

Вихри и смерчи в твердых оболочках Земли: ВОЗМОЖНЫ ЛИ ОНИ?

Е.Г.Мирлин

Как выглядят атмосферные вихри — циклоны и антициклоны, — знает практически каждый благодаря снимкам из космоса, которые показывают во время телевизионных прогнозов погоды. Хорошо известно о могучей, разрушительной силе смерчей. В Мировом океане в 60—70-х годах прошлого столетия также были открыты синоптические вихри, весьма близкие по форме атмосферным. Парадоксально, но структуры, имеющие в плане вихреобразную конфигурацию, в литосфере (т.е. в верхней твердой оболочке Земли) были обнаружены значительно раньше — в конце 20-х годов XX в. Длительное время они считались своего рода «геологической экзотикой», но в последние годы выяснилось, что вихревые движения играют весьма существенную роль в эволюции твердых оболочек нашей планеты, поскольку ответственны за формирование ложа океанов, т.е. двух третей земной поверхности [1].

На первый взгляд, трудно представить, как в оболочках, которые принято считать твердыми, могут происходить вихревые движения. Однако в конце прошлого столетия усилиями главным образом отечественных специалистов была разработана новая концепция протекающих в земных оболочках процессов, суть которой — нелинейность. Отклик среды на даже очень незначительное воздействие может



Евгений Гилельевич Мирлин, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора Государственного геологического музея им.В.И.Вернадского РАН. Область научных интересов — геодинамика, геология морей и океанов.

оказаться весьма существенным при длительном геологическом развитии [2]. Земная твердь приобретает свойства текучести. В ней могут возникать и сохранять устойчивость пространственно-временные структуры, аналогичные тем, которые известны во внешних оболочках нашей планеты: вихри, смерчи и др.

Каким же образом вихревое движение проявляется в литосфере?

На рис.1 показаны две модели раскрытия океанского бассейна — плитотектоническая и при вихреобразовании. Природа некоторых хорошо известных геодинамических явлений, относящихся к строению и развитию океанской литосферы, наилучшим образом объясняется именно с позиций вихревого движения. Так, вращение блоков коры может объяснить то, что изохроны океанского ложа секут границы формирующейся впадины, как это отчетливо видно на картах возраста дна Миро-

вого океана. Вихреобразование приводит к возникновению разнорядковой структурной кулиности (сегментации), наиболее характерной как для зон сочленения океана с континентом, так и для океанского ложа в целом. Возникновению сегментации способствует и то, что скорость перемещения вещества в вихревом потоке меняется от внутренней части к внешней. В океанской литосфере по этой причине доминируют сдвигово-раздвиговые напряжения и, соответственно, разноранговые структуры преимущественно ромбовидной формы, природа которых обусловлена спецификой данного поля напряжений. Подобные явления приводят к расслоенности океанской коры на разных структурных уровнях, а в ряде случаев — к образованию взброшенных блоков в океанских рифтах, а также надвиго-чешуйчатых структур. В пределах срединно-океанских хребтов (СОХ) возникают струк-

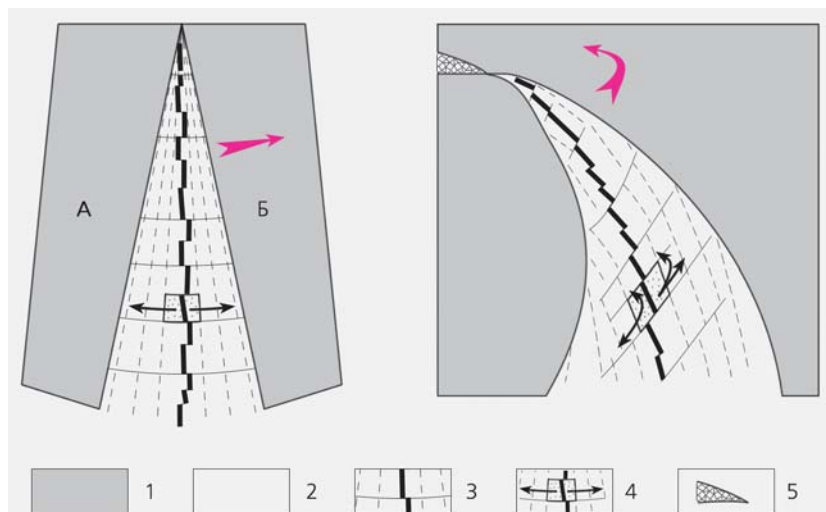


Рис. 1. Структурная форма океанского бассейна и геодинамика разделения континентальных плит — плитотектоническая модель (слева) и модель вихреобразования. 1 — кора континентальная; 2 — океанская; 3 — изохроны океанской коры и трансформные разломы, утолщенная линия — ось спрединга; 4 — элементарные объемы плит и направления их движения; 5 — область сжатия. Цветные стрелки — векторы движения плиты Б относительно плиты А [1].

туры, косые и диагональные по отношению к простиранию рифтовой зоны. Развитие во времени и в пространстве асимметричного по своей природе конвекционного мантийного вихря обуславливает фундаментальную структурную асимметрию океанских бассейнов. Кроме того, геодинамическая обстановка вдоль границы разделения плит не остается однородной, а меняется из-за вихревого закручивания мантийного конвекционного потока. В области замыкания вихря наблюдается сжатие, как это установлено в отдельных участках пассивных окраин континентов, а при расширении вихря сжатие переходит в растяжение.

Развитие вихревых структур океанской литосферы более подробно можно показать на примере Северной Атлантики, а также области сближения Тихоокеанской, Австралийской и Евразийской литосферных плит, где формируются небольшие по размеру бассейны с океанской корой, так называемые «малые» океаны.

