще более важную и определенную информацию дают комплексы *эклогит-лерцолитового* состава, многими исследователями трактуемые как мантийные диапиры в континентальной коре. Они известны в Норвегии, Альпах и других регионах, но особенно важны два объекта так называемой Гибралтарской дуги – массивы Бени Бушера в Марокко и Ронда в Испании [Kornprobst, 1969; Obata, 1980]. Для них характерны тесная связь гранатовых лерцолитов с *эклогитами*, высокотемпературные (до 1400°C) и высокобарические (до 45 кбар) парагенезисы, соответствующие глубинам, возможно, до 150 км. Все это позволяет рассматривать такие комплексы как неистощенный материал верхней мантии, исходный для образования базальтовой магмы и ультраосновного рестита. Базиты, составляющие лишь небольшую часть общего объема этих комплексов, в условиях габбровой фации имели бы парагенезисы низкожелезистых меланократовых габбро, богатых оливином, с битовнит-анортитовым плагиоклазом, что и можно наблюдать в массиве Ронда, для которого последние ступени равновесия фиксируются в области низких давлений габбровой фации [Obata, 1980].

Происхождение мантийных *эклогитов* – дискуссионный вопрос. Они, возможно, гетерогенны. Обоснована (и прекрасно согласуется с постулатами тектоники плит) возможность их образования как остатка от выплавления известково-щелочных магм из океанической коры в зонах субдукции [Грин, Рингвуд, 1968а]. Какую-то их часть можно представить как результат изохимической *эклогитизации* тугоплавкого *офиолитового габбро* в тех же зонах субдукции, и т.д. Для нас эта сторона проблемы мантийных базитов сейчас не особенно важна, хотя здесь скрыт вопрос, может быть, даже более важный,

чем проблема *офиолитов*: что первичнее – *эклогит* или *габбро*? Главное для нас состоит в том, что присутствие в верхней мантии (и не только в континентальной, но и в океанической, поскольку глубинные ксенолиты обнаружены в лавах гавайских вулканов) кристаллических высокобарических базитов, химически отличных от базальта, есть достоверный научный факт.

Этот научный факт позволяет задать очень важный вопрос: почему в океанической парадигме, учитывающей, казалось бы, все современные данные, и основанной, в том числе, на фундаментальной модели разделения мантийного вещества на *гарцбургитовый рестит* и базальтовую жидкость, нигде и никогда не рассматривается судьба мантийных *эклогитов*? Простейшие рассуждения позволяют прийти к выводу, что, если существует хотя бы один путь поступления твердого базитового вещества в верхнюю мантию (погружение океанической коры в зоны субдукции, т.е. в зоны нисходящей мантийной конвекции) с образованием *эклогита*, то в зонах восходящей конвекции, т.е. в зонах *спрединга*, это вещество, которое не испытывает плавления, должно подниматься вверх вместе с потоком истощенного мантийного *перидотита* и базальтовыми выплавками и претерпевать при этом фазовые превращения в связи с декомпрессией. Общеизвестно, что *перидотит* по мере декомпрессии испытывает ретроградный переход *гранатовый перидотит* → *шпинелевый перидотит* → *плагиоклазовый перидотит* (т.е., по существу, *ультрамеланократовое габбро*). Декомпрессия мантийного *эклогита* может дать в конечном счете широкий спектр габбровых пород.

Таким образом, возникает вывод о возможности *рециклинга* твердого базитового вещества в верхней мантии. Такому рециклингу ничто не может препятствовать: плотность мантийного *эклогита* поначалу близка к плотности *перидотита*, а затем резко уменьшается с появлением новой, легкой минеральной фазы – *плагиоклаза*. Полному ретроградному преобразованию способствуют высокие температуры и медленное (сантиметры в год) воздымание мантийного потока под океаническим хребтом. Инверсия плотности и, следовательно, нарушение гравитационной устойчивости мантийного потока способствует всплыванию новообразованных габбровых сегрегаций в гораздо более плотном магнезиальном рестите и их латеральной концен-

трации в осевой части зоны спрединга. На глубинах 20-25 км или менее гравитационная сепарация в среде, обладающей реологическими свойствами вязкой жидкости и сопровождающаяся аккрецией габбровых сегрегаций в обстановке пластического течения, должна привести к формированию 3-го океанического слоя.

