

УДК 551.24

ПРОБЛЕМА ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЙ В “ТВЕРДЫХ” ОБОЛОЧКАХ ЗЕМЛИ И ИХ РОЛИ В ГЕОТЕКТОНИКЕ

© 2006 г. Е. Г. Мирлин

Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 2

Поступила в редакцию 19.12.2005 г.

Структуры земной коры, имеющие форму вихря или спирали, были открыты в первой трети XX века; с тех пор в различных геотектонических обстановках выявлены разномасштабные структуры сходного облика, однако они так и не получили адекватного геотектонического истолкования. Учитывая специфику вихревого движения, проанализирована эволюция структурной геометрии котловин Северной Атлантики, а также различных звеньев глобальной системы срединно-океанских хребтов. Показано, что при океанообразовании в “твердых” оболочках Земли происходят вихревые движения и образуются масштабно инвариантные рифтовые и спрединговые системы с тенденцией к вихреобразному закручиванию оси раздвига. Размеры этих систем меняются более чем на два порядка. Ряд геотектонических феноменов, сопровождающих океаногенез: сегментация океанского ложа и пассивных окраин континентов, складчатые деформации осадочного чехла в их пределах, тектоническая расслоенность океанской литосферы могут быть обусловлены вихревыми движениями разного ранга. Континентальные вихревые структуры также имеют чрезвычайно значительный диапазон размеров и приурочены к структурным комплексам различного возраста. В качестве примера рассмотрены вихревые структуры Средиземноморского пояса. Природа вихревых движений при едином физическом механизме их возникновения обусловлена динамикой различных по глубине внутренних оболочек. Движения данного типа могут осуществляться только в нелинейной и неравновесной среде; это означает, что теоретической основой будущей концепции, которая в настоящее время идет на смену тектонике плит, будет являться нелинейная термодинамика сильно неравновесной среды.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря тектонике литосферных плит, утвердилось представление о том, что основным типом движения, определяющим строение и эволюцию литосферы, являются конвективные течения в мантии. Рассматривались различные физические варианты конвекции: считалось, что она является чисто тепловой, причем были предложены различные ее модификации [6, 26, 45]; затем были разработаны гравитационная [2], химико-плотностная [11] и термохимическая [13] модели циркуляции вещества в мантии. Однако при всех различиях физической основы конвекции общим для всех моделей является поступательно-вращательные конвективные потоки мантийного вещества, которые могут охватывать всю мантию, либо отдельно верхнюю и нижнюю ее части, либо образовывать несколько ячеек.

Важное геодинамическое значение придается другому типу движения – волновым и колебательным процессам различной природы и различного пространственно-временного масштаба: от микросейсм до волновых движений, обусловленных взаимодействием Земли с другими объектами Солнечной системы, в частности, колебательной эволюции системы Земля–Луна [1].

Однако из рассмотрения практически выпала роль еще одного типа движения: вихревого. Это выглядит как серьезный пробел в современных геотектонических доктринах, по крайней мере, по трем причинам. Во-первых, вихревые структуры литосферы были открыты уже достаточно давно: в первой трети XX века [35], и их наличие уже само по себе может указывать на присутствие перемещения вещества соответствующего типа. С тех пор в различных тектонических обстановках выявлены разномасштабные структуры сходного структурно-геометрического облика [3, 16, 23, 40 и др.]; тем не менее, разноранговые вихревые структуры так и не получили адекватного геотектонического истолкования.

Во-вторых, современные представления о свойствах внутренних (твердых) оболочек Земли дают веские основания предполагать, что в них возможно развитие вихревых движений, аналогичных тем, которые хорошо изучены во внешних оболочках нашей планеты: водной и воздушной, но, разумеется, в принципиально иных временных масштабах. Реальная геосреда, как показано М.А. Садовским и его школой [17], обладает блочно-иерархической структурой во всех пространственно-временных масштабах, нелинейна, энергетически активна, что придает ей свойства

текучности и “и она совсем не походит на укоренившуюся в нашем воображении земную твердь” [22]. Концепция нелинейной среды [33] и нелинейной геодинамики [19], наряду с представлениями о неравновесных термодинамических процессах в литосфере [5, 29], открывает широкие возможности для более глубокого истолкования природы многих геотектонических феноменов и является методологической базой для рассмотрения проблемы вихревых движений в оболочках Земли, которые принято считать “твердыми”.

Наконец, в-третьих, во всех вышеупомянутых моделях конвекции, в которых основным элементом является течение вещества с относительно невысокой вязкостью, по умолчанию предполагается, что эти потоки не сопровождаются возникновением вихревой компоненты, что по физическим соображениям является практически невероятным. Известно, что подавляющее большинство течений вязких жидкостей, которые происходят в природе (а конвективные течения рассматриваются именно в таком качестве), представляют собой именно вихревое движение [27]. Причиной возникновения вихрей в различных средах является гидродинамическая неустойчивость течений в них, а также динамическая неустойчивость поверхностей раздела с различными физическими свойствами [9, 24]. Следует ожидать, что указанные конвективные потоки также будут сопровождаться вихревыми процессами, хотя бы вследствие влияния неравномерности вращения Земли, периодическим взаимодействием ее с другими космическими объектами и, возможно, воздействием других факторов глобального, регионального и локального масштабов.

Совершенно очевидно, что в одной работе охватить все аспекты проблемы вихревых движений во внутренних оболочках Земли невозможно, и мы ограничились рассмотрением двух взаимосвязанных задач:

– анализ геотектонических феноменов (скорее всего, далеко не всех), природа которых остается спорной в рамках существующей парадигмы, но возникновение которых может быть обусловлено именно вихревыми движениями;

– анализ (на качественном уровне) возможной природы вихревых движений в “твердых” оболочках Земли с учетом современных представлений о свойствах геосреды.

Прежде чем перейти к рассмотрению конкретного материала отметим, что согласно определению вихревого движения, вовлеченные в него массы вещества перемещаются не только поступательно, но и испытывают закручивание, при этом малые объемы (частицы вещества) внутри вихрей кроме поступательного движения вращаются вокруг некоторой мгновенной оси [27]. Отсюда следует, что при наличии вихревого движе-

ния во внутренних оболочках Земли выявление свойственной ему специфики будет наиболее надежным, если имеются данные не только о современной геометрии структур, но и об изменении ее во времени. Это, в первую очередь, относится к образованию океанских впадин, благодаря тому, что имеется возможность проследить эволюцию их структурной геометрии. Что касается континентальной литосферы, то возможность для такого анализа более ограничена; отчасти он возможен для регионов, охваченных детальными палеомагнитными исследованиями. Современная кинематика блоков может быть установлена с помощью спутниковых геодезических систем GPS. В связи со сказанным мы более подробно рассмотрим различные геотектонические феномены, сопровождающие океаногенез, а затем перейдем к данным о вихревых структурах континентальной литосферы. Кроме того, уделим специальное внимание возможной природе мантийных “плюмов” с позиций вихревого движения.

ВИХРЕВЫЕ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ОКЕАНОГЕНЕЗЕ И ИХ ВОЗМОЖНАЯ ПРИРОДА

Формирование океанских впадин сопровождаются разнообразными явлениями, возникновение которых может быть связано с вихревыми движениями [16]. Рассмотрим эти явления, а также возможную природу самих движений.

Эволюция структурной геометрии океанских впадин. Для нее свойственны две особенности: продвижение оси раздвига и ее закручивание. Продемонстрируем это на примере Северной Атлантики, которая представляет собой один из наиболее детально изученных регионов Мирового океана. В ее эволюции весьма отчетливо прослеживается продвижение оси раздвига с юга (от экваториальной области) на север, начиная с поздней юры. В раннем мелу (120 млн. лет) это продвижение продолжалось, в результате чего началось раскрытие Северной Атлантики к северу от Азорских островов. Однако это раскрытие осложнялось тем, что наряду с основным “стволом” раздвига от него ответвлялись побочные “ветви”, которые со временем отмирали. К ним относятся: трог Рокколл, Бискайский залив, раскрытие которого сопровождалось вращением Иберийского полуострова, впадина Лабрадорского моря, а также котловины Поркьюпайн и Баффинова (рис. 1а). Ко времени следующего временного среза 90 млн. лет назад растяжение по всей вероятности прекратилось в Бискайском заливе, в трог Рокколл и во впадине Поркьюпайн, но продолжалось в Лабрадорском море и, предположительно, в Баффиновой котловине (рис. 1б).

Характерно, что отделение Гренландии от Евразии началось около 60 млн. лет назад не вдоль уже

