

УДК 551.2

СТАТИСТИКА ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ОКЕАНСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ

© 2010 г. Е.Г. Мирлин¹, М.В. Кононов², Г.С. Голицын³¹ Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва, Россия² Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, г. Москва, Россия³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

Определены размеры (радиус, суммарная длины и угол закручивания) вихревых структур океанской литосферы, выявленных по материалам спутниковой альтиметрии в западном секторе Тихого океана и юго-восточном Индийского; проведена статистическая обработка этих параметров. Выполнена оценка кинематических характеристик (угловой скорости закручивания оси спрединга и скорости ее продвижения, угловой скорости вращения отдельных блоков коры) вихревых движений, сопряженных с эволюцией спрединговых систем Мирового океана, включая зону сочленения Тихого океана с Евразией и Австралией. Параметры вихревых структур изменяются в весьма широком диапазоне – от одного до трех порядков. Установлено, что угловая скорость закручивания оси в процессе эволюции спрединговых систем задуговых и междуговых бассейнов в зоне сочленения заметно превосходит аналогичный параметр эволюции протяженных спрединговых систем срединно-океанических хребтов (СОХ). Распределение вероятностей изучаемых характеристик оказывается близкими к логарифмически нормальному. Предполагается, что выявленный факт широкого развития вихревых структур различных категорий и рангов, а также вихревых движений с относительно высокой интенсивностью в зоне сочленения отражает вихревую компоненту движения в верхней мантии, на которую ранее не обращалось внимания. Полученные результаты ставят проблему специального исследования вихревой компоненты перемещения вещества в глубинах Земли и ее влияния на структурный облик коры и литосферы, а также задачу физического описания свойств геофизической среды, в которой возможны движения именно вращательного и вихревого типа.

Ключевые слова: вихревая структура, вихревое движение, литосфера, спрединговая система, линеймент, задуговой бассейн, изохрона.

Введение

В атмосфере Земли наблюдается исключительно большое разнообразие вихревых движений, что обусловлено влиянием на ее динамику сил различного происхождения [Пальмен, Ньютон, 1973] и в большой степени связано с наличием собственного вращения планеты. В континентальной литосфере структуры, имеющие в плане форму вихря, были открыты в конце 20-х годов XX в. китайским геологом Ли Сы-Гуаном [Lee, 1928], который в последующем посвятил им две монографические работы (одну в соавторстве) [Ли Сы-гуан, 1958; Ли Сы-гуан, Сунь Дянь-цин, У Лей-бо, 1960]. Определяя этот тип структур (совершенно новый для геологии того времени), авторы отмечали, что их “специфической особенностью является наличие чередующихся дугообразных прерывистых оболочек вращения, асимметрично и неравномерно окружающих ядро – основной стержень структуры. Ядра подобных структур обычно располагаются вне центра поверхности вращения в ее боковой стороне” [Ли Сы-гуан, Сунь Дянь-цин, У Лей-бо, 1960, с. 5]. Были выделены разноранговые (от первых метров до километров) вихревые структуры, главным образом, с вертикальными осями вращения. При этом детально исследовались все геолого-структурные признаки вращательных движений,

включая обусловленное ими пространственное распределение трещин, разрывов и разломов в горных породах, деформаций в них, а также сколы в гальках и др. Совокупность этих признаков не оставляет сомнений в том, что рассматриваемые структуры земной коры сформировались под воздействием именно вращательных движений масс горных пород. Другая возможная причина формирования этих структур – присутствие под литосферой “горячих областей”, в которых вещество движется вихревым образом.

Позже геологи-тектонисты неоднократно обращали внимание на структуры континентальной земной коры, имеющие в плане спиралевидную форму [Слензак, 1972; Соловьев, 1978; Neev, Hall, 1982; Арсеньев, Корчуганова, 2000; Вихри..., 2004; Муравьев, 2006, и др.]. Так, в южной Европе выделены две весьма сходные по морфологии системы – Альпо-Апеннинская и Карпато-Балканская, – образованные соответствующими складчатыми поясами весьма большой протяженности; в поперечнике размеры этих структур составляют несколько сотен километров [Кац и др., 1989]. Размеры наиболее крупных континентальных систем такого вида достигают в поперечнике тысяч километров. Неоднократно обращалось внимание на сходство морфологии рассматриваемых структур с атмосферными вихрями.

Огромный фактический материал, накопленный к настоящему времени по вихревым и кольцевым структурам литосферы, делает весьма актуальным исследование их природы. Более того, этот материал стал основой для рассмотрения комплекса структур, обязанных своим происхождением ротационному фактору – и вращению нашей планеты в целом, и вращению отдельных блоков ее литосферы, – в рамках специально выделенной ротационной тектоники [Дмитриевский, Володин, Шупов, 1993; Ротационные..., 2007; Khain, Poletaev, 2007]. В то же время, ни в одной из существующих моделей мантийной конвекции [Turcotte, Shubert, 1982; Монин и др., 1987; Лобковский, 1988; Трубицын, Рыков, 1993; Артюшков, 1993, и др.] присутствие вихревых составляющих потоков вещества не анализируется.

В настоящее время на основе анализа совокупности всех имеющихся данных показана доминирующая роль движений вихревого типа в формировании современных океанских впадин, т.е. двух третей земной поверхности [Мирлин, Кононов, Суцеская, 2005; Мирлин, 2006]. Движения такого типа проявляются рядом структурно-эволюционных феноменов на глобальном, региональном и локальном уровнях. Сформулированы четкие критерии, позволяющие выделять структуры вихревого типа и вихревые движения, сопровождающие процесс спрединга. Назовем основные из них:

особенности эволюции океанских впадин – продвижение (пропагеттинг) оси спрединга с одновременным ее закручиванием, вследствие чего контуры впадин с океанической корой приобретают плавные, закругленные очертания, в которые как бы “вложена” более сложная ступенчатая геометрия спрединговых систем;

формирование разноранговой сегментации океанского ложа и многочисленных структур типа “пулл-апарт”, т.е. обусловленных сочетанием раздвига вкрест оси спрединга с растяжением вдоль нее, возникающим как результат присутствия вихревой компоненты в перемещении плит;

возникновение тектонической расслоенности литосферы, разделяющейся на отдельные литопластины, которые смещаются друг относительно друга по субгоризонтальным поверхностям раздела вследствие дифференциального вращения разноранговых объемов вещества в вихревом потоке;

образование в областях наибольшего закручивания вихревых систем структур сжатия земной коры, обусловленных сжимающими напряжениями; при этом, чем сильнее выражено закручивание, тем интенсивнее сжимающие напряжения;

развитие в пределах “пассивных” окраин континентов складчатых деформаций, которые обусловлены спецификой вихревого движения.

Кроме вихревых спрединговых систем в Мировом океане распространены также имеющие в плане вихревую и спиралевидную геометрию структурные линеаменты, выделенные на основе анализа геоморфологических и геофизических данных. Эти линеаменты достаточно широко развиты в западном секторе Тихого океана и юго-восточном Индийского, где они ассоциируются с островодужными и внутриплитными системами [Мирлин, Углов, 2007; Углов, Мирлин, 2008].

Все эти факты делают весьма актуальным специальное целенаправленное изучение спиралевидных и вихревых структур литосферы, а также вихревых движений в оболочках Земли, которые принято считать “твердыми”. Первый и естественный шаг в этом направлении – проведение количественной оценки геометрических параметров и статистических характеристик структур такого рода. Получаемые данные дадут возможность приступить к решению проблемы специального исследования вихревой компоненты перемещения вещества в глубинах Земли и ее влияния на структурный облик коры и литосферы, а также задачи физического описания свойств геофизической среды, в которой возможны движения именно вращательного и вихревого типа.