Сущность океанического разреза

Здесь мы на новой основе должны вернуться к забытым высказываниям отцов-основателей: еще Р. Дитц [Dietz, 1963, p. 951], обсуждая гипотезу расширения океанского дна, считал, что ложе океанов в сущности представляет собой обнаженную мантию, прикрытую тонким слоем базальтов и осадков: «Полезнее было бы применять термин «кора» (вносящий сейчас лишь путаницу) только по отношению к любому слою, покрывающему область конвек-

ционной циркуляции в мантии. Сиалические континентальные блоки удовлетворяют этому условию и потому представляют истинную кору... Океаны можно считать бескорыми».

Принципиальная схема эволюции мантийного вещества в координатах Р и Т, учитывающая частичное плавление и декомпрессию мантийного вещества в зонах спрединга, изображена на рис. 6. Представить эту модель в наглядном виде можно и на основе того же изображения идеи современной океанической парадигмы (см. рис. 1) с единственной поправкой – ликвидацией гипотетической магматической камеры, в которой рождаются кумуляты, формирующие 3-й океанический слой (рис. 7).

Таким образом, в предлагаемой модели разрез литосферы зоны спрединга состоит из двух химически различных мантийных слоев (очень мощного, практически бездонного, перидотитового, и габбрового слоя ограниченной

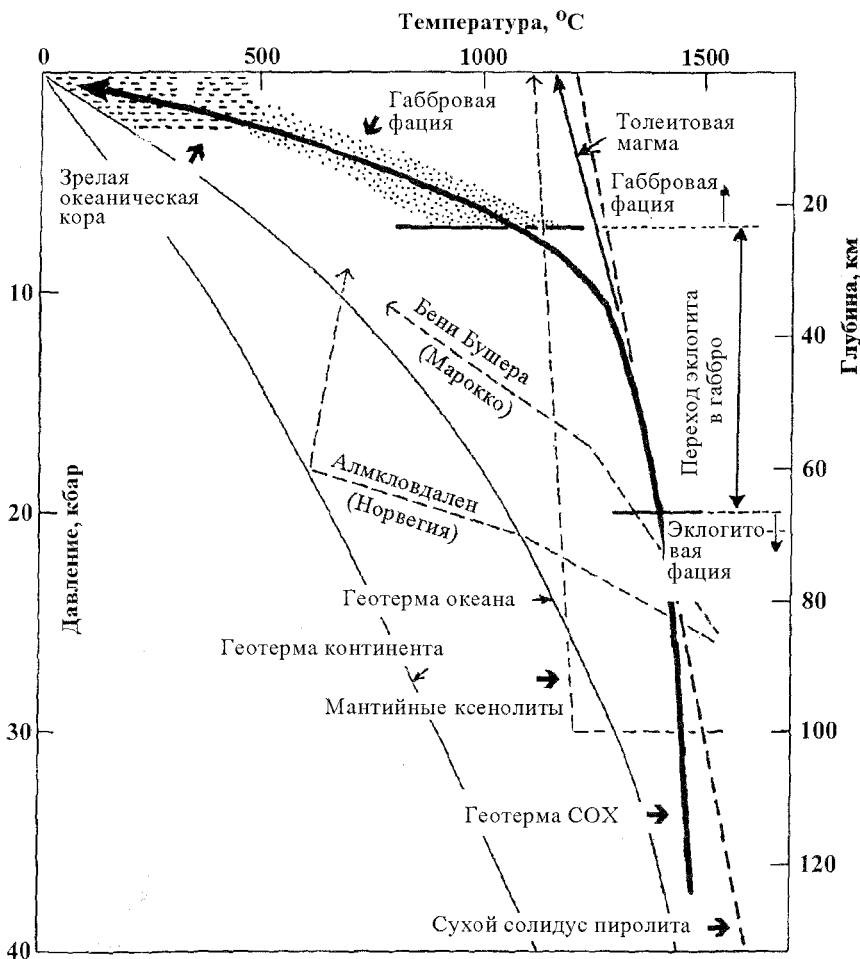
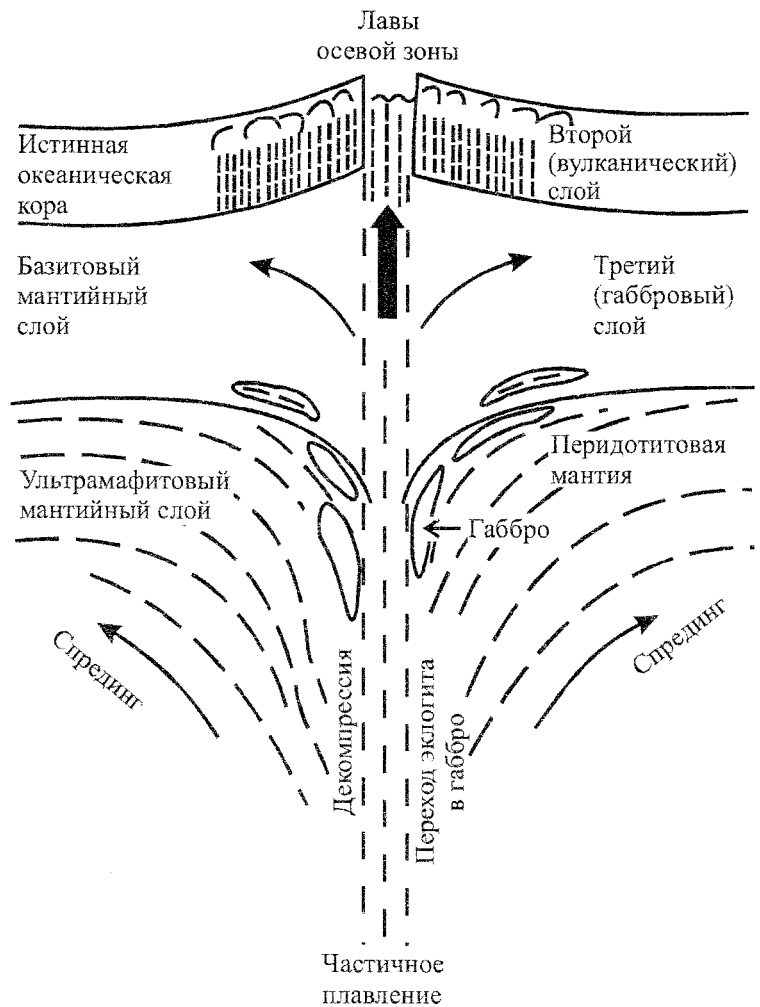