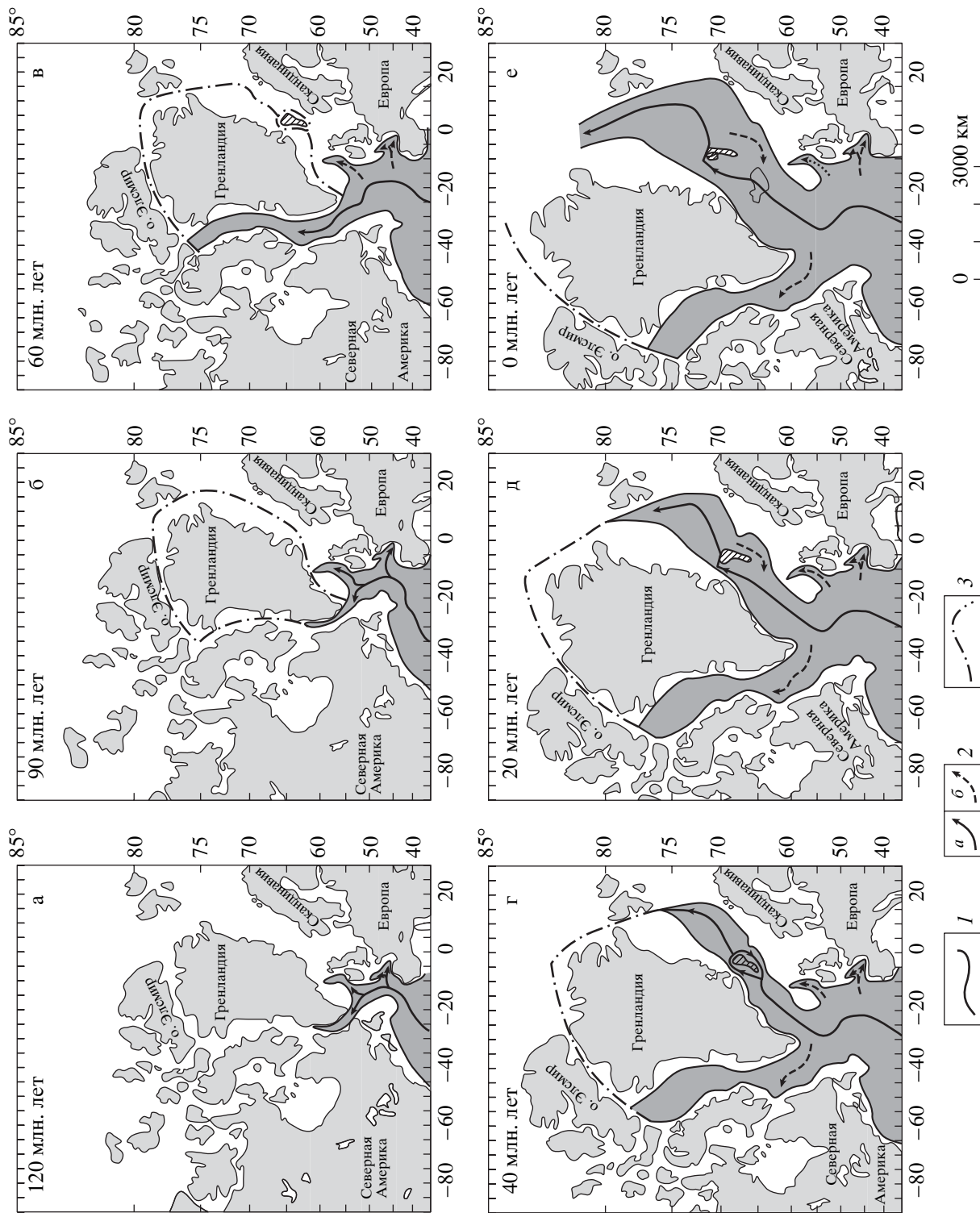


Рис. 1. Развитие вихреобразных спрединговых систем Северной Атлантики на основе палеогеодинамических реконструкций [42]. Возрастные срезы указаны на рисунке
 1 – граница океан–континент; 2 – направление продвижения спрединговых систем; а – активных, б – отмерших; 3 – линия первоначального раскрытия

существовавших к тому времени континентальных рифтов, а значительно западнее: вдоль осевой линии срединно-океанских хребтов Рейкьянес, Кольбейнсей и Мона. В это же время заложились спрединговые зоны к юго-востоку и северо-западу от глыбового хребта Ян-Майен, в результате чего он обособился в самостоятельную, небольшую по размеру континентальную литосферную плиту (рис. 1в).

К 40 млн. лет прекратился процесс океанообразования в Лабрадорском море и в Баффиновой котловине и продолжала отчетливо проявляться генеральная тенденция продвижения океаногенеза на север в результате отделения Гренландии от Евразии. Однако, как и на предыдущих этапах, продвижение оси раздвига было не простым. В данном случае оно было осложнено присутствием Ян-Майенской микроплиты и ее вращением против часовой стрелки вокруг полюса, расположенного в непосредственной близости от острова Ян-Майен. Это вращение сопровождалось формированием двух вихреобразных спрединговых систем. При этом продвижение северо-западной системы происходило субпараллельно генеральному направлению продвижения оси раздвига Северной Атлантики, т.е. примерно на север, а развитие юго-восточной ветви (в Норвежской котловине) отмечено продвижением, направленным почти навстречу ему (рис. 1г).

В период 40–20 млн. лет на месте Шпицбергенской сдвиговой зоны также вследствие продвижения оси раздвига в северном направлении сформировался срединно-океанский хребет Книповича. В результате развития указанных срединно-океанских хребтов (СОХ) тенденция закручивания продвигающейся генеральной зоны раздвига Северной Атлантики, наметившаяся на предыдущем этапе, получает свое отчетливое завершение (рис. 1д). Наконец, строение Северной Атлантики в современную эпоху (рис. 1е) наглядно демонстрирует итоги рассмотренной выше эволюции: развитие как основной зоны раздвига, так и второстепенных включает в себя их продвижение и одновременное закручивание. Благодаря этому океанский бассейн является не единым, а состоит из системы вихреобразных в плане впадин с океанской корой, имеющих различный размер, различный возраст и самостоятельную систему спрединга. Соответственно, кроме крупных континентальных массивов Евразии, Северной Америки и Гренландии, образовавшихся в результате океаногенеза, существует целая система “отторженцев” (по Ю.М. Пуцаровскому): микроконтинентов и приподнятых блоков с субконтинентальной корой (Ян-Майен, Хаттон, Рокколл и др.).

Рассмотренные основные тенденции в эволюции Северной Атлантики: продвижение оси и ее закручивание свойственны и другим спрединго-

вым бассейнам Мирового океана. При этом диапазон размеров вихревых систем чрезвычайно велик. Так, на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП), конфигурация которого представляет собой вихрь протяженностью свыше 7000 км, располагаются микроплиты Хуан Фернандес и Пасхи, обрамленные отчетливо выраженными вихреобразными в плане спрединговыми зонами протяженностью 300–500 км (рис. 2). Их границами являются псевдоразломы, образовавшиеся при продвижении оси раздвига. Перекрывающиеся оси спрединга (ПОС), проявленные в морфоструктуре гребня ВТП в виде удлинённых невысоких возвышенностей протяженностью от первых до первых сотен километров в области перекрытия, также могут быть отнесены к вихревым образованиям, поскольку обнаруживают отчетливые признаки вихреобразного закручивания при продвижении оси раздвига. В Индийском океане рифт Таджура в совокупности с зоной спрединга Аденского залива, Аравийско-Индийским и Центральным-Индийским СОХ представляет собой гигантский вихрь, как бы вторгающийся в глубь Африканского континента и имеющий протяженность около 8000 км. Отчетливо проявлена тенденция к вихреобразному закручиванию Западно-Индийского СОХ вблизи тройного сочленения Родригес. Многие задуговые бассейны в переходной зоне от Тихого океана к Азиатскому континенту, образовавшиеся в результате растяжения, также представляют собой вихреобразные в плане спрединговые системы разного размера. В целом, количественные характеристики структурных систем такого типа в Мировом океане меняются более чем на два порядка, другими словами, вихри обладают масштабным самоподобием. Размеры образовавшихся при распаде Пангеи континентальных массивов также отличаются более чем на два порядка, хотя при более детальных исследованиях и микроконтиненты разделяются на отдельные блоки еще меньшего размера.

Разноранговые литосферные плиты и блоки также геометрически самоподобны, и тестирование их на принадлежность к фрактально организованному объектам дало положительный результат [44]. Возникновение элементов самоподобия в процессе эволюции литосферы несомненно является дополнительным указанием на то, что она представляет собой открытую, нелинейную динамическую систему, в которой происходят процессы самоорганизации [33] и в которой вполне возможно развитие разномасштабных вихревых движений. В пользу их свидетельствует также и неустойчивость океаногенеза: смещение во времени и в пространстве оси раздвига. Это, вероятно, отражает неустойчивость динамики конвективных потоков, что является важнейшим условием возникновения вихрей.