Неустойчивость океанообразования и вихревые структуры литосферы

Северная Атлантика. Общая тенденция в раскрытии Северной Атлантики — продвижение (пропагеттинг) оси раздвига с юга на север. В раннем мелу (120 млн лет назад) началось раскрытие океана к северу от Азорских о-вов (рис.2). Оно осложнялось тем, что наряду с основным стволом раздвига от него отделялись побочные ветви, которые со временем отмирали. К ним относятся: трог Рокколл, Бискайский залив (его раскрытие сопровождалось вращением Иберийского п-ова), впадина Лабрадорского моря, а также котловины Поркьюпайн и Баффинова. В первых трех континентальная стадия рифтогенеза сменилась океанической, и в них происходил процесс аккреции океанской коры в зонах спрединга. Сейчас они представляют собой сужающиеся в плане и одновременно закручивающиеся наподобие вихря

впадины с океанской корой. Что касается двух других, то им свойственна континентальная кора, сильно утоненная в результате рифтогенеза. Так, например, в котловине Поркьюпайн мощность консолидированной части коры составляет менее 10 км.

Около 90 млн лет назад растяжение в Бискайском заливе, в трог Рокколл и во впадине Поркьюпайн, по всей вероятности, прекратилось, но продолжалось в Лабрадорском море и в Баффиновой котловине. Континентальный рифтогенез в пределах окраины Норвегии в ее средней части (плато Ворринг) продолжался вплоть до палеоцена, однако отделение Гренландии от Евразии началось около 60 млн лет назад не вдоль континентальных рифтов, а значительно западнее — вдоль осевой линии срединно-океанских хребтов Рейкьянес, Кольбейнсей и Мона. В данном случае мы имеем дело с типичным примером того, как континентальные рифты отмирают, не превратившись в океанские бассейны, а разделение континентов начинается вдоль совершенно иной линии. К этому же времени заложились спрединговые зоны к юго-востоку и северо-западу от микроконтинента Ян-Майен. В результате он обособился в самостоятельную, небольшую по размеру континентальную литосферную плиту.

Процесс океанообразования в Лабрадорском море и в Баффиновой котловине прекратился 40 млн лет назад. Однако океаногенез продолжал продвигаться на север. При этом от Евразии отделилась Гренландия. Но, как и на предыдущих этапах, перемещение оси раздвига было не простым. В данном случае оно осложнилось Ян-Майенской микроплитой, вращающейся против часовой стрелки вокруг полюса, расположенного в непосредственной близости от о.Ян-Майен. Вращение сопровождалось формированием двух вихреобразных спрединго-

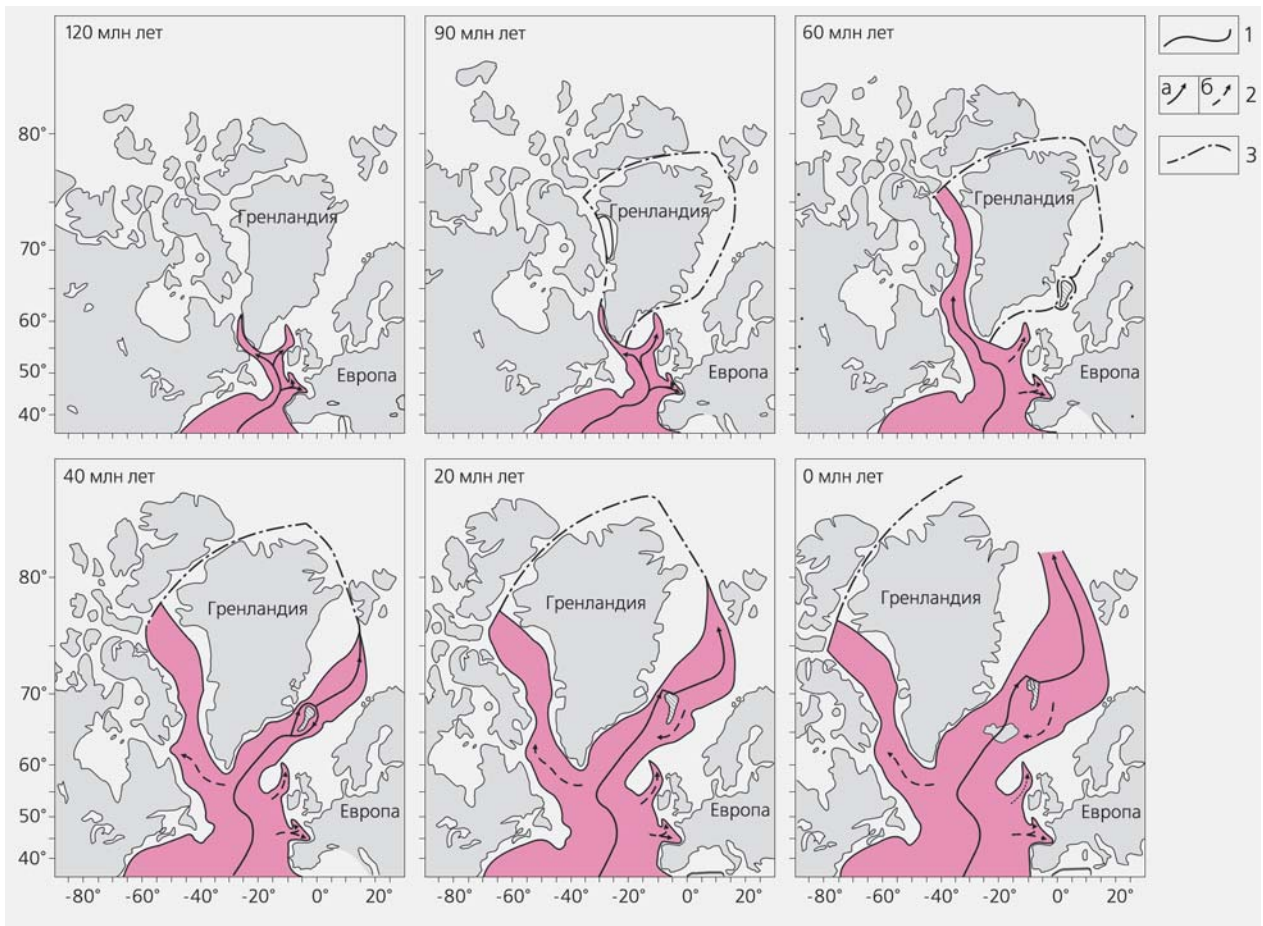


Рис.2. Развитие вихреобразных спрединговых систем Северной Атлантики в разные временные периоды. 1 — граница океан—континент. 2 — направление продвижения спрединговых систем: а — активных, б — отмерших. 3 — линия первоначального раскрытия. Цветом показаны океанские впадины.