Возможность решения поставленной задачи в значительной мере определяется степенью современной изученности вихревых структур литосферы. С этой точки зрения, задача может быть разделена на две, различные по сложности и требующие для своего решения различного исходного материала. Первая задача состоит в определении размеров вихревых структур – их радиусов, суммарной длины и суммарных углов закручивания. Вторая задача представляется более сложной – это количественная оценка угловой скорости вращения блоков литосферы, сопровождающего возникновение структур вихревого типа. Данная задача отличается от традиционной для тектоники плит. Основными параметрами кинематики плит являются полюса их вращения и углы поворота, которые рассчитываются на основе анализа простираания линейных магнитных аномалий и трансформных разломов [Ле Пишон, Франшито, Бонин, 1977]. Соответствующие кинематические характеристики определены для всех плит, что позволило построить глобально увязанную модель их размеров и углов поворота за миллион лет [Bird, 2003]. Что касается количественной оценки угловых скоростей вращения блоков как основного параметра вихревого движения, то такого рода оценка не проводилась. Очевидно, что для этого требуются исходные материалы исследований, которые характеризуют не только современную структурную геометрию литосферных вихрей, но и ее изменение во времени.

Несмотря на то, что по объектам с вихревой геометрией в пределах континентальной литосферы накоплен обширный материал, он пригоден лишь для самых приближенных определений их параметров. Причина в том, что на континентах проявления геологических объектов, имеющих в плане форму вихря, как правило, затушеваны в результате многоэтапности и наложенности геологических процессов. Как следствие, возникает неоднозначность выделения контуров и границ вихревых структур. Тем более сложно воспользоваться этими материалами для количественной оценки вращательных движений, под воздействием которых сформировались рассматриваемые вихревые структуры.

Невозможность применения на данном этапе палеомагнитного метода для количественных оценок вихревых движений связана с недостаточной палеомагнитной изученностью большинства выявленных континентальных вихревых структур. Для проведения таких оценок необходимы палеомагнитные исследования, специально ориентированные на решение этой задачи. Известно, что современная кинематика блоков (в основном, континентальных) может быть установлена с помощью спутниковых геодезических систем *GPS*. Опыт использования данных спутниковой геодезии демонстрирует ряд примеров вращательных движений блоков континентальной литосферы для разных регионов Земли, в частности, для Западной Евразии [Гатинский и др., 2007] и других регионов мира. Но, в целом, имеющиеся данные *GPS* по континентальным структурам вихревого ти-

па малоприспособны для решения обеих задач – и первой (установление размеров структур), и второй (количественная оценка скорости закручивания структур).

По этой причине мы обратились к материалам по уже выявленным вихревым структурам в пределах ложа океана. Во-первых, многие из них поддаются четкому описанию, достаточному для вычисления их размеров. Во-вторых, на основе анализа кинематики раскрытия океанских спрединговых систем, которая отражена в расположении изохрон океанской коры и трансформных разломов, возможно определение углов поворота литосферных блоков для различных временных срезов и последующее определение угловых скоростей закручивания.

Отметим, что практически во всех работах, посвященных вихревым структурам литосферы, внимание исследователей сосредоточено на их качественном описании. В связи с этим можно предполагать, что излагаемая ниже методика количественной оценки размеров вихревых объектов и вихревых движений является, по сути, первым опытом в данном направлении и в дальнейшем будет совершенствоваться и уточняться.

Характеристика исходных данных

В работах, посвященных вихревым структурам океанской литосферы, используются разнообразные геолого-геофизические материалы – от данных детального эхолотного промера до спутниковых альтиметрических карт, – что позволяет выявлять вихревые структуры самого разного масштаба. Наиболее приемлемые материалы для определения размеров вихревых структур, их радиусов, длины и углов закручивания – это сведения об упоминавшихся выше линейных элементах океанского дна в западном секторе Тихого и юго-восточном секторе Индийского океанов, многие из которых в плане имеют вихревую геометрию. Такого рода линейные элементы выделены на основе частотного анализа подводного рельефа, рассчитанного по данным спутниковой альтиметрии [Sandwell, Smith, 1997]. Применение частотной фильтрации, методика которой описана в работе [Углов, Мирлин, 2008], исключало длинноволновую компоненту рельефа. В его коротковолновой части (“остаточный” рельеф) выделялись отдельные, имеющие в поперечнике размеры от 30 до 100–150 км изометричные поднятия дна (включая острова) и подводные горы, возвышающиеся над сглаженным рельефом более чем на 500 м (рис. 1).

В “остаточном” рельефе доминируют линейные в плане морфоструктуры (линейные элементы) – как отрицательные, к которым относятся глубоководные желоба, так и положительные. При этом было установлено, что многие подводные горы и изолированные поднятия расположены не хаотично, а вытянуты вдоль прямых линий и линий, имеющих форму вихря или спирали. Можно говорить о различных категориях линейных элементов, расположение которых в исследуемом регионе Мирового океана показано на рис. 1; основные рассматриваемые линейные элементы на рисунке пронумерованы от № 1 до № 42.

Типичными линейными элементами, образующими в плане почти прямую линию, являются линейные элементы №№ 23–26, состоящие из цепочек подводных вулканов, природа которых связана, как полагают, с деятельностью “горячих точек”. Многочисленные имеющие вид спирали или вихря линейные элементы весьма различны по протяженности. Среди них выделяются те, которые образованы подводными горами и/или изометрическими поднятиями (№№ 32–34 и др.), а также те, которые представляют собой закрученные окончания островодужных систем (№№ 12, 19, 20 и др.).

Были изучены 226 выделенных вихревых объектов, но какого-либо доминирующего направления закручивания для всех них выделить не удалось; не прослежено также доминирующее направление закручивания в северном и южном полушариях. Тем не менее можно отметить, что южные окончания островодужных систем Яп, Идзу-Огасавара и Марианской имеют тенденцию к закручиванию в западном направлении,