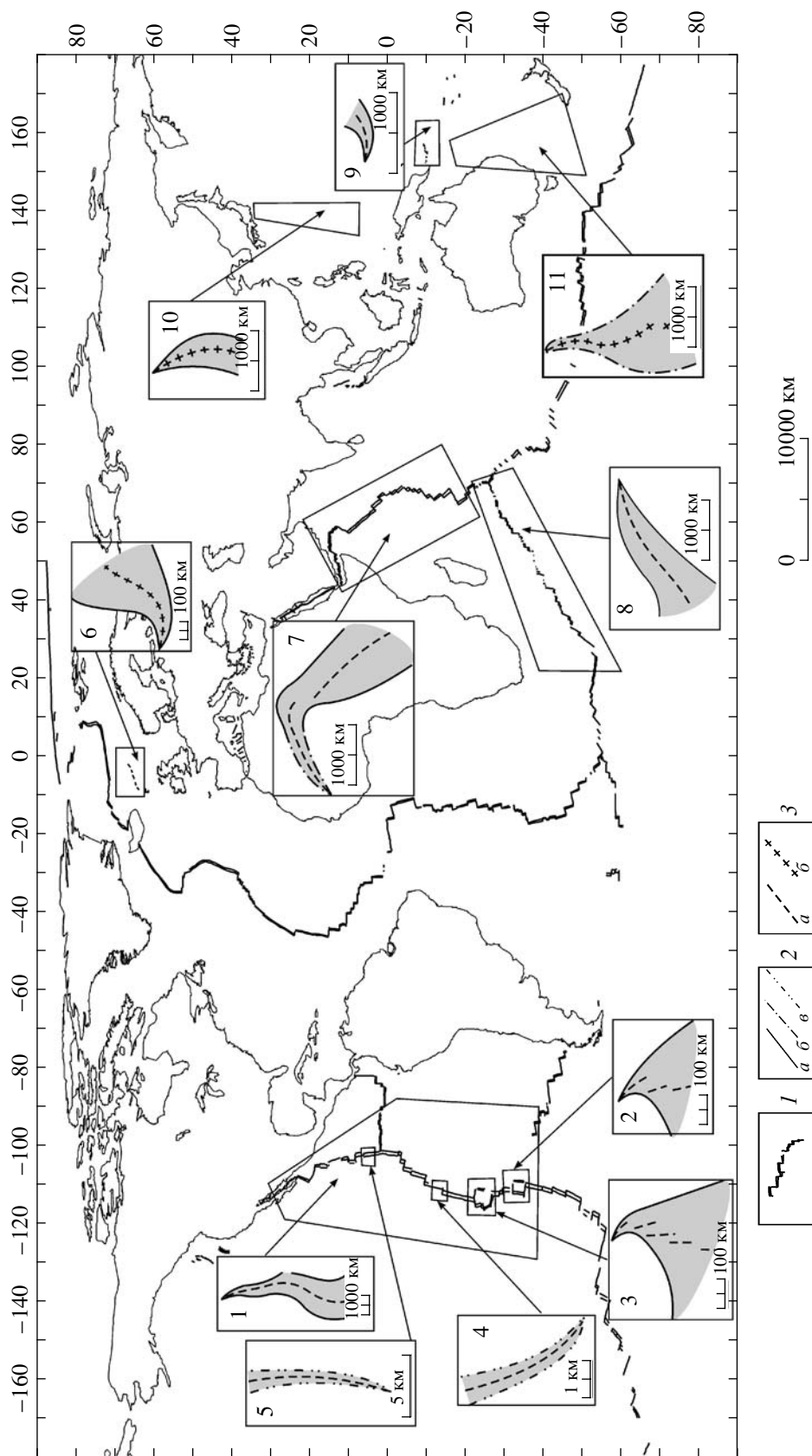


Рис. 2. Вихревые системы в Мировом океане: 1 – Восточно-Тихоокеанское поднятие; 2, 3 – зоны спрединга микроплит; 2 – Хуан Фернандес, 3 – Пасхи; 4, 5 – ветви перекрывающихся осей спрединга на гребне ВТП; 4 – близ 12°55' ю.ш., 5 – близ 5°30' с.ш.; 6 – Норвежская котловина; 7 – рифт Таджура, Аденский залив, Центральнo-Индийский СОХ; 8 – Западно-Индийский СОХ; переходная зона от Тихого океана к Азиатскому континенту; 9 – Соломонова котловина; 10 – котловина Сикоку-Паресе Вела; 11 – Тасманово море.
 1 – оси СОХ; 2 – ограничения вихревых систем; а – вдоль изохрон океанской коры и псевдоразломов, б – вдоль границы океан-континент, в – вдоль подножия осевых поднятий на гребне ВТП; 3 – оси спрединга; а – активного, б – отмершего

Рассмотрим возможную их природу. Гигантские различия в размерах океанских вихревых структур свидетельствуют о том, что при едином физическом механизме природа вихревых движений связана с динамикой существенно различных по глубине внутренних оболочек Земли. Так вихри глобального масштаба (размером многие тысячи км) могут быть обусловлены тем, что, по крайней мере, некоторые из оболочек вращаются вокруг центральной оси с различной скоростью и, следовательно, происходит их смещение друг относительно друга. К этому склоняются в настоящее время многие исследователи и это, действительно, выглядит вполне вероятным, учитывая различные физические характеристики оболочек: в особенности, их интегральную плотность и вязкость. Если имеет место, к примеру, дифференциальное вращение нижней и верхней мантии, верхней мантии и литосферы, то это, по существу, эквивалентно течению в мантии [28], которое, скорее всего, неустойчиво вследствие причин, указанных выше. Неустойчивость динамической поверхности раздела, которая возникает вследствие разной скорости вращения оболочек, порождает вихревую компоненту движения и, как следствие, тенденцию к вихреобразному закручиванию зон раздвига при распаде мегаконтинента.

Природу вихревой компоненты движения при образовании задуговых и междугоковых спрединговых бассейнов западной и юго-западной окраины Тихого океана можно связать с самим процессом субдукции относительно древней, холодной и тяжелой литосферы Тихого океана под относительно легкую и горячую литосферу Евразии, как это имеет место в области сближения Тихоокеанской и Евразийской плит. Зона субдукции – это динамическая поверхность раздела, где доминирует сдвиг одной плиты относительно другой и, одновременно, сжатие. Такого рода явление, по существу, можно рассматривать как аналог теплового атмосферного фронта, в котором холодный и относительно тяжелый воздух “подныривает” (субдуцируется) под относительно легкий и теплый. Отметим, что взгляд на субдукцию как на своеобразный аналог атмосферного фронта не является абсолютно новым, и в геологической литературе такие сравнения уже проводились [3, 25]. Атмосферный фронт – это динамическая поверхность раздела масс с различными физическими характеристиками (как и зона субдукции, как и поверхность раздела между оболочками). Именно с атмосферными фронтами связано формирование вторичных атмосферных вихрей, которые возникают на участках искривления динамической поверхности раздела. Хотя, разумеется, речь идет о принципиально иных временных масштабах, физическая основа вихреобразования от этого не меняется: искривления и неустойчивость динамической границы раздела порождают вихревые движе-

ния как в атмосфере, так и в мантии в области сближения плит.

Вихревые движения, приводящие к формированию малых вихреобразных структур: перекрывающихся осей спрединга на гребне ВТП, могут быть обусловлены неустойчивостью потока вещества вдоль оси поднятия. Существование таких потоков постулируется на основе анализа структурного развития и интерпретации геофизических полей океанских рифтов. Характерно, что структурные формы, аналогичные ПОС, выявлены не только на быстро спрединговых СОХ в Тихом океане, но и на медленно спрединговых хребтах Рейкьянес и Кольбейнсей в Северной Атлантике, где присутствие потока вещества вдоль оси хребтов установлено с высокой надежностью [7].

Сегментация пассивных окраин континентов и океанского ложа. Разделение пассивных окраин и океанского ложа на сегменты разных порядков – явление, безусловно, глобального значения. Неоднократно обращалось внимание на то, что очертания в плане континентов (и, соответственно, океанов) имеют округлые формы. В плавные, закругленные контуры океанских впадин как бы вложена изломанная, ступенчатая геометрия, связанная с разноранговой сегментацией пассивных окраин континентов и океанского ложа. Весьма ярко эта особенность проявляется в конфигурации береговой черты западной, юго-западной и восточной Африки, восточной и юго-восточной Америки, в очертании южной Австралии – примеры можно было бы продолжить. Несомненно, что за этой геометрической “вложенностью” скрывается глубокий смысл. Действительно, прогресс в изучении физических характеристик твердых оболочек Земли привел к появлению такого понятия как “вложенность” процессов деформации, протекающих в этих оболочках [4]. Под вложенностью в общем случае понимается изменение механической модели среды, требуемое для описания изменений в коре и литосфере при переходе от одного пространственно-временного масштаба к другому. Как мы только что отметили, применительно к океанской литосфере вложенность просматривается уже на геометрическом уровне.

Рассмотрим это явление более детально на примере Мраморного моря. Этот регион особенно ценен с точки зрения рассматриваемой проблемы вихревых движений, поскольку в его пределах проведены измерения перемещения блоков методом спутниковой геодезии GPS, благодаря которым непосредственно наблюдаются два феномена, сопровождающие раскрытие любой океанской впадины: продвижение оси раздвига и ее закручивание.

Действительно, в соответствии с этими данными Анатолийская микроплита испытывает вра-

щательное вихреобразное движение относительно Евразийской плиты, что приводит к тому, что Северо-Анатолийский разлом (САР), который является границей плит, приобретает закругленные очертания (рис. 3а). В течение последних 10 млн. лет разлом продвигается в западном направлении, аналогично тому, как это происходит при расколе континентов. В районе Мраморного моря геодинамическая обстановка отвечает косому раздвигу, и происходит расщепление разлома на две ветви. Структурная геометрия впадины указывает на принадлежность ее к присдвиговым структурам растяжения типа pull-apart. Детальные геофизические исследования коры в пределах впадины позволили установить, что ветви САР не являются едиными, а также расщепляются на отдельные сегменты, диагональные и косые по отношению к генеральному простиранию. В результате образуются серии ромбовидных в плане впадин, имеющих меньшие размеры по сравнению с основной впадиной Мраморного моря. Возникают масштабно инвариантные ромбовидные структуры, четко прослеживаемые при переходе на все более крупный масштаб исследований (рис. 3б, 3в), что свидетельствует о фрактальном структурообразовании [15]. Вихреобразное вращение Анатолии сопровождается образованием сопряженных областей растяжения в южной и центральной частях Эгейского моря и сжатия – в его самой северной части (см. рис. 3а).

Детальные геофизические исследования границы океан–континент в некоторых регионах пассивных окраин Мирового океана (например, в Южной Атлантике) не только подтвердили сходную особенность структурной геометрии, но и выявили самоподобие ступенчатой конфигурации при переходе на более крупный масштаб исследования [15]. Многие из континентальных рифтов, которые традиционно рассматриваются как начальные стадии развития молодых океанов, также характеризуются изломанностью своих очертаний в плане и разделением на отдельные структурные сегменты [43]. При этом во многих из них обнаруживается кроме растяжения, перпендикулярного оси рифта, также и сдвиговая компонента, что позволяет отнести их к структурам типа pull-apart. В совокупности данные и о конфигурации континентальных рифтов, и о геометрии границы океан–континент позволяют сделать вывод о том, что раскол мегаконтинента Пангея произошел вдоль закругленных линий, которые, при рассмотрении их в более крупном масштабе имеют ступенчатую геометрию, хотя отчасти и унаследовали сутурные зоны фундамента. Отметим, что в рамках современной плейтотектонической парадигмы вопрос о вложенности процессов деформации и о геометрической вложенности применительно к океаногенезу вообще не ставится; чаще всего исследователи

ограничиваются рассмотрением взаимоотношения структурных связей континентальных и океанских рифтовых зон [8].

Специфика вихревого движения позволяет пролить свет на природу данного явления. На рис. 4 сопоставлены структурные формы атмосферного циклонического синоптического вихря (а), океанского бассейна, образованного под воздействием вихревого движения (б), и океанского бассейна, образованного по плитотектонической модели (в). Если разделение континентов и последующая эволюция океанской впадины происходят под воздействием вихревого движения, линии раскрытия приобретают округлые очертания в соответствии с геометрией вихревого потока. Скорость поступательно-вращательного перемещения вещества в нем меняется от внутренней его части к внешней (см. рис. 4а). Это приводит к возникновению компоненты сдвига в литосфере и является причиной того, что на ранней – континентальной стадии раскрытия океанской впадины, континентальные рифты приобретают черты, свойственные структурам pull-apart. Линия первоначального раскрытия океанской впадины (а в последующем – пассивная окраина), хотя и сохраняет закругленные очертания в генеральном плане, разделяется на отдельные сегменты, т.е. становится изломанной, пилообразной. Геометрия этой сегментации обладает свойством самоподобия в силу фрактальных свойств среды, о которых уже упоминалось выше. Кроме того, изменение скорости внутри вихревого потока стимулирует возникновение динамических поверхностей раздела внутри него и, соответственно, вихревых структур меньшего масштаба, которые также могут влиять на конфигурацию линии раскрытия.