вых систем. В период 40–20 млн лет назад на месте Шпицбергенской сдвиговой зоны также вследствие пропегейтинга оси раздвига в северном направлении сформировался срединно-океанский хребт Книповича. Закручивание продвигающейся генеральной зоны раздвига Северной Атлантики, намечившееся на предыдущем этапе, получило свое отчетливое завершение. Во всех бассейнах со зрелой океанской корой спрединг характеризовался крайней неустойчивостью, которая проявлялась в строении зон раздвига плит, изменении в пространстве осей разрастания дна, дискретности магматических процессов и других геодинамических феноменах [3].

Наконец, строение Северной Атлантики в современную эпоху наглядно демонстрирует рассмотренную выше эволюцию. Главное то, что океанский бассейн состоит из системы вихреобразных в плане впадин с океанской корой, имеющих различные размеры, возраст и самостоятельную систему спрединга. Соответственно, кроме крупных континентальных массивов Евразии, Северной Америки и Гренландии, существует целая группа микроконтинентов и приподнятых блоков. К тому же вихреобразные движения, сопровождающие раскрытие океана, приводят к возникновению деформационных структур сжатия в определенных частях континентальных пассивных окра-

ин. Детальные сейсмические исследования в их пределах выявили многочисленные складчатые структуры, обусловленные сжимающими напряжениями.

Итак, в эволюции Северной Атлантики отчетливо просматриваются две тенденции. Первая — пространственно-временная неустойчивость самого процесса океанообразования. Вторая — развитие основной и второстепенных зон раздвига включает в себя их продвижение и одновременное закручивание. В итоге, Северная Атлантика представляет собой совокупность различных по масштабу вихреподобных океанских бассейнов.

Область сочленения Евразии и Австралии с Тихим оке-

аном. Здесь располагаются относительно небольшие по размерам котловины, образовавшиеся в результате спрединга океанского дна: Западно-Филиппинская, Окинава, Марианского трога, Каролинская, Каролинская-Манус, Северо- и Южно-Фиджийская, Лау-Хавр. Их эволюции свойственны те же тенденции, что и развитию Северной Атлантики.

Вихреобразный стиль раскрытия можно продемонстрировать на примере спрединговой котловины Тасманова—Эмералд

ралд, формировавшейся в интервале от эоцена до современности на границе Тихоокеанской и Австралийской плит к югу от Новой Зеландии (рис.3, врезка). Данный район охватывает подводный хребет Маккуори и его продолжение на острове в виде Альпийского сдвига, подводные плато Кемпбелл и Челленджер, глубоководные котловины Эмералд и Тасманова. После того, как прекратился спрединг в Тасмановом море, произошло (около 45 млн лет назад)

заложение новой границы между Австралийской и Тихоокеанской литосферными плитами, разделившей единый ранее континентальный массив, который состоял из плато Челленджер и Кемпбелл. В это время в южной части о.Южный существовал офиолитовый пояс хребта Дан. Он как раз подтверждает то, что относительное движение между плитами было не просто раздвиговым, а сопровождалось закручиванием и сжатием в области замыкания вихря.