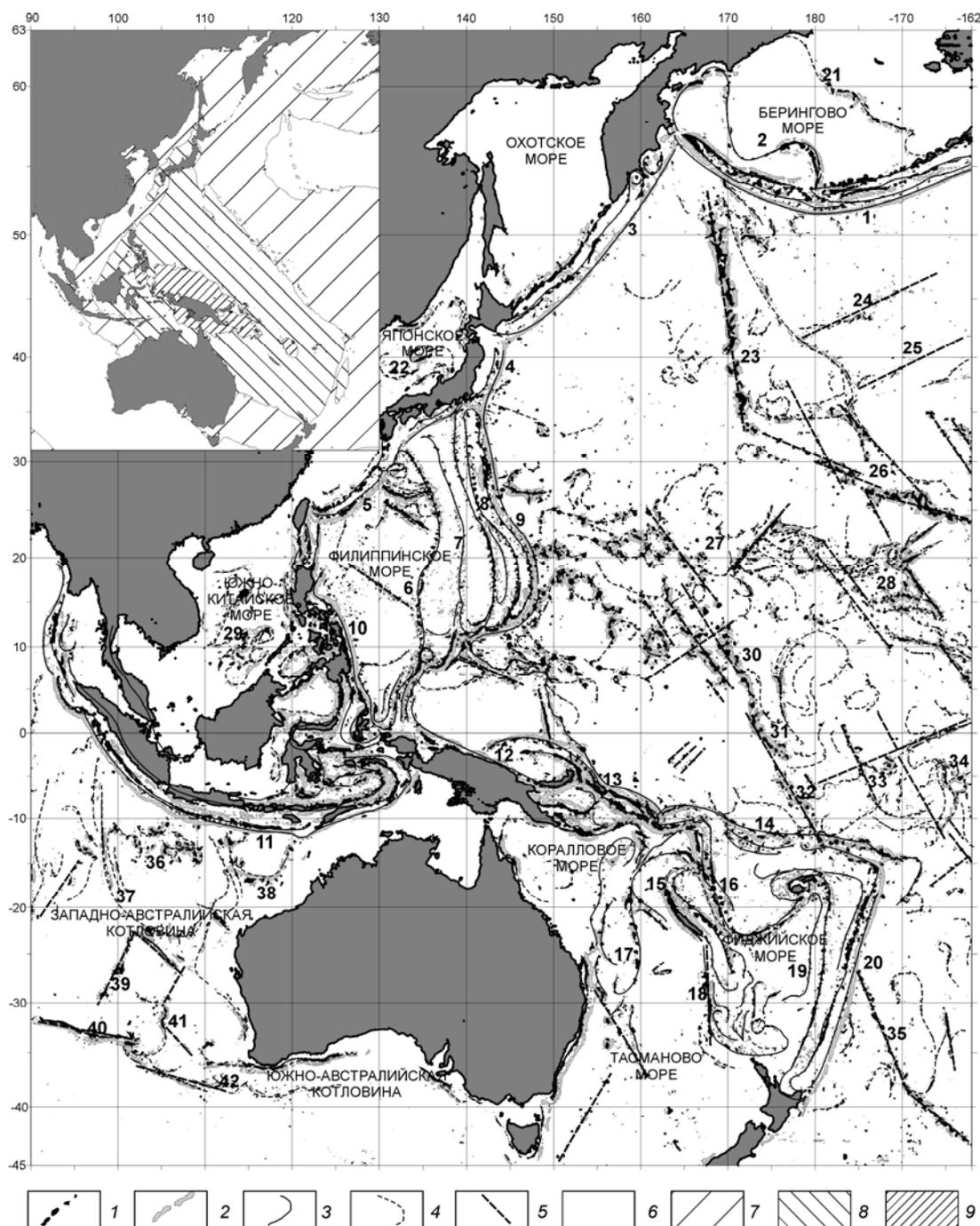


Рис. 1. Вихревые линейменты в западном секторе Тихого океана и юго-восточном Индийского, состоящие из отдельных поднятий и подводных гор [Мирлин, Углов, 2007]. На врезке – схема высот геоида. 1 – поднятия дна, острова и подводные горы, возвышающиеся над сглаженным рельефом более чем на 500 м; 2 – желоба и впадины, погруженные более чем на 500 м относительно сглаженного рельефа; 3 – линейменты, образованные островодужными системами (1 – Алеутской, 2 – Ширшова-Бауэрс, 3 – Курило-Камчатской, 4 – Японской, 5 – Нанкай-Рюкю, 6 – Кюсю-Палау, 7 – Яп, 8 – Идзу-Огасавара, 9 – Марианской, 10 – Филиппинской, 11 – Зондской, 12 – Ново-Гвинейской, 13 – Соломоновой, 14 – Самоанской, 15 – Лоялти, 16 – Ново-Гебридской, 17 – Лорд-Хау, 18 – Норфолк, 19 – Колвилл-Хау, 20 – Тонга-Кермадек); 4 – линейменты, образованные подводными горами и изометрическими поднятиями предположительно вулканической природы (21 – Прибылова, 22 – Ямато, 23 – Императорские, 24 – Чинук, 25 – Мендосино, 26 – Гавайские, 27 – Маркус-Неккер, 28 – Лайн, 29 – Южно-Китайские, 30 – Маршалловы, 31 – Гилберта, 32 – Тувалу, 33 – Токелау, 34 – Кука, 35 – Луисвил, 36 – Веннинг-Мейнеса, 37 – Инвестигейтор, 38 – Арго, 39 – Ист-Индиамен, 40 – Брокен, 41 – Хартог, 42 – Даймантина); 5 – линейменты, образованные поднятиями предположительно тектонической природы. 6–9 – высоты геоида (на врезке): от –70 м до –5 м (6), от –5 м до 30 м (7), от 30 м до 60 м (8), от 65 м до 90 м (9)

а спиралевидные линеаменты, образованные подводными поднятиями в Центральной котловине Тихого океана, закручены в восточном (поскольку в данной статье в большинстве случаев речь идет о тенденции к закручиванию вихревых систем в литосфере океанов, то в отличие от атмосферных вихрей, говоря о его направлении, мы будем указывать, восточное оно или западное).

Многие вихревые линеаменты состоят из двух или даже трех частей, закрученных в разные стороны, т.е. как бы включают в себя две или три вихревые структуры. Этой особенностью геометрии определяется значительное (226) количество вихревых структур, пригодных для определения их основных размеров – радиусов, суммарной длины и углов закручивания. Однако, несмотря на количество структур, ограниченные данные о возрасте составляющих их подводных поднятий не позволяют установить кинематику их формирования, т.е. провести оценку угловых скоростей закручивания.

Основной объект исследований при решении второй задачи – это вихревые спрединговые системы океанской литосферы. Последовательное рассмотрение возрастных срезов палеогеодинамических реконструкций распада Пангеи от поздней юры до современности на основе анализа изохрон океанской коры показало, что развитие всех зон спрединга включает в себя продвижение (пропагеттинг) оси раздвига с одновременным ее вихреобразным закручиванием, о чем упоминалось выше. В результате, на начальной стадии фрагментации суперконтинента конфигурацию практически всех первоначальных рифтовых впадин, независимо от их размеров, в плане можно аппроксимировать вихреобразными структурами. Их дальнейшее развитие происходит неравномерно во времени и пространстве. Они могут продолжать эволюционировать (за счет раздвига, его продвижения и закручивания), могут прекращать свое развитие и отмирать; в этих случаях формируются спрединговые системы с явно выраженным в плане вихреобразным рисунком. Эволюция структур может быть осложнена возникновением и развитием новых вихревых структур, отличающихся от первоначальных размерами и направлением пропагеттинга, чей структурный рисунок оказывается более сложным.

Рассмотренная тенденция эволюции структурной формы свойственна практически всем достаточно хорошо изученным звеньям срединно-океанических хребтов (СОХ) в Мировом океане, а также задуговым и междуговым спрединговым бассейнам независимо от того, заложились они в результате разрыва континентальной или океанской литосферы. Соответственно, границами вихревых спрединговых систем являются пассивные окраины континентов, вулканические островные дуги, изохроны океанической коры, маркирующие возраст последней крупной перестройки системы спрединга, трансформные разломы и псевдоразломы, возникающие при пропагеттинге.

На данном этапе изученности вихревых спрединговых систем литосферы трудно говорить об отмечаемом для атмосферных вихрей различии в направлении закручивания (знаках вихрей) для северного и южного полушарий земного шара (т.е. о наличии какого-либо преобладающего направления). Представляется, что знак литосферных вихрей в обоих полушариях равновероятен, но этот вывод требует уточнения.

Методика определения размеров вихревых структур и угловых скоростей закручивания спрединговых систем

Для решения первой задачи каждая из выделенных вихревых структур в западном секторе Тихого океана и юго-восточном Индийского аппроксимировалась кривой линией. Затем эти линии были разделены на небольшие и равные по протяженности отрезки, к центральной точке каждого из которых проводилась касательная (рис. 2). Углы между касательными (α) суммировались, в результате чего определялся суммарный угол закручивания для каждой вихревой структуры $\alpha = \alpha_1 + \dots + \alpha_n$.