На стадии полного разрыва континентальной коры и формирования зон спрединга специфика вихревого движения: вращательные движения различных объемов вещества вокруг самостоятельных осей будет вызывать напряжения кручения во вновь формируемой тонкой океанской литосфере, что и является, по всей вероятности, основной причиной возникновения ее разноранговой структурной кулисности – сегментации.

Итак, и геометрическая закругленность контуров континентов, и разнопорядковая сегментация океанского ложа связаны со спецификой вихревого движения. Но если возникновение первого феномена описывается, по-видимому, движением вязкой жидкости (вихревой поток), то природа второго наилучшим образом может быть истолкована на основе моделей механики сплошной среды (реакция хрупкой и упругой литосферы на воздействие вихревого потока).

Тектоническая расслоенность океанской литосферы. Установлено широкое распространение этого явления, которому посвящена обшир-

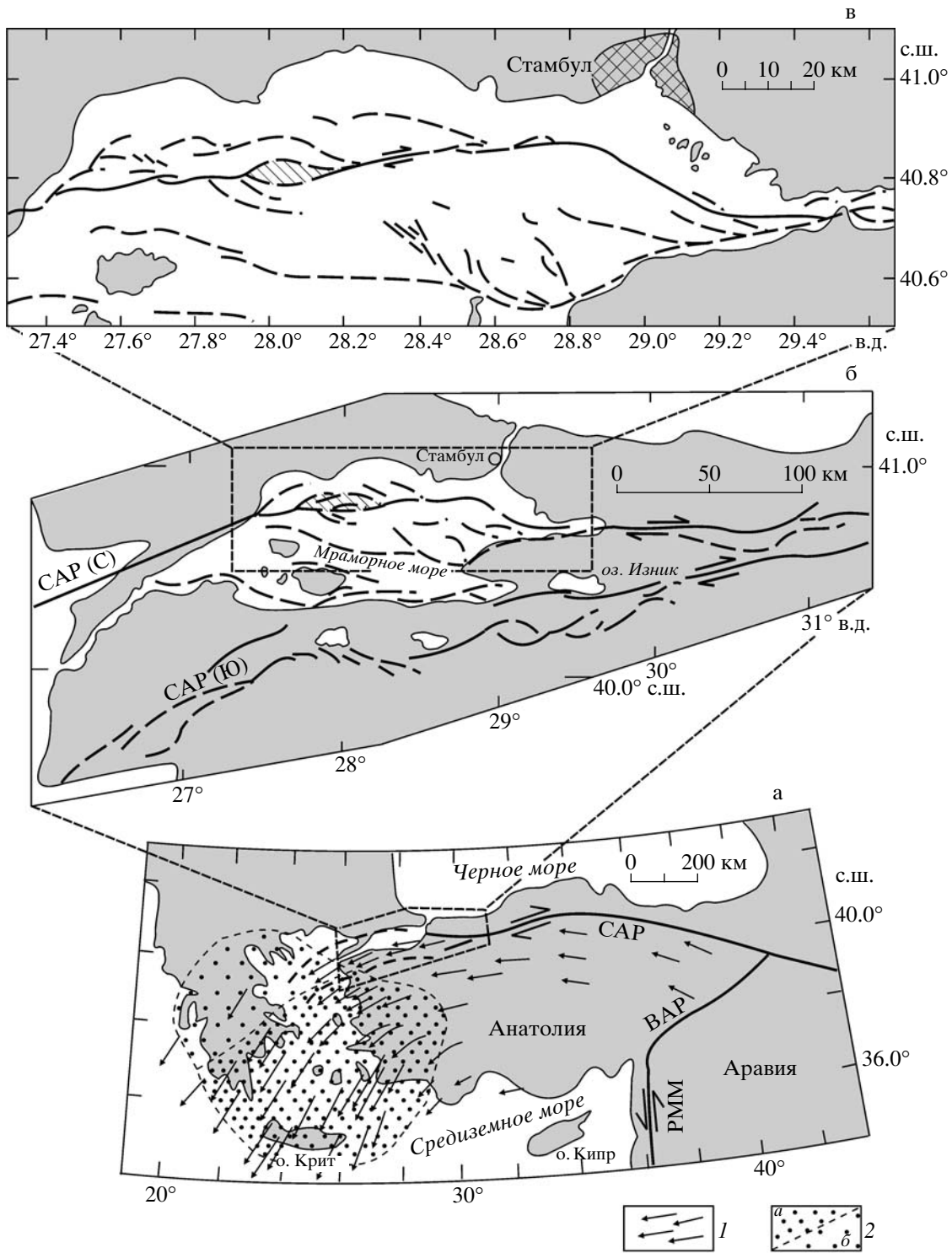


Рис. 3. Вихреобразное вращение Анатолийской микроплиты по данным GPS (а) и возникновение масштабно-инвариантных структур pull-аpart Мраморного моря (б, в) [по 30, 31]

1 – вектора перемещения Анатолийской плиты; 2 – области растяжения (а) и сжатия (б).

б, в – последовательное укрупнение масштаба. Разломы: SAR – Северо-Анатолийский: с – северная, ю – южная ветви, РММ – Мертвого моря, ВАР – Восточно-Анатолийский. Стрелки – направления смещений вдоль разломов. Здесь и далее сплошные и пунктирные линии – соответственно основные и второстепенные тектонические нарушения

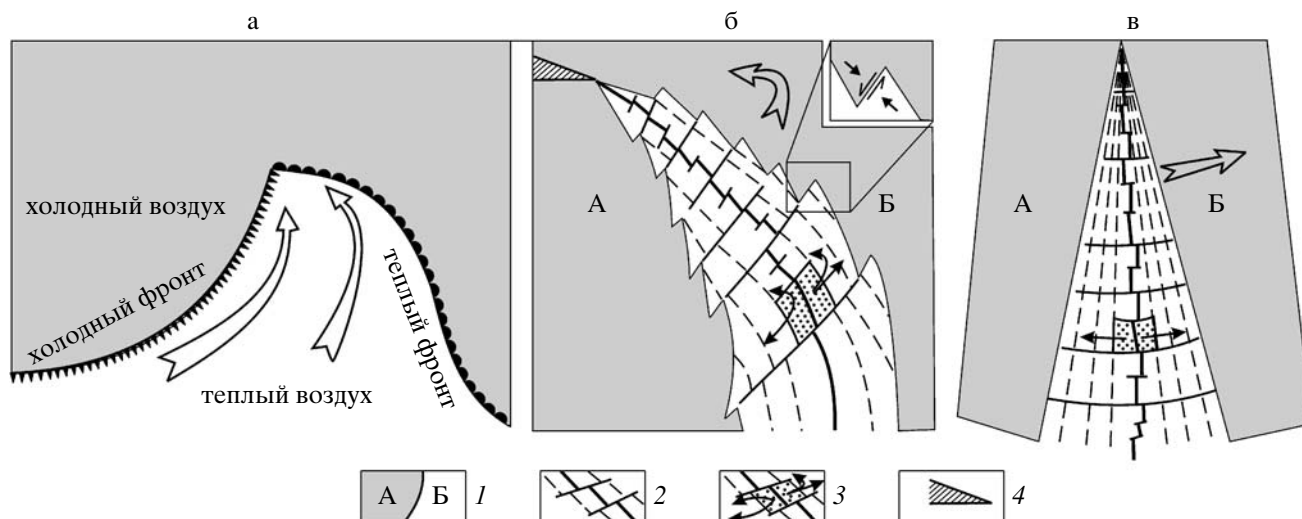


Рис. 4. Структурная форма атмосферного циклонического синоптического вихря (а, по [24], с упрощением); океанско-го бассейна, образованного под воздействием вихревого движения (б) и океанского бассейна, образованного по плитотектонической модели (в)

Стрелки на рис. 1а – направление перемещения теплого воздуха; на рис. 1б и 1в – направление перемещения континентальной плиты Б относительно континентальной плиты А

1 – кора континентальная (А) и океанская (Б); 2 – изохроны океанской коры и трансформные разломы, утолщенная линия – ось спрединга; 3 – элементарные объемы плит и направления их движения; 4 – область сжатия. На врезке – ориентировка напряжений на границе океанской и континентальной литосферы в период раскрытия океанского бассейна

ная литература, в том числе монографическая [18, 20 и др.]. В этих и других работах показано, что в основе возникновения данного феномена лежат горизонтальные или близкие к ним перемещения глубинных или близкоповерхностных масс горных пород, что и приводит к возникновению субгоризонтальных границ в коре и литосфере, а также к тектоническому сучиванию масс. На основе анализа результатов высокотехнологичного сейсмического профилирования в разрезе океанской коры были выявлены многочисленные наклонные рефлекторы и отражающие горизонты. Этот факт, а также результаты драгирования и глубоководного бурения, послужили основой для формулирования новых представлений об инфраструктуре и динамике верхней части океанской литосферы. При этом тектоническая природа выявленных горизонтальных поверхностей не подвергается сомнению. Отмечалось, что тектоническая расслоенность присуща не только современной океанской литосфере, но и древней: об этом свидетельствует строение разновозрастных офиолитовых комплексов.

Авторы работ, посвященных данному явлению, отмечают, что само понятие расслоенности литосферы основано на данных о широком распространении сдвиговых дислокаций. Из модели вихревого движения следует, что в случае воздействия вихревого потока на подошву литосферы в ней неизбежно должны возникать сдвиговые напряжения (разумеется, при условии, что ось вихря

расположена вертикально и, соответственно, плоскость потока горизонтальна). Относительно независимое вращение различных по размеру объемов вещества в таком потоке также будет способствовать субгоризонтальным смещениям одних блоков коры и литосферы относительно других и, следовательно, вызывать появление субгоризонтальных поверхностей раздела тектонической природы. Более того, вращение разноранговых блоков коры происходит независимо друг от друга – вокруг различных осей; это неизбежно влечет за собой возникновение сжимающих напряжений даже в гребневой зоне срединно-океанских хребтов. Это было подтверждено детальными сейсмическими наблюдениями в оси Срединно-Атлантического хребта, где на их основе было выявлено присутствие разрывных деформаций, возникших в условиях сжатия [20].