Рис. 6. Принципиальная схема в координатах Р и Т эволюции мантийного базит-гипербазитового вещества при его подъеме в зоне спрединга [Ефимов, 1984].

Неистощенное мантийное вещество (пиролит) на глубинах в 60-20 км расщепляется на толентовую магму и тугоплавкий остаток. В последнем преобладает предельно магнизальный (дунит-гарцбургитовый) рестит, по мере декомпрессии испытывающий ретроградный переход гранатовый перидотит → шпинелевый перидотит → плагиоклазовый перидотит (т.е., по существу ультрамеланократовое габбро); однако в нем могут присутствовать тела тугоплавких мантийных базитов (эклогитов), по мере падения давления преобразующихся в габбро (эклогит → гранатовый гранулит → двупирок-

сеновый гранулит → габбро). Процессы в переходной области, сопровождающиеся инверсией плотности, приводят к резкому нарушению гравитационной устойчивости внутри восходящего потока и гравитационной дифференциации с обособлением скоплений габброидного

Рис.7. Наглядная схема, иллюстрирующая эволюцию вещества мантии при его подъеме в зоне спрединга, принципиально отличающаяся от существующей канонической схемы (см. рис. 1) лишь одной особенностью – отсутствием гигантской осевой магматической камеры.



мощности, связанных химической переходной зоной, термодинамически единых и испытавших совместное пластическое течение), и вулканического слоя (базальтовые дайки, лавы), отделенного от двух первых резким геологическим и термодинамическим разделом – поверхностью конвекционной ячейки зоны спрединга, которая одновременно является границей между хрупкой и пластичной реологическими зонами океанической литосферы. Можно сформулировать это представление, в соответствии с приведенной формулировкой Р.Дитца, еще проще: океанический (и, соответственно, офиолитовый) разрез сложен твердым остаточным веществом верхней мантии (перидотитовый фундамент + 3-й слой), прикрытым слоем базальта (2-й слой), который и только который представляет собой истинную океаническую кору.

Заключение

Можно предсказать: события будут развиваться так, что через какое-то время наступит всеобщее осознание того, что в расслоенности габбро запечатлены пластическое течение и метаморфическая дифференциация твердого вещества, но не фракционная кристаллизация жидкости. Это неизбежно; некоторые из западных авторов находятся на полпути к этому ключевому выводу. Однако, пока что они заняты попытками построения паллиативных моделей, имеющих целью примирить факт отсутствия магматических камер и наличия пластического течения в габбро с кумулятивной догмой. Последняя же настолько сильна, что

для западных авторов сделать следующий логический шаг – предположить, что и само вещество океанических габбро образовалось не из жидкости – представляется в ближайшем будущем без предварительной подготовки почти невыполнимым. Это означает, что российская наука имеет время высказаться. Разумеется, чтобы инициировать мировую дискуссию, нужен новый фактический материал. Имеется три главных, решающих пункта, обоснование которых будет означать, что возможна мировая дискуссия о природе 3-го слоя современных и древних океанов.