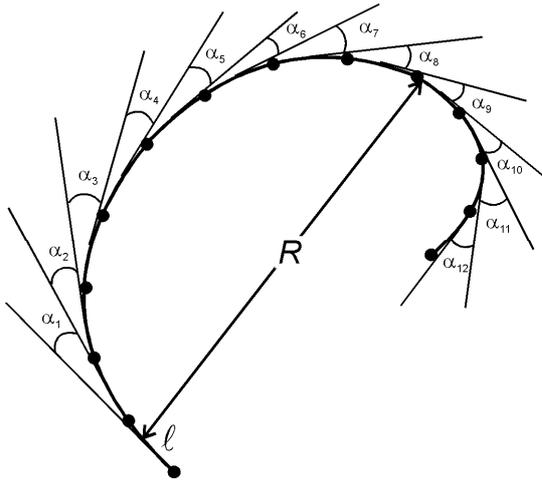


Рис. 2. К методике определения суммарного угла закручивания (α), суммарной длины (L) и радиуса (R) вихревой структуры. Пояснения см. в тексте

Далее криволинейные отрезки вихревой структуры аппроксимировались отрезками прямой линии (l), длина которых была различной в зависимости от степени кривизны вихревой структуры: для сильно закрученных структур она была меньше, чем для структур с небольшой крутизной. Затем все отрезки суммировались, и определялась суммарная длина вихревой структуры $L = l_1 + \dots + l_n$.

Радиус структуры (R) определялся по аппроксимирующей ее кривой линии; при этом, поскольку структуры асимметричны, из всех возможных радиусов для каждого из вихрей рассчитывалась его наибольшая величина (см. рис. 2).

При раскрытии океанского бассейна в процессе эволюции вихревой спрединговой системы в силу специфики вихревого движения, наряду с поступательным движением блоков коры относительно оси раздвига плит, происходит и их вращение вокруг самостоятельной оси. Это вращение отражается в смене простирания изохрон коры (магнитных аномалий) и в возникновении разноранговых сегментов зон спрединга. Зная возраст изохрон и угол между их простиранием, можно определить угловую скорость вращения отдельных блоков, границами которых служат изохроны, маркирующие кору с определенным возрастом. Другими словами, можно определить параметр, сходный по своему смыслу с вихрем, возникающим при вихревых процессах в других средах (мгновенная угловая скорость). Например, для жидкости в сосуде, вращающемся вокруг центральной оси со скоростью ω , вихрь равен 2ω [Кочин и др., 1955]. Соответствующие расчеты иллюстрирует рис. 3: блоки коры, заключенные между изохроной t_3 (осью спрединга) и изохронами t_2 , отодвигаются от оси со скоростью V , одновременно вращаясь вокруг соответствующих осей (показаны точками) с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 . Угловые скорости вращения блоков (град./млн. лет) определяются через соотношения $\omega_1 = \beta_1/\Delta t$; $\omega_2 = \beta_2/\Delta t$, где β_1 , β_2 – углы поворота каждого из блоков в интервалы времени между соответствующими изохронами.

Однако, как это будет видно из дальнейшего, далеко не во всех проанализированных спрединговых системах степень их закручивания достаточно велика для количественной оценки угловой скорости вращения отдельных блоков. По этой причине угловая скорость закручивания определялась для вихревой спрединговой системы в целом. Она рассчитывалась по величине угла, на который изменилось простирание совокупности изохрон океанской коры в течение интервала времени, которому эти изохроны соответствуют. В большинстве изученных спрединговых систем углы между простиранием соседних изохрон невелики; для них удастся определить лишь величину угла, на который изменилось простирание оси за достаточно длительный интервал времени.

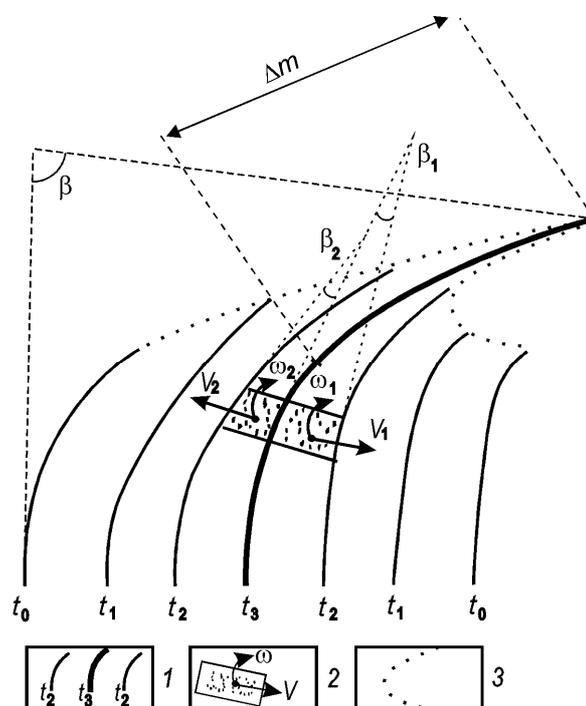
Чаще всего этот интервал соответствует периоду времени от начала эволюции конкретной спрединговой системы либо до настоящего времени, либо до момента пре-

крашения процесса спрединга (для отмерших спрединговых систем). Так, на рис. 3 показан фрагмент спрединговой системы с изохронами океанской коры для периода времени t_0-t_3 . Угловая скорость закручивания определяется соотношением $\omega = \beta/\Delta t$, где β – угол изменения простирания в течение периода времени $\Delta t=t_3-t_0$.

Для спрединговых систем, в которых геометрия линейных магнитных аномалий и трансформных разломов позволяла это сделать, была определена также скорость пропегейтинга оси раздвига V_p . Она рассчитывалась по формуле $V_p=\Delta m/\Delta t$, где Δm – расстояние, на которое продвинулась ось спрединга в течение периода времени между соответствующими изохронами $\Delta t = t_3 - t_0$.

Кроме кинематических характеристик для каждой вихревой спрединговой системы была определена суммарная длина ее осевой зоны, что делалось для облегчения сопоставления размеров рассматриваемых структур. Методика расчета длины аналогична изложенной выше для определения суммарной протяженности вихревых структур в западном секторе Тихого и юго-восточном секторе Индийского океанов (см. рис. 2).

Рис. 3. К методике определения угловых скоростей закручивания вихревых спрединговых систем, скоростей пропегейтинга оси раздвига, угловых скоростей вращения отдельных блоков океанской коры на основе анализа геометрии изохрон вихревой спрединговой системы. 1 – изохроны океанской коры для моментов времени t_0-t_3 , утолщенная линия – ось спрединга; 2 – блоки океанской коры, отодвигающиеся от оси спрединга со скоростью V и испытывающие вращения с угловой скоростью ω ; 3 – внешние границы спрединговой системы. β_1 и β_2 – углы поворота блоков коры за период времени $t_3 - t_2$. Δm – расстояние, на которое продвинулась ось спрединга за период времени $t_3 - t_1$. Пояснения см. в тексте



Размеры вихревых структур в западном секторе Тихого и юго-восточном секторе Индийского океанов

Согласно распространенной точке зрения, литосфера в западном секторе Тихого океана находится под влиянием многочисленных “горячих точек” и “горячих полей” в мантии. Соответственно, большинство из рассматриваемых ниже вихревых структур может быть образовано вулканическими сооружениями, возникшими в связи с протекающими в таких областях процессами. Гистограммы распределения параметров вихревых структур (рис. 4, а,б,в) свидетельствуют, что большинство структур (около 180 из 226) имеет радиус от 60 до 330 км. Диапазон изменения данного параметра весьма широк – минимальный радиус составляет 30 км, а максимальный превышает 1200 км. Одна из таких гигантских вихревых структур с координатами центра 8° с.ш. и 180° в.д.,