Разумеется, все изложенное представляет собой лишь качественную схему возникновения расслоенности океанской литосферы, на основе которой в дальнейшем возможно будет провести интерпретацию имеющихся материалов, а также выполнить количественные оценки.

Складчатые деформации в пределах пассивных окраин. Как следует из модели раскрытия океанской впадины под влиянием вихревого движения (рис. 4б), геодинамическая обстановка вдоль простирания границы разделения континентальных плит не остается постоянной, а меняется. По мере закручивания вихря возрастает

компонента сжатия; и чем сильнее выражено это закручивание, тем интенсивнее будет сжатие, что не может не отразиться на строении земной коры. И в самом деле, в области замыкания исключительно сильно закрученных вихревых структур, обрамляющих микроплиты Пасхи и Хуан-Фернандес на гребне ВТП, выявлены подводные хребты, образовавшиеся в результате сжатия [34]. Сходные по природе деформации коры микроплиты Горда в Тихом океане проявлены в искривлении и укорочении полосовых магнитных аномалий, а также в распределении и характере сейсмичности [46]. Но особый интерес вызывают складчатые деформации в пределах пассивных окраин континентов, которые не укладываются в широко распространенные плитотектонические модели их эволюции, но вполне объясняются с позиций вихревого движения.

Пассивные окраины отражают переход от океана к континенту внутри литосферной плиты; они образуются в результате фрагментации континента в ходе континентального рифтогенеза, затем отодвигаются от дивергентной границы и со временем превращаются в регионы с весьма сильным прогибанием коры и накоплением мощных осадочных толщ. Они не являются границами плит, и само их название свидетельствует об относительной тектонической пассивности: доминирующим является интенсивное прогибание, а другие тектонические движения исключаются.

Таков, вкратце, плитотектонический подход к их формированию и строению, который признается большинством исследователей. Однако интенсивные геофизические исследования, проведенные в их пределах за последние десятилетия благодаря высокой перспективности на нефть и газ, выявили очевидные признаки складчатых деформаций в некоторых регионах пассивных окраин. Рассмотрим их на примере зон сочленения пассивного типа весьма хорошо изученного Норвежско-Гренландского бассейна [32, 36, 37], эволюцию которого с позиций вихревых движений мы рассматривали выше.

Вопреки ранее существовавшим представлениям о тектонической стабильности регионов, окружающих этот бассейн, в их пределах выявлены отчетливые признаки тектонических движений в течение неогена: как вертикальных, так и горизонтальных. Отчетливые признаки деформации сжатия осадочной толщи установлены в пределах атлантической окраины Норвегии, Фарерских, Британских и Шетландских островов и вдоль юго-западной окраины Баренцева моря; выявлены они также на восточной окраине Гренландии (рис. 5). В средней части окраины Норвегии они проявлены в виде локальных возвышенностей, обрамленных со всех сторон взбросами. Некоторые из них проявлены в рельефе дна.

Вдоль восточной части трансформного разлома Ян-Майен возвышенности характеризуются отчетливо выраженным эшелонированным расположением. Основываясь на соотношении мощностей в сейсмических разрезах и на данных бурения, было определено время деформаций, которое колеблется для различных возвышенностей от раннего миоцена до позднего эоцена. При этом формирование некоторых из положительных складчатых структур происходило в результате двух фаз деформаций.

Детальные сейсмостратиграфические исследования в трехмерной модификации одной из возвышенностей в пределах пассивной окраины Норвегии убедительно показали, что она сформировалась под влиянием тектонического сжатия, ориентированного перпендикулярно (или почти перпендикулярно) оси рифтинга, а затем и спрединга. При этом установлен и возраст сжимающих напряжений: они развивались непосредственно во время разделения континентов или синхронно с ним – около 55 млн. лет назад. Складчатые структуры, по мнению авторов исследования, могли возникнуть под влиянием компоненты сжатия и сдвиговой компоненты. Очевидно, что возникновение этой пары сил вполне согласуется с представлениями о вихревой природе спредингового бассейна: в период его начального раскрытия в области наиболее интенсивного закручивания вихревой структуры возникает и компонента сжатия, и компонента сдвига, что мы и наблюдаем в действительности.

В Восточной Гренландии складки и взбросы выявлены в северной части Земли Джемсона. Они имеют позднемiocеновый возраст и исследования последних лет показали, что складки имеют длину волны 5–10 км, при этом общее сжатие оценивается величиной около 1%. Эта величина согласуется с оценкой сжатия, выполненной на основе анализа эволюции положительных морфоструктур на западном склоне Норвегии. Кроме того, продолжение Гренландского трансформного разлома в пределы восточной Гренландии также сопровождается сжимающими напряжениями и складчатостью.

В пределах юго-западной окраины Баренцева моря выделяются три основных сегмента, где геодинамическая обстановка формирования окраины была различной (с юга на север): чисто сдвиговые дислокации вдоль разлома Сенья; косое сжатие в пределах окраины котловины Сорвештангет; сжатие и сдвиг вдоль зоны разломов Хорнсунд. Отметим, что это изменение геодинамической обстановки вдоль границы раскола континентов можно увязать со схемой раскрытия этой части океана по типу вихревого движения.

Обнаружение и изучение куполов в осадочном покрове, обусловленных тектоническим сжатием

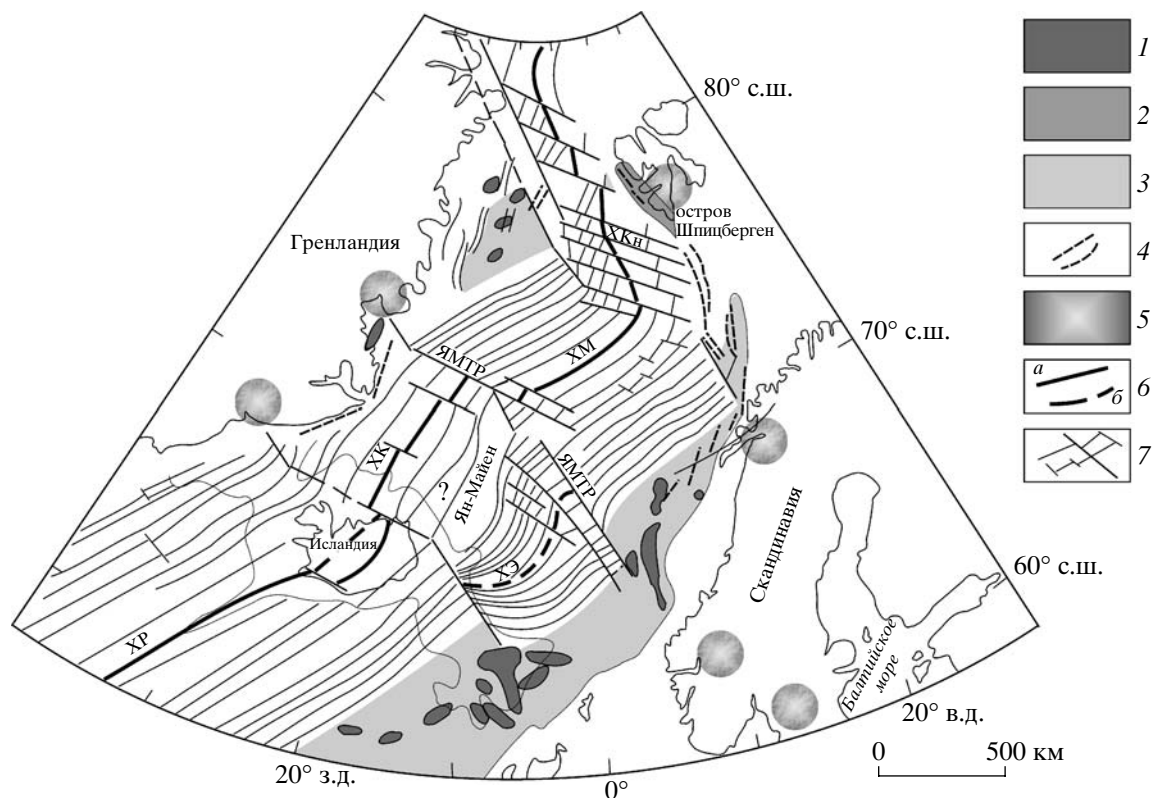


Рис. 5. Районы пассивных окраин Норвежско-Гренландского бассейна, в пределах которых установлены складчатые деформации осадочной толщи, а также воздымание земной коры в неогене

Пассивные окраины и прилегающие к ним районы континентов: 1 – локальные возвышенности, образовавшиеся в результате сжатия; 2 – складчатый пояс к западу от о-ва Шпицбергена; 3 – области растяжения коры в позднем мелупалеогене; 4 – шельфовые области; 5 – районы интенсивного воздымания в неогене. Океанское ложе: б – оси спрединга активного (а) и отмершего (б); 7 – оси магнитных аномалий. ЯМТР – Ян-Майенский трансформный разлом, ХКн – хребет Книповича, ХМ – хребет Мона, ХК – хребет Кольбейнсей, ХЭ – хребет Эйгир, ХР – хребет Рейкьянес (по [36], с изменениями)

на пассивных окраинах, стимулировало их дальнейшее интенсивное исследование, и, в частности, появились работы, посвященные сравнению этих структур с теми, которые уже давно выявлены в пределах зон сочленения океан–континент активного типа. В одной из них предпринята попытка сопоставления соответствующих структур в пределах плато Воринг (окраина Норвегии) и в северной части о-ва Хонсю (Япония) [37]. Было отмечено, что тектоническая эволюция столь различных глобальных геоструктур как пассивная окраина Норвегии и активная вулканическая дуга Хонсю Японии имеет общую черту, которая заключается в том, что в обоих регионах длительный период растяжения сменился интенсивным сжатием, что послужило причиной формирования куполообразных возвышенностей.