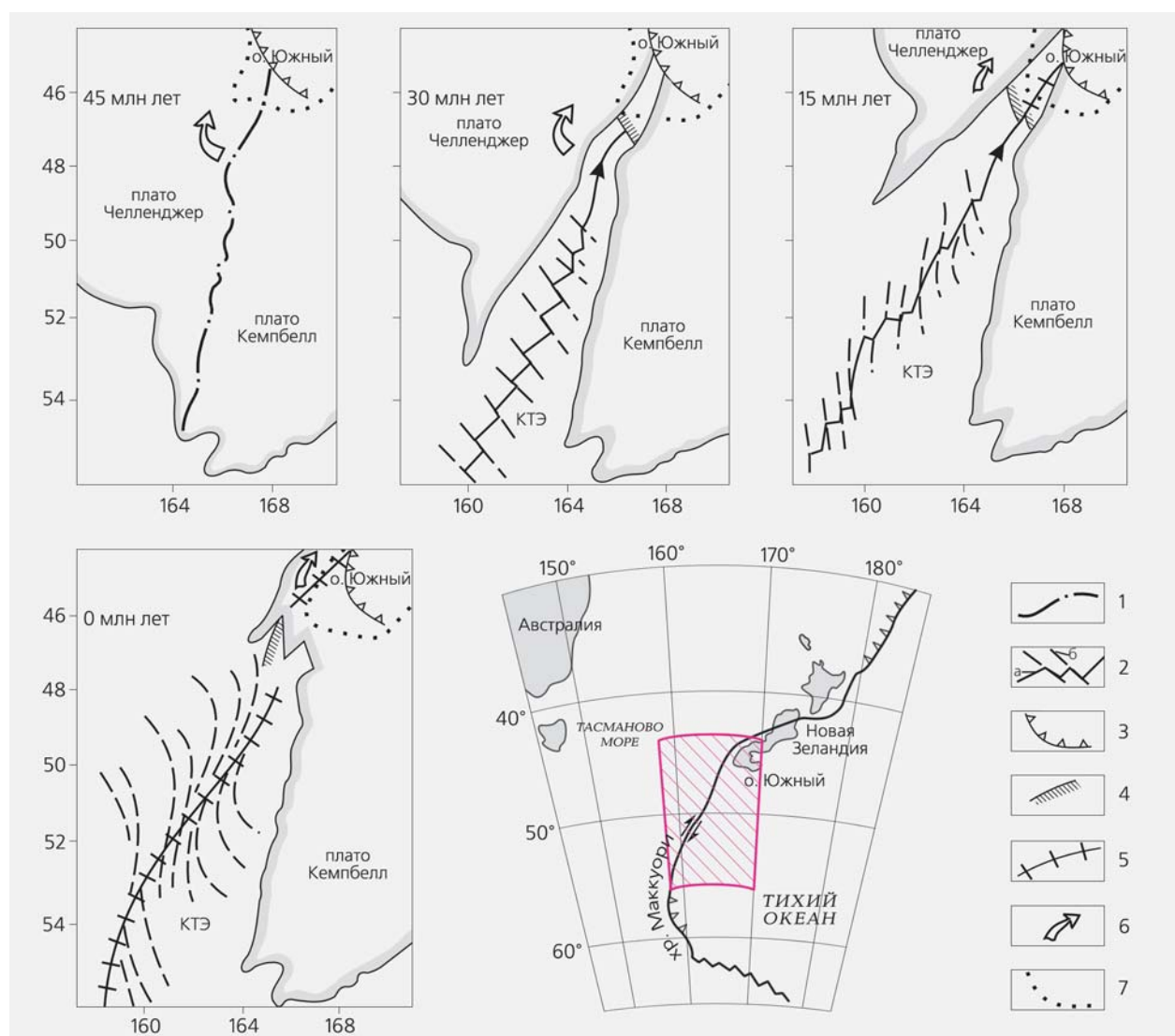
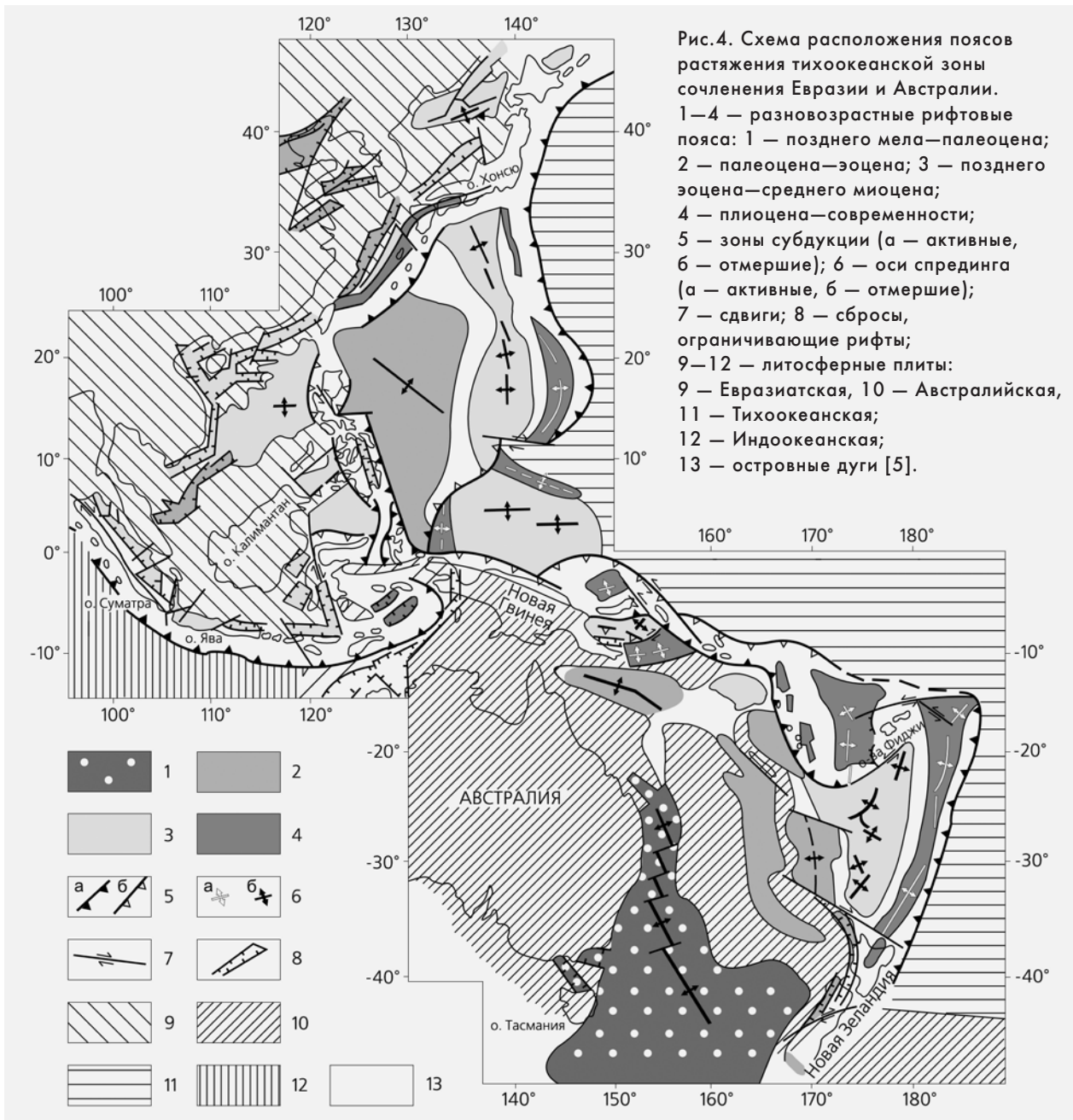


Рис.3. Развитие вихреобразной спрединговой системы котловины Тасманова—Эмералд (КТЭ). 1 — линия первоначального раскрытия, 2 — оси спрединга (а) и трансформные разломы (б), стрелкой указано направление продвижения; 3 — офиолитовый пояс хребта Дан, 4 — зона взбросов, 5 — пояс сжатия, 6 — направление движения плато Челленджер относительно плато Кемпбелл, 7 — контуры о.Южный. На географической схеме штриховкой показано расположение исследуемого района [4, с изменениями].



30 и 15 млн лет назад образовались зоны взбросов в северной части котловины Тасманова–Эмералд, что указывает на продолжение процесса сжатия при закручивании вихреобразной структуры. Кроме того, сформировалась четко эшелонированная, кулисообразная зона спрединга, подчеркивающая присутствие сдвига при раскрытии бассейна. Впоследствии эта компонента стала преобладающей, что выразилось

в резком изменении направления трансформных разломов и появлении пояса сжатия в самой северной части раскрывающегося бассейна. Тенденция смены геодинамической обстановки продолжалась и в более позднее время. В результате в современную эпоху весь северный сегмент осевой зоны котловины представляет собой зону сжатия (рис.3).