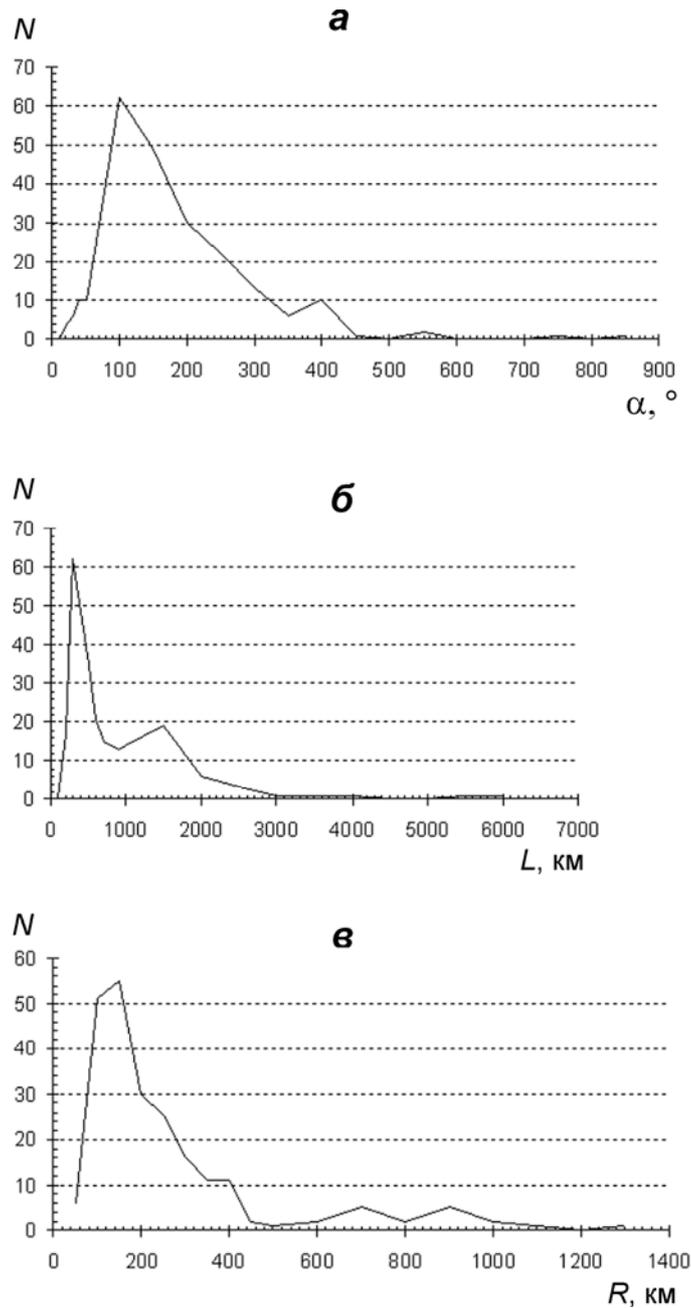


Рис. 4. Гистограммы распределения трех параметров вихревых структур – углов закручивания α (а), суммарных длин L (б), радиусов R (в)

образованная серией подводных гор и небольших изолированных поднятий дна, располагается к востоку от Маршалловых островов (№ 30 на рис. 1). Другая исключительно крупная вихревая структура лежит к востоку от Императорской цепи подводных гор (№ 23 на рис. 1).

Наибольшее количество подводных вихревых структур в этом регионе Тихого океана (около 190) имеет длину от 200 до 1000 км, хотя обнаружены и аномально протяженные вихревые образования, длина которых достигает 6000 км. К ним относится упомянутая выше структура к востоку от Императорских гор (№ 23 на рис. 1), а также весьма протяженная система подводных гор Токелау (№ 33 на рис. 1).

Наиболее часто встречающиеся значения угла закручивания вихревых структур (около 60–90%) лежат в диапазоне от 40° до 230° . Но, как и для двух других параметров,

существуют структуры с аномально большими углами закручивания 380° – 540° ; максимальное значение превышает 800° . Столь большие значения углов связаны с тем, что расчеты проводились для вихревых структур, состоящих из частей, “завихренных” в разные стороны. Примером может служить протяженная структура, включающая в себя подводные горы Кука (№ 34 на рис. 1).

Статистически распределение всех трех параметров изучаемых структур – R , L и α – выглядит близким к логарифмически нормальному. Такое распределение возникает при независимом дроблении горных пород на случайные и некоррелируемые элементы, как это было установлено в 1941 г. А.Н. Колмогоровым [1941]. Процесс образования изучаемых вихревых структур, которые произвольно разбросаны по поверхности Земли и имеют небольшую пространственную плотность, можно считать случайным и некоррелированным, по крайней мере, в пространстве. Данное предположение и объясняет логарифмически нормальный характер распределения.

Были рассчитаны также графики взаимной корреляции между парами параметров вихревых структур: угол–радиус, радиус–длина, угол–длина. Выяснилось, что отчетливый тренд наблюдается лишь в последнем случае – на графике корреляции между длиной структуры и ее углом закручивания отмечен рост суммарного угла с увеличением длины. Это свидетельствует о том, что в исследуемом регионе преобладают протяженные и одновременно существенно закрученные структуры, а протяженные и слабо завихренные практически отсутствуют.

Кинематические характеристики вихревых спрединговых систем

С использованием рассмотренной выше методики была проанализирована структурная геометрия двадцати спрединговых систем, относящихся ко всем геодинамическим обстановкам раздвига – на гребне СОХ с различными скоростями спрединга, в зоне сочленения Тихоокеанской плиты с Евразией и Австралией в пределах задуговых и междуговых бассейнов (рис. 5). Суммарная длина и основные кинематические характеристики (угловая скорость закручивания оси, скорость ее продвижения, угловая скорость вращения отдельных блоков коры для некоторых систем) приведены в таблице.

Некоторые из приведенных в таблице параметров требуют дополнительного пояснения. Спрединговые системы Хуан Фернандес (№ 2) и Пасхи (№ 3) представляют собой небольшие по протяженности системы линейных магнитных аномалий, природа которых связана с вращением одноименных микроплит на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) (здесь и далее в скобках после названия системы указан ее номер в таблице и на рис. 5). Широко развитые на гребне ВТП перекрывающиеся оси спрединга (ПОС), которые проявляются в морфоструктуре гребня в виде удлинённых невысоких возвышенностей протяженностью от первых до первых сотен километров, также могут быть отнесены к вихревым образованиям. Основанием для этого служит отмечаемая особенность их эволюции – продвижение одной из ветвей сопровождается ее искривлением в направлении другой, т.е. закручиванием. Время жизни наиболее крупных ПОС не превышает первых миллионов лет [Дубинин, Ушаков, 2001]. Согласно морфоструктурным схемам и модельным экспериментам, объясняющим механизм возникновения ПОС, углы поворота блоков коры в их пределах в среднем составляют 10 – 15 градусов [Macdonald, Fox, 1983]. Отсюда следует, что скорости закручивания оси при образовании ПОС могут составлять около 10 – 15 град./млн. лет при том, что скорость продвижения оси для небольших по протяженности ПОС (№№ 4, 5) близка к 30 км/млн.лет (3 см/год). В то же время, для одной из крупных ПОС на гребне ВТП между 32° – 28° ю.ш. по магнитным аномалиям была установлена наиболее высокая из всех известных скорость пропегейтинга – 500 км/млн. лет (50 см/год) [Korenaga, Hey, 1996].