Очевидно, что, хотя проблема складчатых деформаций пассивных окраин возникла относительно недавно (поскольку они были обнаружены лишь в последние годы), она имеет важное значение как с позиций теоретической геотекто-

ники, так и с точки зрения поисковых работ на нефть и газ. Прикладной аспект этой проблемы очевиден и в настоящее время уже осознан многими специалистами, занимающимися нефтегазописковыми работами. В частности, разочаровывающие результаты таких работ в некоторых районах Баренцева моря связываются именно с поднятиями и размывом отложений в результате сжимающих напряжений.

ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ И ВИХРЕВЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Хотя континентальные вихреподобные структуры были открыты значительно ранее аналогичных образований океанской литосферы, они долгое время не привлекали должного внимания исследователей и их систематизация, насколько нам известно, не проводилась. В течение многих лет наблюдений, наряду со структурами, которые имеют округлую форму (“кольцевые” структу-

ры), выявлены очень убедительные примеры структур континентальной земной коры, которые имеют в плане форму вихрей или спиралей. Широкое использование в геологической практике аэро- и космических фотоизображений земной поверхности повлекло за собой заметное увеличение числа выделенных вихревых структур, поскольку достаточно крупные из них успешно оконтуриваются на основе анализа результатов именно высотных съемок [10]. Выяснилось, что при чрезвычайно значительном диапазоне размеров (от десятков метров до сотен и тысяч километров) морфология вихрей обладает сходными чертами, а приурочены они к структурным комплексам разного возраста: от докембрийских до кайнозойских.

При интерпретации природы континентальных вихревых структур целесообразно исходить из того, что вихревая составляющая мантийной конвекции не только существенно влияет на процесс формирования океанских впадин, но и оказывает воздействие на континентальные части литосферных плит, вызывая в них сдвиговые напряжения. В целом, они, вероятно, проявлены менее отчетливо в силу гораздо большей мощности и реологической неоднородности континентальной литосферы по сравнению с океанской. Этот фактор и может рассматриваться в качестве основного для объяснения природы наиболее крупных вихревых структур континентальной литосферы. Дополнительное влияние, вероятно, оказывает и то обстоятельство, что блоки, движущиеся по поверхности Земли, имеют компоненту вращения, обусловленную ротацией самой планеты.

Наиболее распространенная точка зрения о природе континентальных вихрей обуславливает их возникновение сдвиговыми напряжениями и, как следствие, дифференциальными движениями и вращениями блоков земной коры. “Первооткрыватель” вихревых структур китайский геолог Ли Сы-Гуан выделял их, изучая конкретные обнажения, используя результаты высокоточных триангуляционных измерений (на примере смещения островов Японии, где оконтуриваются две вихревые структуры), а также проводя эксперименты с различными материалами [12]. Главный вывод его исследований состоял в том, что вихревые структуры обусловлены ротационным фактором: вращением основания. Предполагалось, что под слоем относительно пластичных пород должна существовать подложка, способная поворачиваться вследствие приложения пары сил. Деформации кручения, приложенные снизу к подошве коры, вызывают появление соответствующего поля напряжений. Однако сам по себе ротационный фактор обуславливает возникновение квазиконцентрических нарушений и для того,

чтобы они трансформировались в вихревые, необходимо наличие резких неоднородностей в распределении физико-механических свойств среды. Подвергаться вращению могут разноранговые блоки основания, соответственно, возникают и разномасштабные вихреподобные структуры. Само вращение блоков чаще всего связывается со сдвигами: наличие пары сил – динамопары обуславливает возникновение деформации кручения и, как следствие, их поворот [21].

Системам трещин и сколов, которые образуют в плане вихреподобную конфигурацию и которые наблюдаются в континентальной коре, свойственна масштабная инвариантность. Вихри с наименьшим поперечником – около 10 метров, выявлены в обнажениях осадочных пород, где их возникновение связывается с дифференциальными смещениями слоев. Вихревые структуры с поперечными размерами первые сотни км наблюдались в различных регионах: к северу от оз. Байкал, на Камчатке, Чукотке и других регионах Азиатского и Европейского континентов. В частности, в пределах континентальных областей вокруг Средиземного моря на основе структурного анализа было выделено три конвергентных вихревых структуры, при формировании которых вращение блоков происходило предположительно против часовой стрелки [40]. Одна из них – самая крупная находится в северо-западной Италии, а две другие – на западе и в центре Анатолийского полуострова. Выше говорилось о том, что движение Анатолийской микроплиты, определенное по данным GPS, характеризуется присутствием вихревой компоненты. Это полностью подтвердило сделанные ранее предположения о характере эволюции вихревых структур, основанные исключительно на структурных данных. Таким образом, на вихревой характер движений указывает не только структурно-геометрический анализ, но и непосредственные измерения направления и скорости смещений отдельных блоков коры.

Предполагается, что вихревые и спиральные структуры Средиземноморья образованы своего рода наклонными разломами или “геошвами”, разделяющими тектонические чешуи: блоки и пластины земной коры, надвинутые друг на друга по наклонным поверхностям. Если рассматриваемые вихреобразные структуры действительно формировались в результате спирально закрученного движения масс, то возникновение этих чешуй выглядит вполне закономерным именно в силу природы вихревого движения, поскольку оно должно сопровождаться сжатием в области закручивания вихря и надвиганием одного участка коры на другой. Этому способствует также очевидное различие в скоростях течения масс во внутренней и внешней частях вихревого потока.

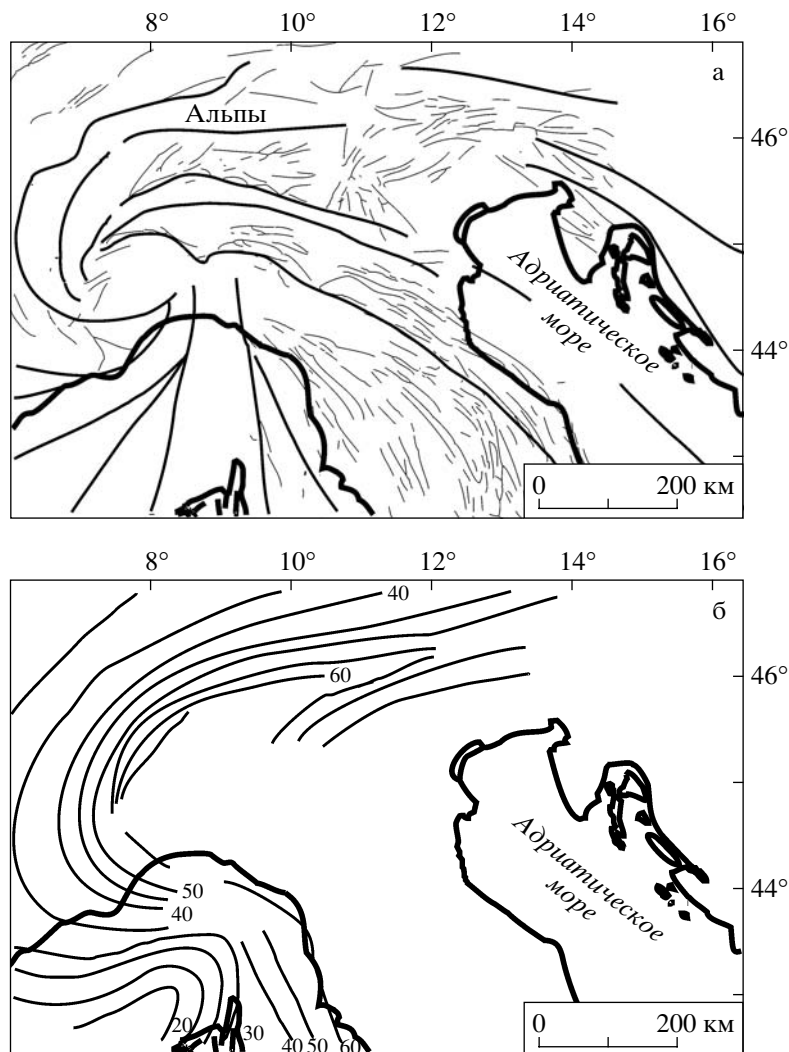


Рис. 6. Вихревая структура Сестри в Северо-Западной Италии

а – расположение линейментов: 1 – основных и 2 – второстепенных; б – изогипсы поверхности Мохо в км (по [40], с изменениями)

Для одной из упомянутых выше вихревых структур Средиземноморья, которая получила название Сестри, кроме структурной карты распределения в плане линейментов и разломов (рис. 6а), была построена карта глубин поверхности Мохо (рис. 6б). Сопоставление их показывает, что контуры поверхностных и глубинных границ оказываются подобными, что является весоым подтверждением тому, что в формирование вихревой структуры было вовлечено и вещество мантии.

Существует точка зрения, что вихревые структуры Восточного Средиземноморского пояса сопряжены с гигантским мегасдвигом протяженностью многие тысячи километров, куда входят разломы и трещины разного порядка, образующие вихревые пучки и сгущения, а также квазилинейные морфоструктуры. Выделена вся эта система, имеющая в плане форму вихря, расширяющегося

на юго-запад, главным образом, на основе дешифрирования космоснимков; протягивается она от Анатолийского блока через весь Африканский континент до дельты Нигера и выходит к Гвинейскому заливу. Предполагается, что ее продолжением в Атлантическом океане служит система экваториальных трансформных разломов, а в Южной Америке – Амазонская котловина. Считается, что левосторонние сдвиговые смещения происходили в пределах этой системы, начиная с докембрия [39]. Указанный мегасдвиг, в свою очередь, входит в глобальную систему вихревых или спиральных геоструктур, формирование которых происходило в результате вращения отдельных литопластин против часовой стрелки. Области замыкания этих гигантских вихрей находятся в пределах Альпийско-Гималайского орогенического пояса, а также в приполярных регионах планеты [38].

ВИХРЕВЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ВОЗМОЖНАЯ ПРИРОДА МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ

В сильно неравновесной нелинейной среде “твердых” оболочек Земли в процессе их развития, очевидно, могут возникать самые разнообразные динамически неустойчивые поверхности раздела. Соответственно, это порождает вихревые движения различной интенсивности. Если продолжить аналогию с процессами во внешних оболочках планеты, то в ее внутренних оболочках могут возникать исключительно интенсивные (разумеется, с учетом свойств среды) вихри – своего рода “смерчи” или “торнадо”. И в самом деле, среди литосферных плит Земли имеются небольшие плиты, угловая скорость вращения которых на порядок и более превышает скорость вращения остальных плит. Это позволяет предполагать, что они вращаются под воздействием весьма интенсивного вихревого движения. Чаще всего такие быстро вращающиеся (по геологическим меркам) плиты тяготеют к ослабленным, проницаемым зонам в коре и литосфере, где контактируют мантийные массы с различными физическими характеристиками, аналогично тому, как это наблюдается в зоне субдукции. Именно в таких зонах наиболее вероятно возникновение вихря с высокой скоростью вращения. Аналогичный вихрь в атмосфере (смерч) характеризуется весьма мощным вертикальным течением, которое как бы увлекает вещество, заставляя его подниматься снизу вверх. Если подобный механизм действует во внутренних оболочках, то под быстро вращающимися плитами следует ожидать наличие узкого столба глубинного, горячего и разуплотненного вещества с низкими сейсмическими скоростями. Рассмотрим под этим углом зрения некоторые наиболее яркие примеры.

Две типичные “горячие точки”, возникновение которых принято связывать с восходящими мантийными потоками: острова Исландии и Пасхи. Оба они тяготеют к тектоническим узлам: Исландия расположена на пересечении оси спрединга Срединно-Атлантического хребта и зоны поперечных разломов, а о. Пасхи – неподалеку от тройного сочленения ВТП с Чилийским поднятием. Как один, так и другой район характеризуется присутствием микроплит с очень высокими скоростями вращения. Ян-Майенская микроплита, расположенная к северу от Исландии, в период времени палеоцен – поздний миоцен имела скорость вращения около 3 град/млн. лет, а микроплита Пасхи вращается в настоящее время с еще большей скоростью – ~15 град/млн. лет [34]. В обоих районах имеются разрезы коры и мантии до глубин более 2000 км, построенные по данным сейсмотомографии и ориентированные в различ-

ных направлениях (рис. 7). Под Исландией выявлен довольно узкий субвертикальный канал, простирающийся до границы с нижней мантией, в котором скорости сейсмических волн существенно понижены. Под о. Пасхи в среднем и нижнем горизонтах верхней мантии также имеется канал с пониженными скоростями (хотя и не столь четкий, как под Исландией). Особенностью обоих разрезов является ярко выраженная стратификация верхней мантии: в вертикальном разрезе отчетливо выделяются горизонты с различными скоростями сейсмических волн. Из теории вихревого движения известно, что такие условия особенно благоприятны для формирования вихрей с интенсивным вращением. Отметим, что для объяснения магматизма Камчатского региона, а также некоторых регионов внутриплитного магматизма была предложена сходная гипотеза, стержнем которой является предположение о возникновении мощных вихревых движений в астеносфере и существовании “флюидо-магматических торнадо”, которые воздействуют на литосферу и вызывают формирование “горячих точек” [3].

Многие из них пространственно приурочены к пассивным окраинам континентов (например, траппы Декан, Кару, Феррар в регионах, примыкающих к Индийскому океану, Этендека, Парана, трога Бенуэ в регионах, примыкающих к Атлантическому океану), в связи с чем неоднократно высказывались предположения о причинной связи между “плюмами” и распадом мегаконтинента. Действительно, на стадии распада единого континентального массива могут возникнуть условия, благоприятные для возникновения рассмотренных выше интенсивно вращающихся вихрей и, соответственно, каналов подъема глубинного вещества в определенных местах линии раскола. Эта линия, как было рассмотрено выше, всегда имеет пилообразную конфигурацию, причем поле напряжений в противоположных частях зубцов этой “пилы” различно в связи со спецификой вихревого движения. Для пояснения этого обратимся к рис. 4б, где на врезке показана ориентировка векторов напряжений для одной из сторон такого зубца в момент разделения континентального массива. Нетрудно видеть, что вихревая компонента, сопровождающая относительное движение континентальной плиты Б относительно плиты А, приводит к возникновению динамической поверхности, где преобладает пара сил: сдвига и сжатия. Эта ситуация сходна с динамикой зоны субдукции, где существуют условия для возникновения интенсивных вихрей. Обращаясь к реальным данным, можно видеть, что, по крайней мере, некоторые из упомянутых трапповых провинций (например, Этендека и трога Бенуэ) действительно приурочены к тем выступам береговой линии

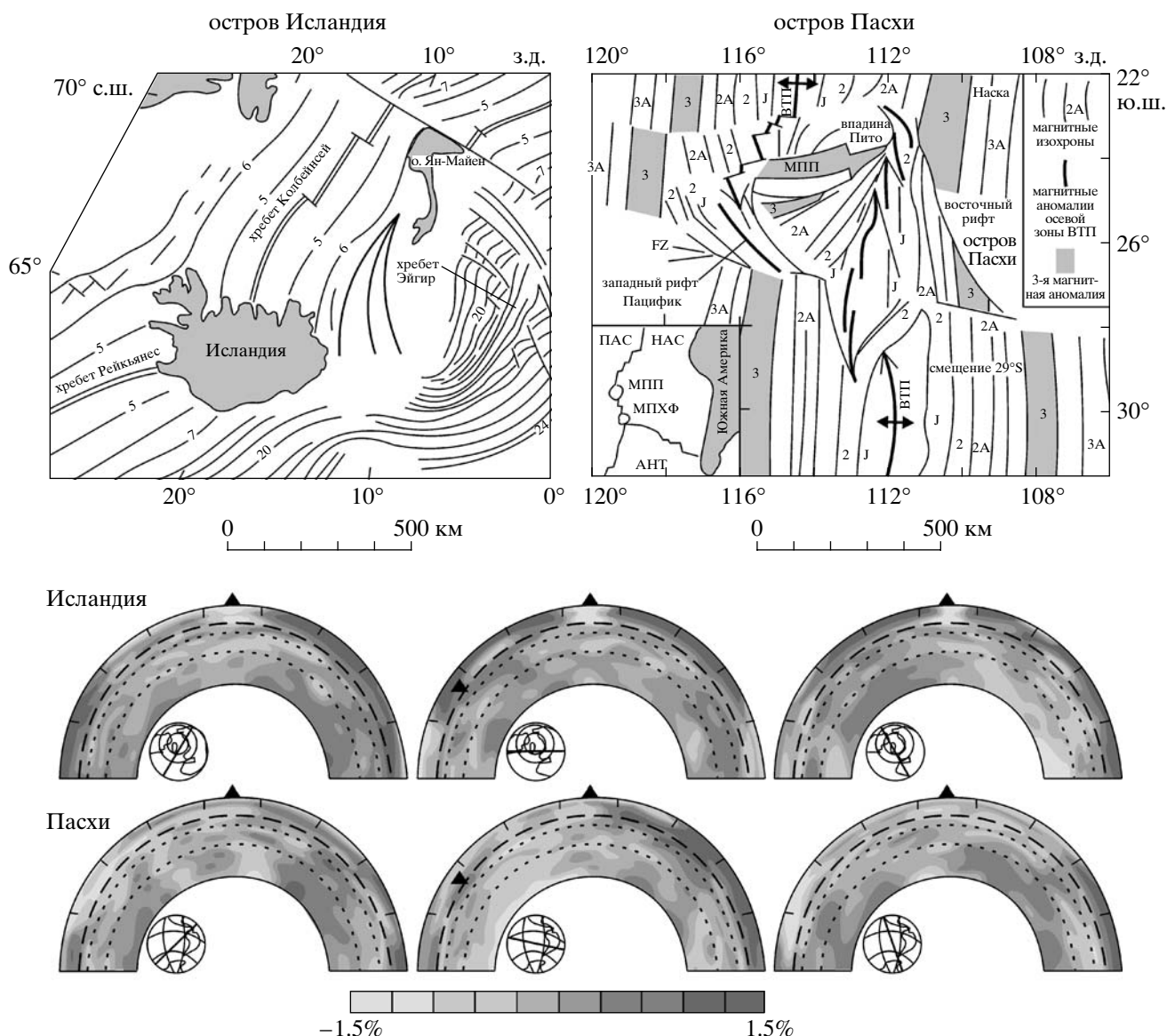


Рис. 7. Структурные схемы районов микроплит Ян-Майен к северо-востоку от Исландии и Пасхи на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия (вверху) и томографические разрезы вдоль трех сечений в этих же районах (внизу) (по данным [41])

На структурных схемах показаны оси магнитных аномалий с соответствующими номерами. На врезке справа – расположение микроплит Пасхи и Хуан Фернандес. ВТП – Восточно-Тихоокеанское поднятие, ЧП – Чилийское поднятие, НАС – плита Наска, ПАС – плита Пасифик, АНТ – Антарктическая плита, МПП – микроплита Пасхи, МПХФ – микроплита Хуан Фернандес. Оттенки серого цвета показывают повышенные (относительно средних, в %) скорости распространения сейсмических волн – более темный оттенок, и пониженные скорости – более светлый оттенок. Пунктирные линии на разрезах: утолщенная – граница на глубине 670 км, тонкие – глубины соответственно 1000 км и 1700 км

Африканского континента, где на стадии раскола существовала подобная геодинамическая обстановка.