«Малые» океаны в зоне сочленения формировались или

непосредственно в тыловой части островных дуг, или в местах их расщепления, или же на значительном удалении от областей субдукции. Однако их эволюция также свойственна структурам, связанные с вихреподобным закручиванием. Вместе с рифтами с утоненной континентальной земной корой они образуют четыре пояса растяжения (рис.4). Наиболее древний – позднемеловой–палеоценовый – располагается на

окраине Австралии. В следующем поясе максимальная активность процессов растяжения приходится на поздний палеоцен—эоцен, а в еще более молодом — на поздний эоцен—средний миоцен. Этот последний состоит из двух звеньев: западного (азиатского), где растяжению подверглась исключительно континентальная литосфера, и восточного (австрало-тихоокеанского), в котором преобладали процессы расщепления островных дуг и последующего новообразования океанской литосферы. Четвертый пояс включает в себя рифты, сохраняющие активность в настоящее время и протягивающиеся по восточной периферии переходной зоны. Их формирование началось около 5 млн лет назад. Как правило, они связаны с расщеплением вулканических островных дуг.

Можно констатировать, что и в области сближения литосферных плит, как это происходило и в Северной Атлантике (где доминирует раздвиг), четко прослеживаются тенденции пространственно-временной неустойчивости океаногенеза и вихреобразного раскрытия океанских бассейнов: как задуговых, так и окраинных.

Вихревые структуры океанской и континентальной литосферы

Посмотрим, насколько вихреобразование свойственно другим спрединговым бассейнам Мирового океана. Обратимся к палеогеодинамическим реконструкциям раскола единого праматерика Пангеи. Последовательный анализ возрастных срезов показывает, что развитие всех зон раздвиг включает продвижение оси раскола и одновременное ее закручивание. На начальной стадии фрагментации суперконтинента форму практически всех рифтовых трогов (несмотря на их различ-

ные размеры) можно аппроксимировать вихреобразными структурами. В дальнейшем их развитие происходит неравномерно во времени и в пространстве. Они могут продолжать эволюционировать (за счет раздвигания, его продвижения и закручивания). Они также могут прекращать свое развитие и отмирать. В этих случаях формируются спрединговые системы с ясно выраженным вихреобразным рисунком в плане. Их эволюция может быть осложнена возникновением и развитием новых вихревых структур, отличающихся от первоначальных размерами и направлением движения. Соответственно, их структурный рисунок оказывается более сложным.

Такая эволюция структурных форм наблюдается практически во всех достаточно хорошо изученных частях срединно-океанских хребтов, независимо от начальной обстановки их формирования (заложились они в результате разрыва континентальной или океанской литосферы). Наиболее яркие примеры океанских вихревых систем показаны на рис.5. Так, на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП), представляющего собой вихрь протяженностью свыше 7000 км, располагаются микроплиты Хуан Фернандес и Пасхи. Они обрамлены отчетливо выраженными вихреобразными спрединговыми зонами протяженностью 300—500 км. Их границы — псевдоразломы, возникшие при продвижении оси раздвигания. Перекрывающиеся оси спрединга в виде удлиненных невысоких возвышенностей протяженностью от нескольких километров до нескольких сотен километров на гребне ВТП также могут быть отнесены к вихревым образованиям, поскольку обнаруживают отчетливые признаки закручивания. Рифт Таджура вместе с зоной спрединга Аденского залива, Аравийско-Индийским и Центрально-Индийским срединно-океан-

скими хребтами представляет собой гигантский вихрь протяженностью около 8000 км, словно вторгшийся в глубь Африканского континента. Отчетливо проявлена тенденция к вихреобразному закручиванию Западно-Индийского срединно-океанского хребта вблизи тройного сочленения Родригес.

Подводя итоги, мы приходим к выводу, что ложе Мирового океана представляет собой совокупность разноранговых вихреобразных спрединговых систем, количественные характеристики которых меняются более чем на два порядка.

Континентальные вихреподобные структуры были открыты значительно раньше океанских, но долгое время не привлекали внимание исследователей. Морфология всех обнаруженных вихрей весьма сходна, а размеры в поперечнике колеблются от сотен до тысяч километров. В Средиземноморском складчатом поясе выделены три вихревые структуры, центры которых находятся в северо-западной части Италии, на западе Анатолийского п-ова и в его срединной части (рис.6). Структуры образованы наклонными разломами или «геошвами», разделяющими тектонические чешуи. Последние хорошо известны геологам и представляют собой участки земной коры, надвинутые друг на друга по наклонным поверхностям наподобие рыбной чешуи. Возникновение таких структур выглядит вполне закономерным именно в силу природы вихревого движения. Оно сопровождается сжатием в области закручивания вихря и надвиганием одного участка коры на другой. Этому также способствует различие в скоростях течения масс во внутренней и внешней частях вихревого потока.

В последнее десятилетие геологи активно изучают движение блоков земной коры, используя очень точные спутниковые наблюдения. Анализируя спутниковые данные, удалось весьма убе-