Основные кинематические характеристики вихревых спрединговых систем

№ (см. рис. 5)	Название	Длина спрединговой системы L , км	Скорость закручивания оси ω , град./млн. лет	Скорость вращения отдельных блоков коры $\omega_1, \omega_2, \dots$, град./млн. лет	Скорость пропегейтинга оси V_p , км/млн. лет
1	Восточно-Тихоокеанское поднятие (ВТП), северное звено	6156	0.8	–	–
2	Микроплита Хуан Фернандес	282	6.8	–	33.4
3	Микроплита Пасхи	523	7.8	–	50.0
4	ПОС близ $12^\circ 55'$ ю.ш.	7	10–15		30
5	ПОС близ $5^\circ 30'$ с.ш.	23	10–15		30
6	СОХ Мона-Книповича	862	0.8	–	–
7	Норвежская котловина	410	1.9	–	–
8	Аденский залив, Центрально-Индийский СОХ	6058	1.6	–	–
9	Восточно-Африканские рифты, рифт Таджура, Аденский залив, Центрально-Индийский СОХ	6130	5.7	–	–
10	Западно-Индийский СОХ	3519	0.3	–	–
11	Котловина Сикоку	676	4.3	1.9, 2.3, 2.4	177.3
12	Котловина Паресе Вела	1245	2.4	2.0, 2.7	–
13	Западно-Филиппинская котловина	868	1.6	1.7, 2.9, 3.1, 7.5, 8.5	–
14	Котловина Вудларк	556	4.9	–	105.9
15	Северо-Фиджийская котловина, южный блок	512	–	7.8, 7.8, 8.1, 13.3, 14.4	7.3, 66.2
16	Северо-Фиджийская котловина, северный блок	418	–	11.3, 11.9, 20.8, 22.0,	–
17	Котловина Лау-Хавр	2031	4.8	5.2, 6.4, 9.5	23.4
18	Система Фиджи (в целом)	2961	30.7	–	–
19	Южно-Китайская котловина	1056	2.2	4.2	38.8
20	Тасманова котловина	1245	2.0	–	127.0

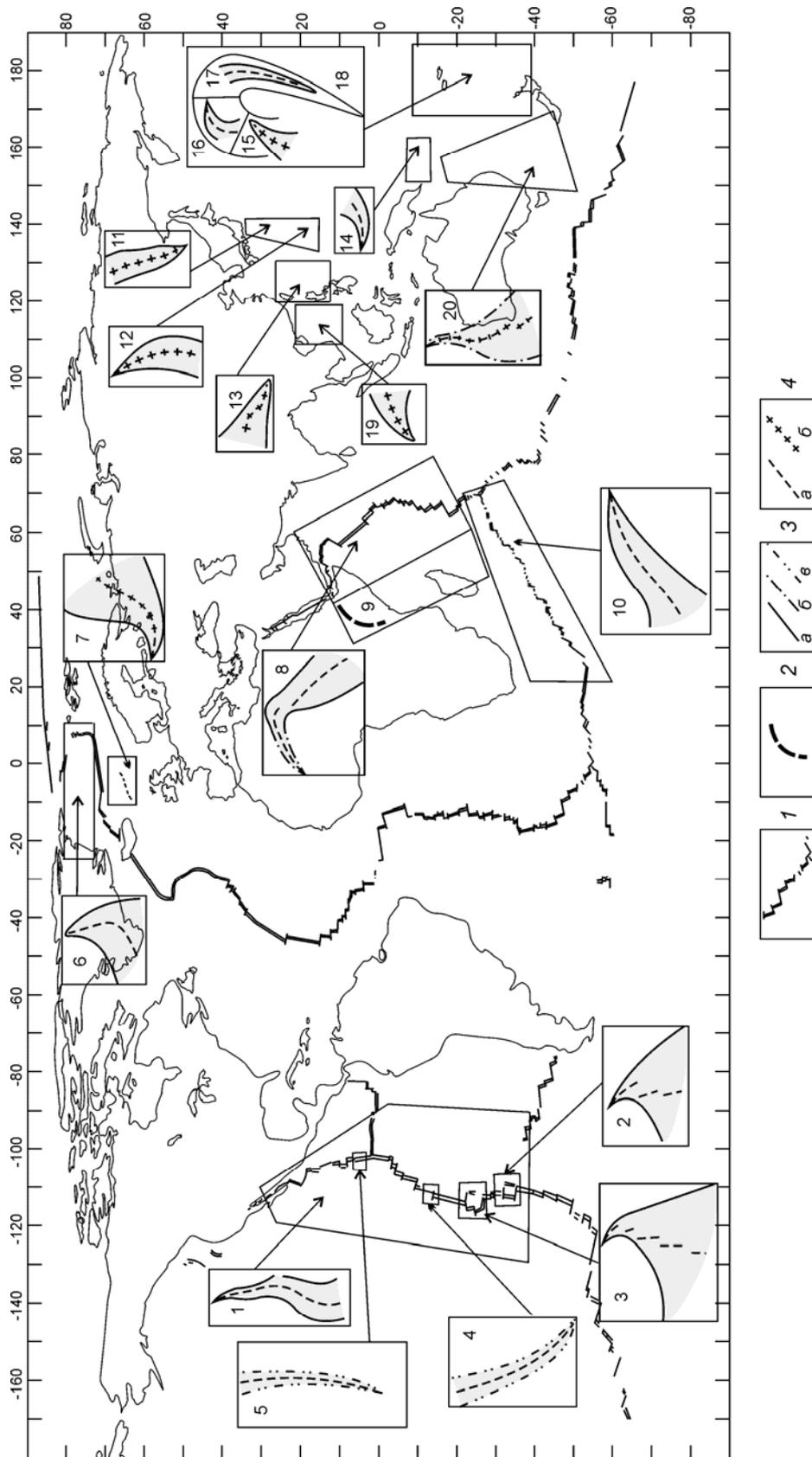


Рис. 5. Схема расположения в Мировом океане вихревых спринговых систем (№№ 1–20) и их форма в плане (на врезках): 1 – Восточно-Тихоокеанское поднятие, северное звено; 2–3 – зоны спринга микропланта Хуан Фернандес (2), Пасхи (3); 4–5 – ПОС близ 12° 55' ю.ш. (4) и близ 5° 30' с.ш. (5); 6 – СОХ Мона-Книповича; 7 – Норвежская котловина; 8 – Аденская котловина; 9 – Восточно-Африканские рифты, рифт Таджура, Аденский залив; 10 – Западно-Индийский СОХ; 11–20 – зона сочленения Тихого океана с Евразией и Австралией: котловина Сикоку (11), котловина Паресе Вела (12), Западно-Филиппинская котловина (13), котловина Вудларк (14), Северо-Фиджийская котловина, южный блок (15) Северо-Фиджийская котловина, северный блок (16), котловина Лау-Хавр (17), система Фиджи в целом (18), Южно-Китайская котловина (19), Тасманова котловина (20). Количественные характеристики систем см. в таблице. 1 – ось СОХ; 2 – ось СОХ; 3 – ось СОХ; 4 – ось СОХ; 5 – ось СОХ; 6 – ось СОХ; 7 – ось СОХ; 8 – ось СОХ; 9 – ось СОХ; 10 – ось СОХ; 11 – ось СОХ; 12 – ось СОХ; 13 – ось СОХ; 14 – ось СОХ; 15 – ось СОХ; 16 – ось СОХ; 17 – ось СОХ; 18 – ось СОХ; 19 – ось СОХ; 20 – ось СОХ. 1 – ось СОХ; 2 – ось СОХ; 3 – ось СОХ; 4 – ось СОХ; 5 – ось СОХ; 6 – ось СОХ; 7 – ось СОХ; 8 – ось СОХ; 9 – ось СОХ; 10 – ось СОХ; 11 – ось СОХ; 12 – ось СОХ; 13 – ось СОХ; 14 – ось СОХ; 15 – ось СОХ; 16 – ось СОХ; 17 – ось СОХ; 18 – ось СОХ; 19 – ось СОХ; 20 – ось СОХ.

Спрединговая система в Норвежской котловине (№ 7) относится к числу тех, которые в настоящее время прекратили свою активность; разрастание океанского дна завершилось в ее пределах примерно 27 млн. лет назад, но вихревой характер спрединга весьма отчетливо проявляется в геометрии изохрон (линейных магнитных аномалий). Вихревые системы спрединга в северо-западной части Индийского океана рассмотрены в двух вариантах. В первом случае анализировались спрединговые системы Аденского залива и Центрально-Индийского СОХ (№ 8), во втором (№ 9) это сочетание было дополнено Восточно-Африканскими рифтами и рифтом Таджура. Последние можно рассматривать как континентальное звено единой вихревой зоны раздвига, которая в процессе продвижения оси и закручивании как бы вторгалась вглубь Африканского континента. Соответственно, скорость закручивания оси во втором случае оказывается более высокой.