1. Данные морской геофизики, касающиеся постулируемых петрологами современных магматических камер, а точнее – их отсутствия. Эти уже имеющиеся данные весьма корректны и доказательны.

2. Природа расслоенности в габбро. По видимому, новейший мировой материал будет непрерывно подтверждать наш тезис о динамометаморфической сути полосатых текстур.

3. Недостающее звено – это фактичес-

кий материал, требующий дополнительного изучения. Имеется в виду критический пересмотр строения древней магматической камеры в офиолитах, вернее, того, что за нее принимают. Сложность задачи состоит в том, что такой материал может быть добыт, по-видимому, на единственном в мире объекте – на Оманском офиолитовом комплексе. Все другие объекты малоизвестны, неполны или неубедительны. Критическому пересмотру подлежит, прежде всего, зона сочленения габбрового разреза с дайками. Можно предсказать: тщательное изучение этого главнейшего в древней океанической литосфере раздела подтвердит, что мы имеем здесь не кровлю магматического бассейна, а зону сложных динамических и метаморфических явлений на границе твердопластичной мантии и хрупкой новообразованной базальтовой океанической коры, или, иными словами, зону контакта океанической конвекционной ячейки с неовулканической океанической корой.

Последствия такой дискуссии трудно-представимы. Можно сделать прогноз: пересмотр офиолитовой парадигмы может повлечь за собой ревизию учения о расслоенных интрузиях, пребывающего в состоянии полной стабильности чуть ли не 100 лет, это неизбежно затронет проблему анортозитов древних щитов, планетарную проблему габбровой коры Луны, а в конечном счете – фундамент современной глобальной и планетарной петрологии. Отсюда следует, что проблема третьего слоя современных и древних океанов приобретает общенаучное значение.

Список литературы

Глубинные ксенолиты и верхняя мантия. Новосибирск: Наука, 1975. 271 с.

Грин Д.Х., Рингвуд А.Э. Экспериментальное изучение перехода габбро в эклогит и применение результатов этого изучения в петрологии // *Петрология верхней мантии.* М.: Мир, 1968. С. 9-77.

Грин Д.Х., Рингвуд А.Э. Происхождение магматических пород известково-щелочного ряда // *Петрология верхней мантии.* М.: Мир, 1968. С. 118-131.

Ефимов А.А. «Горячая тектоника» в гипербазитах и габброидах Урала // *Геотектоника.* 1977. № 1. С. 24-44.

Ефимов А.А. Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М.: Наука, 1984. 232 с.

Ефимов А.А. Природа троктолита // *Доклады АН СССР.* 1985. Т. 281. № 6. С. 1419-1423.

Ефимов А.А. Метаморфическая дифференциация: механизм образования анортозитовых сегрегаций в габбро Довыренского массива (Северное Прибайкалье) // *Геохимия.* 1989. № 7. С. 1042-1046.

Ефимов А.А., Ефимова Л.П., Маегов В.И. Стронций в плагиоклазе уральских габбро: петрогенетический и прикладной аспекты // *Геохимия.* 1989. № 11. С. 1541-1553.

Ефимов А.А., Пучков В.Н. О происхождении офиолитовой ассоциации. Свердловск: УИЦ АН СССР, 1980. 63 с.

Ballu V., Dubois J., Deplus C., Diament M., Bouvalor S. Crustal structure of the Mid-Atlantic Ridge south of Kane fracture zone from seafloor and sea surface gravity data // *J. Geophys. Res.* B. 1998. Vol. 103. N2. P. 2615-2631.

Boudier F., Nicolas A. Nature of Moho transition zone in the Oman ophiolite // *J. Petrol.* 1995. Vol. 36. N 3. P. 777-796.

Boudier F., Nicolas A., Ildefonse B. Magma chambers in the Oman ophiolite: fed from the top and bottom // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. Vol. 144. P. 239-250.

Coleman R.G. Ophiolites. An ancient oceanic lithosphere? New York: Springer Verlag, 1977. 229 p.

Detrick R.S., Mutter J.C., Buhl P., Kim J.J. No evidence from multichannel reflexion data for a crustal magma chamber in the MARK area on the Mid-Atlantic Ridge // *Nature.* 1990. Vol. 347. N 6288. P. 61-64.