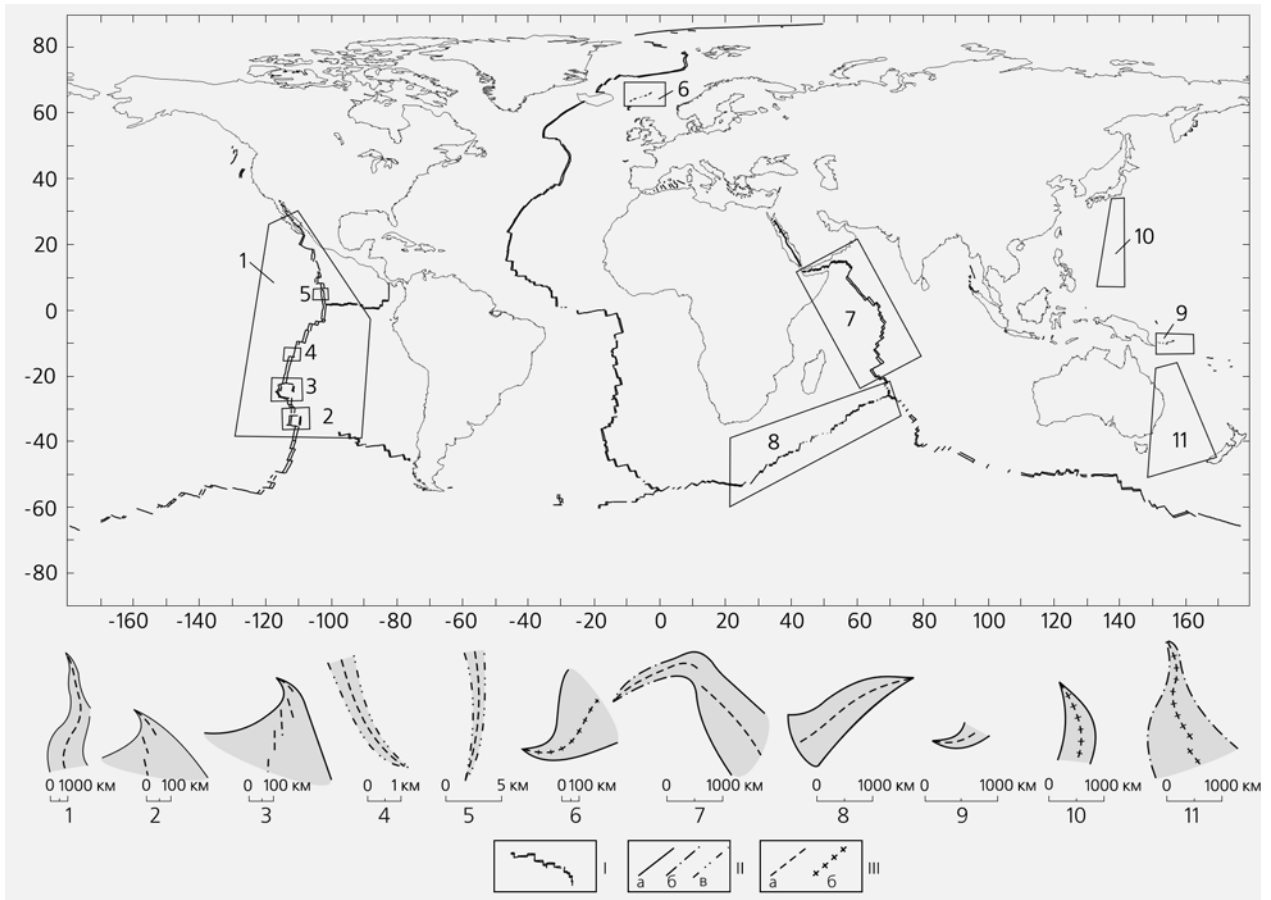
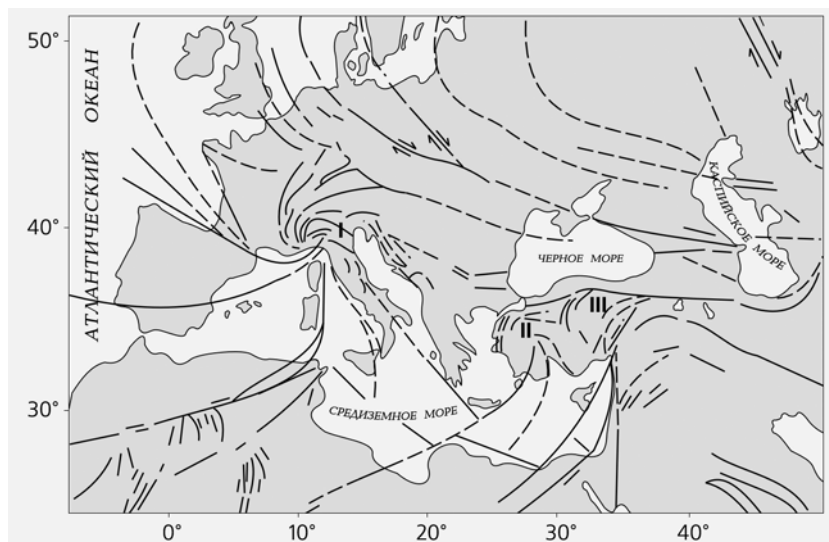


Рис.5. Вихревые системы в Мировом океане. 1 — Восточно-Тихоокеанское поднятие; 2–3 — зоны спрединга микроплит: 2 — Хуан Фернандес, 3 — Пасхи; 4–5 — ветви перекрывающихся осей спрединга на гребне ВТП: 4 — близ $12^{\circ}55'$ ю.ш., 5 — близ $5^{\circ}30'$ с.ш.; 6 — Норвежская котловина; 7 — рифт Таджура,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

Рис.6. Схема Средиземноморского и прилегающих регионов, показывающая три вихревые структуры в пределах альпийского орогенического пояса. Они образованы разломами и «геошвами», разделяющими надвинутые друг на друга тектонические пластины — чешуи [6].



дительно показать, что перемещение Анатолийского блока сопровождается вихревым вращением масс в соседних районах, в частности в Эгейском море. Таким образом, на вихревой характер движений указывают не только структурно-геометрические данные, но и непосредственные измерения направления и скорости смещений отдельных блоков коры.

Близкие по форме и размерам вихреобразные структуры континентальной коры открыты к северу от оз. Байкал, на Камчатке, Чукотке и в других регионах Азии и Европы.

Слэбы — это фронты, а плюмы — это смерчи?

Примечательно, что основоположник современной теории мобилизма А. Вегенер по профессии был не геологом, а метеорологом. Вряд ли это было случайностью. Вероятно, он понимал, что существует определенное сходство в процессах, происходящих в воздушной и твердой оболочках Земли. Последуем его примеру и рассмотрим под несколько необычным углом зрения пластины относительно древней, холодной и тяжелой литосферы Тихого океана (их обычно называют английским термином «слэбы»). Они погружаются (субдуцируют) под относительно легкую и горячую литосферу Евразии, как это происходит в области сближения Тихоокеанской и Евразийской плит. Такого рода явление, по существу, можно считать аналогом теплового атмосферного фронта, в котором холодный и относительно тяжелый воздух «подныривает» (субдуцирует?) 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 [7].

Именно с атмосферными фронтами связано возникновение вторичных вихрей. Как и развитие атмосферного фронта, субдукция — процесс неустойчивый, хотя, разумеется, речь идет о принципиально иных временных масштабах неустойчивости — миллионах и даже десятках миллионов лет. Но физическая суть процесса от этого не меняется: неустойчивость порождает вихри как в атмосфере, так и в той области мантии, где происходит сближение плит. Исходя из аналогии с атмосферными фронтами, формирование «малых» океанов (вихреобразных бассейнов в области сочленения океанской и континентальной плит) — результат неустойчивой динамики перемещения в зоне субдукции мантийных масс с различными физическими параметрами. Изменения в пространстве и во времени поясов растяжения коррелируют с изменениями направления в движении надвигающейся и погружающейся литосферных плит. Их взаимодействие, собственно, и обусловило развитие области сочленения и зоны субдукции.