Номерами 11–20 обозначены спрединговые системы задуговых и междуговых бассейнов в пределах зоны сочленения Тихоокеанской и Индо-Австралийской плит с Евразией и Австралией. Среди них наибольший интерес вызывает вихревая спрединговая система Фиджи (№ 18 – в целом), включающая в себя несколько спрединговых блоков, расположенных в Южно-Фиджийской котловине (в таблице не представлены), Северо-Фиджийской котловине (№ 15 – северный блок; № 16 – южный) и в котловине Лау-Хавр (№ 17). Оценка кинематических характеристик спрединговой системы в Южно-Фиджийской котловине затруднена в силу того, что в ее пределах в олигоцен–раннем миоцене существовало тройственное сочленение зон спрединга. По этим причинам в таблице приводятся соответствующие характеристики для двух спрединговых блоков в Северо-Фиджийской котловине, для спрединговой системы в котловине Лау-Хавр, а также для спрединговой системы Фиджи в целом. Вихревой характер ее эволюции проявлен исключительно отчетливо – раздвиг начался в Южно-Фиджийской котловине (поздний миоцен), а затем его ось стала продвигаться на север и одновременно закручиваться. Это привело к расщеплению вулканической островной дуги, в результате чего сформировались ныне отмершая дуга (хребет Колвилл-Лау), активная в настоящее время вулканическая дуга, а также котловина Лау-Хавр, в которой спрединг продолжается и поныне. Примерно за 30 млн. лет, прошедших с момента образования данной спрединговой системы, ось раздвига в результате закручивания изменила свою ориентировку почти на 180° , т.е. почти на противоположную. Это иллюстрирует рис. 6, на котором показаны спрединговые блоки, из которых состоит вихревая система Фиджи, а также направление пропегейтинга оси раздвига.

Заключение

Рассмотрим в заключение возможную природу вихревых движений и вихревых структур в литосфере и возникающие в связи с этим задачи физического содержания.

Одним из главных результатов проведенной нами количественной оценки вихревых структур является установление факта изменения их размеров в чрезвычайно широких пределах. Так, радиус, суммарная длина и суммарный угол закручивания внутриплитных структурных объектов с вихревой геометрией в зоне сочленения Тихого и Индийского океанов с Евразией и Австралией меняется более чем на порядок. В еще большем диапазоне изменяются кинематические характеристики вихревых спрединговых систем: длина оси спрединговых вихрей меняется почти на три порядка (от 7 км для одного из ПОС до 6156 км для северного звена ВТП); угловая скорость закручивания их оси меняется более чем на два порядка (от 0.3 град./млн. лет для Юго-западного Индийского СОХ до 30.7 град./млн. лет для спрединговой системы Фиджи). Угловая скорость вращения отдельных блоков коры в пределах спрединговых систем меняется примерно

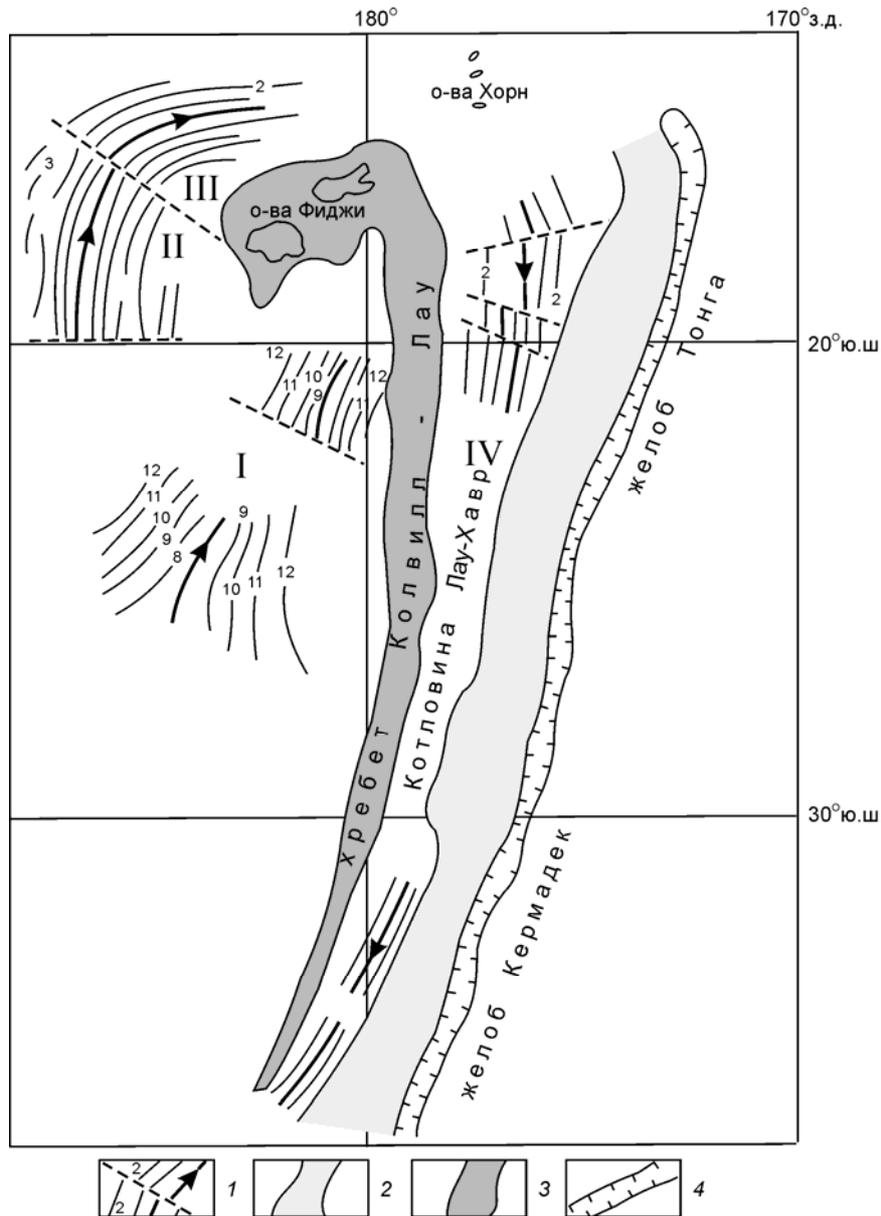


Рис. 6. Основные блоки вихревой спрединговой системы Фиджи: Южно-Фиджийская котловина (I), южный (II) и северный (III) блоки Северо-Фиджийской котловины, котловина Лау-Хавр (IV)

I – штриховые линии – трансформные разломы; сплошные линии – оси магнитных аномалий, цифры на которых – градация возраста ложа в млн. лет: 2 – 2.0; 3 – 5.0; 8 – 28.0; 9 – 30.0; 10 – 32.0; 11 – 34.0; 12 – 35.0; стрелки – направление пропегейтинга оси раздвига; 2, 3 – активная (2) и отмершая (3) островные дуги; 4 – глубоководный желоб

на порядок: от 1.7 град./млн. лет (Западно-Филиппинская котловина) до 22.0 град./млн. лет (северный сегмент спрединговой системы Фиджи); более чем на порядок меняется скорость пропегейтинга оси раздвига (от 7.3 км/млн. лет в южном сегменте системы Фиджи до 177.3 км/млн. лет в котловине Сикоку).