Dietz R.S. Alpine serpentinites as oceanic rind fragments // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1963. Vol. 34. P. 947-952.

Greenbaum D. Magmatic processes at oceanic ridges, evidence from the Troodos massif, Cyprus // *Nature Phys. Sci.* 1972. Vol. 238. P. 18-21.

Kelemen P.B., Koga K., Shimizu N. Geochemistry of gabbro sills in the crust-mantle transition zone of the Oman ophiolite: Implications for the origin of the oceanic lower crust // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. Vol. 146. N3-4. P. 475-488.

Kent G.M., Harding A.J., Orcutt J.A. Distribution of magma beneath the East Pacific Rise between the Clipperton Transform and the 9°17'N Deval from forward modeling of common depth point data // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. N 8. P. 13945-13969.

Kornprobst J. Le massif ultrabasique des Beni Bouchera (Rif Interne, Maroc) // *Contrib. Miner. Petrol.* 1969. Vol. 23. P. 283-322.

Kushiro J., Yoder H.S. Anorthite-forsterite and anorthite-enstatite reactions and their bearing on the basalt-eclogite transformation // *J. Petrol.* 1966. Vol. 7. N 3. P. 337-362.

Lewis B.T.R. The process of formation of oceanic crust // *Science.* 1983. V. 220. N 4593. P. 151-157.

Malpas J., Brace T., Dunsworth S.M. Structural and petrologic relationships of the CY-4 drill hole of the Cyprus Crustal Study Project // *Malpas J. et al. (Eds.). Cyprus Crustal Study Project: Initial report, Hole CY-4.* 1989, Pap. Geol. Survey of Canada 88-9. P. 39-67.

Meurer W.P., Boudreau A.E. Petrology and mineral compositions of the Middle Banded series of the Stillwater Complex, Montana // *J. Petrology*. 1996. Vol. 37. P. 583-607.

Meurer W.P., Klüber S., Boudreau A.E. Discordant bodies from olivine-bearing zones III and IV of the Stillwater Complex, Montana – evidence for postcumulus fluid migration and reaction in layered intrusions // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1997. Vol. 130. P. 81-92.

Nicolas A. Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere. Boston, Mass., Kluwer Academic Press, 1989. 367 p.

Nicolas A., Boudier F. Rooting of the sheeted dike complex in the Oman ophiolite // *Tj. Peters et al. (Eds.). Ophiolite genesis and evolution of the oceanic lithosphere.* Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. P. 39-54.

Obata M. The Ronda peridotite: garnet-, spinel-, and plagioclase-lherzolite facies and the PT-trajectories of a high-temperature mantle intrusion // *J. Petrol.* 1980. Vol. 21. N 3. P. 533-572.

Paces J.B., Miller J.D. Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, Northeastern Minnesota: Geochronological insight to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with 1.1 Ga midcontinent rift system // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. N 8. P. 13997-14013.

Parrot J.-F., Ricou L.-E. Evolution des assemblages ophiolitiques au cours de l'expansion océanique // *Can. ORSTROM. Geol.* 1976. Vol. 8. N 1. P. 49-68.

Ramberg H. Experimental model studies of rift-valley system // *Tectonics and geophysics of continental rifts.* Dordrecht etc. 1978. Vol. 2. P. 39-40.

Quick J.E., Denlinger R.P. Ductile deformation and the origin of layered gabbro in ophiolites // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. N 8. P. 14015-14027.

Sinha M.C. et al. Magmatic processes at slow spreading ridges: Implications of the RAMESSES experiment at 57°45' N on the Mid-Atlantic Ridge // *Geophys. J. Int.* 1998. 135. N 3. P. 731-745.

Sinton J.M., Detrick R.S. Mid-ocean ridge magma chambers // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 197-216.

Smewing J.D. Mixing characteristics and compositional differences in mantle-derived melts beneath spreading axes: Evidence from cyclically layered rocks in the ophiolite of North Oman // *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. N 4. P. 2645-2659.

Smith C.H. Bay of Islands igneous complex, Western Newfoundland // *Mem. Geol. Surv. Canada.* N 290. 1958. 132 p.

Wager L.R., Deer W.A. Geological investigations in East Greenland. 3. The petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerdlugssuaq, East Greenland // *Medd. Greenland.* 1939. Bd. 105. N 4. 352 p.

Рецензенты Савельева Г.А., Чашухин И.С.