Справедлива ли подобная гипотеза для объяснения природы других “горячих точек” и плюмов, предстоит выяснить. Известно, что далеко не всегда им соответствуют в мантии зоны пониженных ско-

ростей. Однако интенсивно вращающийся вихрь – относительно короткоживущее образование (разумеется, с учетом параметров среды, в которой он формируется). Имея в виду этот факт, можно предположить, что проявление зон пониженных скоростей в значительной степени зависит от стадии развития, на которой находится тот или иной район внутриплитного вулканизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во внешних оболочках Земли: атмосфере и гидросфере, наблюдается большое разнообразие вихревых движений, и они играют ключевую роль в их динамике. Приведенные факты, а также их интерпретация вполне убедительно свидетельствуют о том, что и во внутренних, “твердых” оболочках нашей планеты также наблюдается значительное разнообразие движений данного типа, и они играют столь же важную роль в динамике этих оболочек. Достаточно сказать, что две трети поверхности Земли: а именно океанская литосфера сформирована (и формируется в настоящее время) при непосредственном воздействии вихревых движений. Этот вывод принципиально важен для геотектоники, ибо он подтверждает упомянутые в начале статьи положения о свойствах среды, где протекают процессы, которые определяют структурный лик земной коры и которые невозможно свести к чисто механическим. Физическая суть этих процессов – предмет специального рассмотрения, выходящего за рамки настоящей статьи, однако важно подчеркнуть, что вихревые движения могут осуществляться только в сильно неравновесной и нелинейной среде. В свою очередь, это означает, что эпоха доминирования плитотектонической геотектонической парадигмы уходит в прошлое: ее основа – механика сплошной среды, в то время как основа будущей концепции – нелинейная термодинамика сильно неравновесной среды. И хотя для решения частных конкретных задач подход с позиции механики остается полезным, на повестке дня – переоценка роли литосферы как твердой и хрупкой оболочки, поскольку это не отвечает представлениям о текучести среды и о разноранговых вихревых движениях в “твердых” оболочках.

Пока трудно говорить о терминологической базе новой концепции; нами был предложен термин “фрактальная” тектоника вместо тектоники плит [14], с учетом того, что основные структурные линии литосферы и ее разделение на разнопорядковые фрагменты обладают свойством фрактальности (масштабной инвариантности). Однако, скорее всего, он не окончателен, и терминологическая база будет развиваться постепенно.

Вихревые процессы широко распространены и в живой, и в неживой природе. Становится весьма актуальной задача объединения усилий специалистов по “твердой” Земле со специалистами в области динамики атмосферы и океана для построения общей концепции динамики оболочек нашей планеты и их взаимодействия.

Автор выражает глубокую признательность академику Д.В. Рундквисту за постоянную поддержку.

Работа выполнена при содействии гранта по поддержке ведущих научных школ НШ-99.2003.5, а также программы фундаментальных научных исследований Президиума РАН “Мировой океан: геология дна, геодинамика, биология моря и экология”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсюк Ю.Н. Эволюция системы Земля–Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // Геотектоника. 1993. № 1. С. 13–22.
2. Артюшков Е.В. Гравитационная конвекция в недрах Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. № 9. С. 3–18.
3. Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского общественного фонда “Наука – для Камчатки”, Камчатского государственного педагогического университета, 2004. 297 с.
4. Гольдин С.В. Физика “живой” Земли // Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. 310 с.
5. Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.
6. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. Глубинная геодинамика. Новосибирск: СО РАН, 1994. 300 с.
7. Дубинин Е.П., Ушаков С.А. Океанический рифтогенез. М.: ГЕОС, 2001. 293 с.
8. Казьмин В.Г., Борисова И.А. О структурных связях континентальных и океанских рифтовых зон Атлантического типа // Геотектоника. 1992. № 6. С. 80–98.
9. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
10. Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д. Кольцевые структуры Земли: миф или реальность. М.: Наука, 1989. 190 с.
11. Кеонджян В.П., Монин А.С. О контрационной конвекции в земной мантии // ДАН СССР. 1980. Т. 253. № 1. С. 78–81.
12. Ли Сы-гуан. Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.–Л.: Госгеолтехиздат, 1958. 130 с.
13. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 610 с.
14. Мирлин Е.Г. От тектоники плит к фрактальной тектонике // Докл. РАН. 2003. Т. 389. № 1. С. 71–74.
15. Мирлин Е.Г. Фрактальное структурообразование на различных стадиях формирования океанской литосферы: предпосылки, примеры, проблемы // Океанология. 2005. Т. 45. № 6. С. 1–12.
16. Мирлин Е.Г., Кононов М.В., Суцеская Н.М. Вихревые спрединг-системы в литосфере и верх-

- ней мантии океанов // Докл. РАН. 2005. № 4. С. 507–510.
17. Николаев А.В. Черты геофизики XXI века // Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. 310 с.
 18. Пейве А.А., Руженцев С.В., Соколов С.Д. и др. Тектоническая расслоенность литосферы. М.: Наука, 1980. 215 с. (Труды Геологического института АН СССР; Вып. 343).
 19. Пуцаровский Ю.М. Нелинейные геодинамические эффекты в развитии земной коры Атлантического океана // Нелинейная геодинамика. М.: Наука, 1994. 191 с.
 20. Разницин Ю.Н. Тектоническая расслоенность литосферы молодых океанов и палеобассейнов. М.: Наука, 2004. 270 с.
 21. Роль сдвиговой тектоники в структуре литосфер Земли и планет земной группы. СПб.: Наука, 1997. 591 с.
 22. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород // Изв. АН СССР. 1982. № 12. С. 3–18.
 23. Слензак О.И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова думка, 1972. 181 с.
 24. Солдатенко С.А. Синоптические вихри в атмосфере и океане // Соросовский образовательный журнал. 1989. № 2. С. 78–84.
 25. Структурный анализ при палеогеодинамических реконструкциях. М.: Роскомнедра, Госкомнедра Украины, Геокарт, МАНПО, 1994. 256 с.
 26. Трубицын В.П., Бобров А.М. Эволюция структуры мантийной конвекции после распада суперконтинента // Физика Земли. 1993. № 9. С. 27–37.
 27. Физический энциклопедический словарь. Вихревое движение. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.
 28. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: Университет. Книжный дом, 2005. 560 с.
 29. Шаров В.И. Тектоническое землетрясение как неравновесный термодинамический процесс разрушения горных пород (к проблеме смены парадигмы сейсмологии) // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 5. С. 121–127.
 30. Armijo R., Flerit F., King G., Meyer B. Linear elastic fracture mechanics explains past and present evolution of the Aegan // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 217. P. 85–95.
 31. Armijo R., Meyer B., Navarro S. et al. Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: a clue to propagation processes of the North Anatolian Fault? // Terra Nova. 2002. Vol. 14. № 2. P. 80–86.
 32. Boldreel L.O., Andersen M.S. Tertiary compressional structures on the Faroe-Rockall Plateau in relation to northeast Atlantic ridge-push and Alpine foreland stresses // Tectonophysics. 1998. Vol. 300. P. 13–28.
 33. Keilis-Borok V.I. Introduction: non-linear systems in the problem of earthquake prediction // Physics. Earth. Planet. Inter. 1990. Vol. 61. P. 1–7.
 34. Larson R.L., Searl R.C., Kleinrock M.C., Shouten H., Bird R.T., Naar D.F., Reisby R.I., Hooft E.E., Lasthiotakis H. Roller-bearing tectonic evolution of the Juan Fernandez microplate // Nature. 1992. Vol. 356. P. 571–576.
 35. Lee J.S. Some characteristic structural types in Eastern Asia and their bearing upon the problems of continental movements // Geol. Mag. LXVI. 1928. P. 422–430.
 36. Lundin E., Dore A.G. Mid-Cenozoic post-breakup deformation in the “passive” margins bordering the Norwegian-Greenland Sea // Marine and Petroleum Geology. 2002. Vol. 19. P. 79–93.
 37. Mjelde R., Iwasaki T., Shimamura H., Kanazawa T., Kodaira S., Raum T., Shiobara H. Spatial relationship between recent compressional structures and older high-velocity crustal structures; examples from the Voring Margin, NE Atlantic, and Northern Honshu, Japan // J. Geodynamics. 2003. Vol. 36. P. 537–562.
 38. Neev D., Hall J.K. A global system of spiraling geosutures // J. Geophys. Res. 1982a. Vol. 87. № B13. P. 10689–10708.
 39. Neev D., Hall J.K. The Pelusium megashear system across Africa and associated lineament swarms // J. Geophys. Res. 1982b. Vol. 87. № B2. P. 1015–1030.
 40. Neev D., Hall J.K. Mantle-produced counterclockwise vortices along the northern Mediterranean belt (a genetic hypothesis for the Alpine systems) // Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg. 1984. Vol. 56. P. 111–127.
 41. Ritsema J., Allen R.M. The elusive mantle plume // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 207. P. 1–12.
 42. Scotese C.R. Paleomap Project. [http:// www.scotese.com](http://www.scotese.com) 2002.
 43. Sengor A.M.C., Natali'n B.A. Rifts of the world // Geol. Soc. Amer. Special Paper. 2001. Vol. 352. P. 389–482.
 44. Sornet D., Pisarenko V. Fractal plate tectonics // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30. № 3. P. 5–1–5–4.
 45. Turcott D.L., Oxburgh E.R. Finite amplitude convection cells and continental drift // J. Fluid. Mech. 1967. Vol. 28. P. 29–42.
 46. Wilson D.S. Deformation of the so-called Gorda plate // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. № B3. P. 3065–3075.

Рецензент: Ю.Н. Авсюк

The Problem of Vortical Movements in the Solid Earth and Their Role in Geotectonics

E. G. Mirlin

*Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, Mokhovaya ul. 11, korp. 2, Moscow, 125009 Russia
e-mail: egm@sgm.ru*

Abstract—Crustal structural features having a vortical or spiral shape were discovered in the first third of the 20th century. Since then, such features of various ranks, but similar appearance, have been revealed in different geotectonic settings; however, an adequate tectonic interpretation has not been offered. With allowance for the specific character of vortical movement, the evolution of the structural geometry of the North Atlantic basins and different segments of the global system of mid-ocean ridges is considered in this paper. It is shown that vortical movements do take place in the solid Earth during ocean formation and create scale-invariant rifting and spreading systems, where the spreading axis tends to undergo whirling. The size of these systems differs by more than two orders of magnitude. Many geotectonic phenomena that accompany the formation of oceans, including segmentation of the ocean floor and passive continental margins, folding of the sedimentary cover at these margins, and tectonic delamination of the oceanic lithosphere, may be explained by vortical movements of different dimensions. In addition, the vortical structures on continents are variable in size and related to litho-tectonic complexes of different ages. The vortical structural units of the Mediterranean Belt are considered as an example. Being driven by the same physical mechanism, the vortical movements depend on the dynamics of different geospheres. These movements are realized only in a nonlinear, nonequilibrium medium. Hence, only nonlinear and nonequilibrium thermodynamics will serve as a theoretical basis for a new concept, which is coming currently to take the place of plate tectonics.