Под сходным углом зрения рассмотрим возможный механизм формирования плюмов. Анализ кинематики литосферных плит показывает, что угловая скорость их вращения относительно невелика и редко превышает 0.2 град/млн лет. Однако есть небольшие плиты, вращающиеся с очень высокой скоростью. Это наводит на мысль, что их закручивает не просто вихрь, а какая-то еще более значительная сила — своего рода смерч в мантии. Чаще всего такие стремительно вращающиеся (разумеется, по геологическим меркам) плиты тяготеют к ослабленным, пронизываемым зонам в коре и литосфере, где контактируют мантийные массы с различными физическими характеристиками, аналогично тому, как это наблюдается в зоне субдукции. В таких зонах наиболее вероятно возникновение

смерча. Последний словно вбирает в себя вещество, поднимая его с глубинных и более разогретых горизонтов вверх. Если подобный механизм действует в мантии, то под быстро вращающимися плитами следует ожидать наличие узкого столба горячего и разуплотненного вещества с низкими сейсмическими скоростями.

Именно такую картину мы наблюдаем в мантии двух типичных «горячих точек»: островов Исландии и Пасхи. Их возникновение, как принято считать, связано с восходящими мантийными потоками. Оба острова 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 в одном, так и в другом районах присутствуют микроплиты с очень высокими скоростями вращения. Ян-Майенская микроплита, расположенная к северу от Исландии, имела скорость вращения около 3 град/млн лет, а микроплита Пасхи вращается с еще большей скоростью — ~15 град/млн лет. В этих районах построено по три сейсмотомографических разреза, ориентированных в различных направлениях и характеризующих строение верхней и нижней мантии до глубин более 2000 км (рис. 7). Под Исландией обнаружен 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). Дополнительным аргументом в пользу того, что данные каналы — не просто восходящие, но и интенсивно вращающиеся потоки разогретого мантийного вещества, является ярко вы-

раженная стратификация верхней мантии. В обоих районах в вертикальном разрезе отчетливо выделяются горизонты с различными скоростями сейсмических волн. Такие условия особенно благоприятны для формирования интенсивно закрученного вихря.

Справедлива ли подобная гипотеза для объяснения природы других «горячих точек», предстоит выяснить. Известно, что далеко не всегда им соответ-

ствуют в мантии зоны пониженных скоростей. Однако напомним, что смерч — 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 данный район внутриплитного вулканизма.

Фактор нелинейной среды в геодинамике

Создание и внедрение в практику методов сейсмомографии, спутниковой геодезии и геофизики, изотопной геохимии, экспериментальной минералогии и других передовых технологий стимулировали быстрое развитие нового научного направления в науках о Земле — глубинной геодинамики [8]. Несомненно, концепция

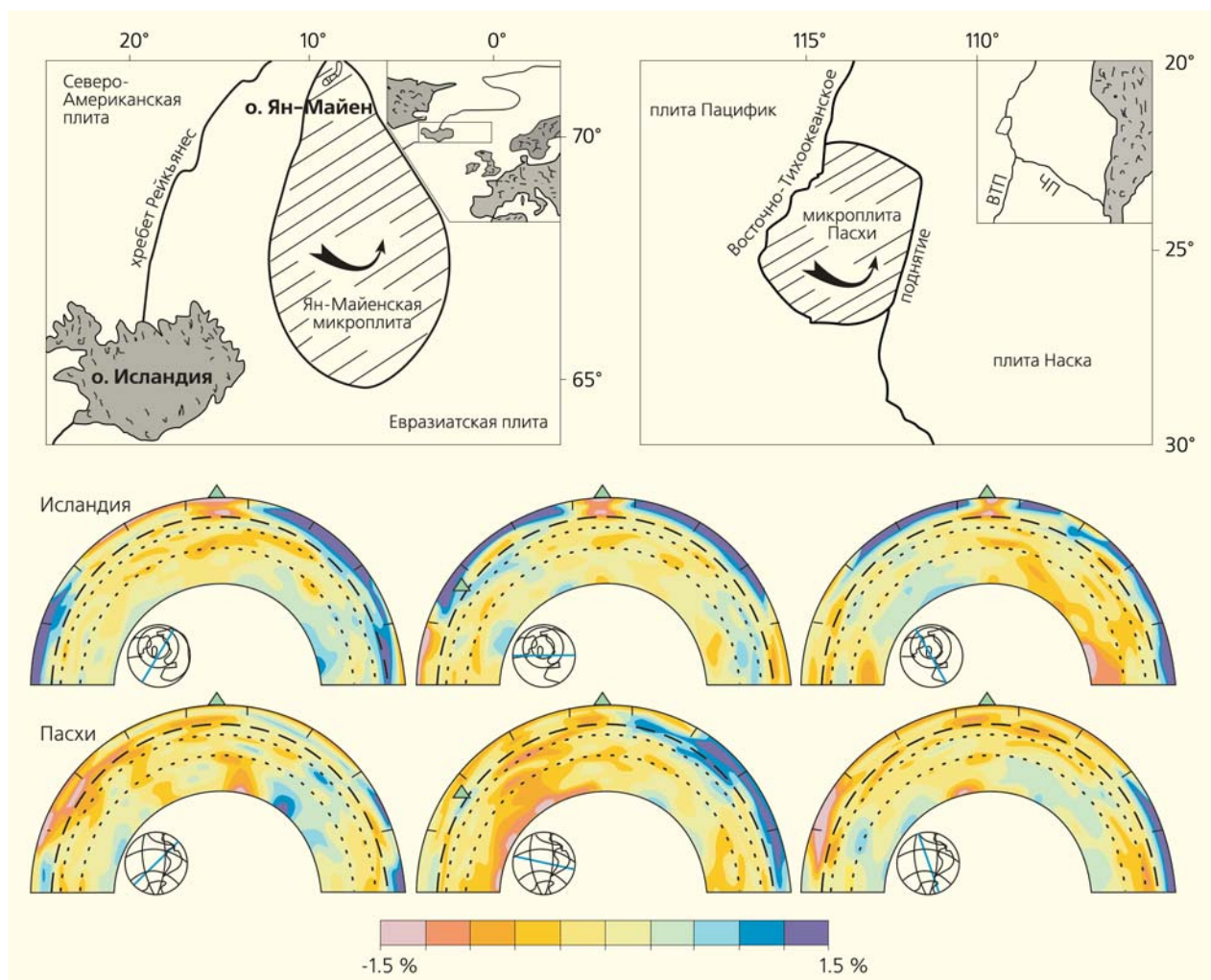


Рис.7. Микроплиты в Атлантическом и Тихом океанах, характеризующиеся высокой угловой скоростью вращения: Ян-Майенская микроплита — 3 град/млн лет (слева) и Пасхи — 15 град/млн лет (справа). Стрелки — направление их вращения. На врезках показано расположение микроплит (ВТП — Восточно-Тихоокеанское поднятие, ЧП — Чилийское поднятие). Возможно, высокие скорости обусловлены воздействием мантийных смерчей. Об этом свидетельствует наличие в мантии каналов, в которых скорости сейсмических волн существенно понижены. Каналы видны на сейсмомографических разрезах, показанных внизу [9]. Оттенки синего цвета — повышенные (относительно средних, в %) скорости распространения сейсмических волн, красного цвета — пониженные. Пунктирные линии на разрезах: утолщенная — граница на глубине 670 км, тонкие — глубины соответственно 1000 и 1700 км.

нелинейности геолого-геофизической среды станет одним из стержней этого направления. Много предстоит сделать, преодолев как объективные трудности (резкое усложнение аппарата описания глубинных процессов), так и субъективные препятствия психологического свойства (приверженность к традиционным моделям). Последнее обстоятельство ранее других поняли геофизики, предмет исследования которых — сама геолого-геофизическая среда [2]. Тем не менее совершенно очевидно, что переход к новым представлениям неизбежен, и он вполне назрел.

Можно с уверенностью предполагать, что придется пересмотреть ряд представлений о природе и формах мантийной конвекции. Для объяснения причин движения литосферных плит обычно прибегают к такому сравнению: плиты подобны льдинам на реке, увлекаемым течением. Они перемещаются поступательно, вращаются, если в течении существует водоворот, наплывают друг на друга или раздвигаются — в общем, ведут себя в соответствии со структурой водного потока. В свете рассмотренных выше данных о пространственно-временной неустойчивости формирования океанских бассейнов и вихревых структурах литосферы такой образ представляется вполне оправданным. Мантия Земли, так же, как и другие ее оболочки (водная и воздушная), характеризуется раз-

нообразием движений — поступательных, вихревых, возможно, еще и других типов. И это главный вывод, который следует из рассмотрения ее как нелинейной открытой системы. Разумеется, эти движения несравнимо более медленные, чем во внешних оболочках, но их природа сходна. Таким образом, на вопрос, поставленный в заголовке статьи о возможности существования в твердых оболочках Земли вихрей и смерчей, можно с уверенностью ответить: да, они существуют. Большинство имеющихся на сегодняшний день моделей мантийной конвекции (тепловая, термомеханическая, химико-плотностная и др.) не учитывают такого многообразия. Однако использование новых представлений о свойствах среды открывает дополнительные перспективы совершенствования таких моделей.

Разнообразие движений в мантии Земли снимает проблему взаимоотношения между мантийными потоками, ответственным за кинематику плит, и восходящими плюмами, с которыми связано возникновение «горячих точек» в литосфере. Долгое время они казались несовместимыми — вплоть до того, что были сформулированы самостоятельные концепции тектоники плит и тектоники плюмов. С позиции же нелинейности среды никакого противоречия нет, ибо и поступательные, и вихревые движения принадлежат единой структуре мантийной конвекции.

Чрезвычайно большие различия в размерах вихревых структур свидетельствуют о том, что при едином физическом механизме природа вихревых движений связана с динамикой существенно различных по глубине внутренних оболочек Земли. Вихри глобального масштаба (размером многие тысячи километров) могут быть обусловлены ротационным фактором. Оболочки планеты имеют различную вязкость и другие физические характеристики, они вращаются вокруг центральной оси с различной скоростью, как бы проскальзывают одна относительно другой (дифференциальное вращение оболочек). Так, дифференциальное вращение мантии и литосферы по существу эквивалентно течению мантии в восточном направлении [8]. Очевидно, что это течение неустойчиво, прежде всего из-за блуждания полюсов (смещения оси вращения планеты). Данный фактор, по всей вероятности, и вызывает вихреобразное закручивание разнопорядковых зон раздвига при распаде мегаконтинента, а также возникновение наиболее крупных вихревых структур континентальной литосферы.

Наконец, отметим, что вихревые структуры, кроме Мирового океана и атмосферы, известны в макромире (галактики, имеющие форму вихря) и микромире (закрученные в виде вихря молекулы). Теперь настало время активного изучения таких структур в коре, мантии, и, возможно, в еще более глубоких недрах нашей планеты. ■

Литература

1. Мирлин Е.Г., Кононов М.В., Суцневская Н.М. // Докл. РАН. 2005. Т.401. №34. С.1—4.
2. Проблемы геофизики XXI века. М., 2003.
3. Пуцаровский Ю.М. // Геотектоника. 2003. №4. С.3—13.
4. Lebran J.-F., Lamarch G., Collot J.-Y. // J. of Geophysical Research. 2003. V.108. №B9. P.ETG 15-1—15-8.
5. Мирлин Е.Г., Зорина Ю.Г. // Геотектоника. 1992. №1. С.21—33.
6. Neev D., Hall J.K. Mantle-produced counterclockwise vortices along the northern Mediterranean belt (A genetic hypothesis for the Alpine systems) // Mitt. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg, 1984. V.56. P.111—127.
7. Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский, 2004.
8. Хаин В.Е. Современная геодинамика: достижения и проблемы // Природа. 2002. №1. С.1—23.
9. Ritsema J., Allen R.M. // Earth and Planetary Sci. Letters. 2003. V.207. P.1—12.