Кроме того, обращают на себя внимание два факта. Во-первых, наибольшее количество структур с отчетливой вихревой геометрией в плане развито в пределах зоны сочленения Тихоокеанской плиты с Евразией и Австралией и в прилегающем к ней регионе Тихоокеанской плиты. Во-вторых, угловая скорость закручивания оси, характерная для эволюции протяженных вихревых спрединговых систем СОХ (северного звена

ВТП, Аденского залива и Центрально-Индийского СОХ, срединных хребтов Мона и Книповича), относительно невелика и не превышает 1.6 град./млн. лет. Она значительно уступает скоростям закручивания спрединговых систем в задуговых и междуговых бассейнах, расположенных в зоне сочленения Тихоокеанской плиты с Евразией и Австралией. Минимальная скорость закручивания здесь составляет 1.6 град./млн. лет (Западно-Филиппинская котловина), а максимальная достигает 30.7 град./млн. лет (система Фиджи в целом). Последнее значение вообще является самым высоким из всех определенных нами значений угловых скоростей закручивания. Довольно высокими (6.8–7.8 град./млн. лет) значениями угловых скоростей закручивания оси характеризуются небольшие по протяженности спрединговые системы Хуан Фернандес и Пасхи, а также ПОС на гребне ВТП.

С учетом полученных результатов и отмеченных выше фактов, перейдем к вопросу о возможном механизме возникновения вихревых структур и движений вихревого типа в литосфере. Прежде всего, отметим, что в геологической литературе уже высказывались мнения, что их природа может быть сходной как с природой атмосферных вихрей, так и с вихрями в Мировом океане, которые также весьма разнятся по своим размерам и кинематическим параметрам [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Структурный..., 1994; Вихри..., 2004; Мирлин, 2006]. Рассматриваемые в данной работе вихревые структуры выделены на основе анализа морфоструктуры подводного рельефа, палеогеодинамических реконструкций и эволюции структурной геометрии океанских котловин. Некоторые из исследуемых структур имеют, по-видимому, тектоническое происхождение. В то же время, многие вихревые структуры образованы цепочками гор и линейных поднятий коренного ложа и, как указывалось выше, имеют вулканическую природу. Специфика их морфотектоники может быть обусловлена влиянием вихревого движения вещества в “горячих точках” и “горячих полях” мантии. Согласно имеющимся данным, возраст структур колеблется от первых десятков миллионов лет до 100–120 млн. лет и, во всяком случае, не превышает возраста литосферы в данном регионе Мирового океана (верхняя юра – нижний мел). Зная возраст вихревой структуры (10^7 лет) и скорость ее образования (5 см в год или $5 \cdot 10^{-5}$ км в год), можно вычислить ее размер: $5 \cdot 10^{-5}$ км/г · 10^7 лет = 500 км. Следовательно, с геологической точки зрения, наблюдаемые размеры вихрей литосферы представляются разумными по порядку величин.

Есть все основания полагать, что рассматриваемые нами вихревые структуры (по крайней мере, наиболее крупные из них) отражают вихревую компоненту движения в верхней мантии, на которую ранее не обращалось внимания. Как известно из гидродинамики [Кочин, Кибель, Розе, 1955; Saffman, 2000], причинами образования вихрей в потоке служат граничные условия, вихревая природа действующих сил (неравенство нулю ротора действующих сил), неоднородности в распределении плотности по сравнению с распределением давления. Все эти факторы присутствуют в полях скорости движений в мантии Земли – основной движущей силы глобальных геотектонических процессов; они же оказывают влияние на распределение напряжений в хрупкой коре, покрывающей мантию сверху. В пограничных слоях мантии, прилегающих к твердой границе, образуются вихри как с горизонтальными, так и вертикальными осями. Проявленные в рельефе океанского фундамента вихревые структуры, по всей видимости, обязаны своим происхождением вихрям с вертикальными осями в поле скоростей течений в мантии. Такие вихри сопровождают восходящие термические потоки [Лаврентьев, Шабат, 1977]. Восходящие движения собирают вещество со своих окрестностей на больших расстояниях от оси потоков, концентрируя тем самым угловой момент (момент количества движения), связанный с вращением всей планеты как целого. Таков же механизм образования ураганов в атмосфере [Пальмен, Ньютон, 1969].

Разница состоит лишь в том, что атмосферные вихри формируются в течение суток, а для мантийных – это десятки и сотни миллионов лет. Говоря языком механики, вихревую природу имеет сила Кориолиса, связанная с вращением системы, в данном случае – Земли.

О том, что в северо-западном регионе Тихого океана может существовать субвертикальный восходящий поток, свидетельствуют весьма большие (более 80 м) высоты геоида (см. врезку на рис. 1). Это максимальные на нашей планете высоты тяготеют к той части зоны сочленения океан–континент, где вихревые системы широко распространены и выражены наиболее ярко. Дополнительным фактором, способствующим формированию многочисленных вихревых структур в западном секторе Тихого, является, по-видимому, мантийный поток, сопровождающий субдукцию относительно более холодной и плотной литосферы Тихоокеанской плиты под более разогретую и легкую литосферу Евразии и Австралии. Об этом свидетельствуют многочисленные спрединговые задуговые и междуговые бассейны в пределах зоны сочленения данной плиты с сопредельными континентами, в эволюции которых прослеживается вихревая компонента [Мирлин, Зорина, 1992]. Приведенный выше пример вихревой спрединговой системы Фиджи является наглядным подтверждением сказанного.

В то же время, вихревые движения, приводящие к формированию малых вихреобразных структур (в частности, ПОС на гребне ВТП) могут быть обусловлены неустойчивостью потоков вещества вдоль оси срединных хребтов; наличие таких потоков для некоторых СОХ установлено с высокой надежностью.

Отметим, что литосферные плиты – не вечные образования, они могут раскалываться и воссоединяться, “залечивая” ранее существовавшие границы раздела. В работе [Bird, 2003] оцениваются углы поворота пятидесяти одной плиты относительно 52-ой – Тихоокеанской. В среднем, углы поворота составляют около 1° за млн. лет, но эта цифра растет с уменьшением размера плит. В статье Г.С. Голицына [2008] по данным Берда построен график распределения угловых скоростей поворота плит в зависимости от их размера. Наибольшей угловой скоростью (около 55 град./млн. лет) обладает самая малая плита Манус со средним размером в поперечнике около 100 км. Если рассматривать плиты на поверхности мантии как льдины на поверхности океана, то движение плиты складывается из ее поступательного перемещения как целого и вращения. Последнее возможно, если есть границы, более или менее свободные для такого вращения. Угловая скорость вращения плиты Манус близка к 10 град./млн. лет, а линейная скорость на ее границе составляет порядка 10 см/год, что выглядит вполне разумным. Это также объясняет возникновение вихревых структур на дне океана, которые могут образовываться как на активных границах плит, так и на древних, уже “залеченных”. Именно таким образом могла образоваться упоминавшаяся выше зона спрединга в Норвежской котловине.

В заключение подчеркнем, что сам факт широкого распространения в океанской литосфере структур вихревого типа наряду с вихревыми и вращательными движениями делает весьма актуальными следующие задачи:

усовершенствование модели мантийной конвекции с целью учета ее вихревой компоненты;

оценка напряжений на верхней границе литосферы, возникающих под влиянием этой компоненты и определяющих структурный облик как земной коры, так и литосферы в целом;

физическое описание свойств геофизической среды, в которой возможны движения именно вращательного и вихревого типа [Садовский, Болховитинов, Писаренко, 1982].

Благодарности

Один из авторов (Е.Г. Мирлин) выражает признательность Б.Д. Углову за плодотворное сотрудничество.

Литература

- Арсеньев В.А., Корчуганова Н.И.* Вихревые структуры континентов: новые аспекты строения, условий образования, металлогенического значения (на примере юго-восточной части Канадского щита) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2000. № 4. С.134–138.
- Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский. Изд-во Камчатского общественного фонда “Наука – для Камчатки” Камчатского ГПУ: Петропавловск-Камчатский, 2004. 297 с.
- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С.* Блочные структуры и кинематика Западной Евразии // Геотектоника. 2007. № 1. С.30–42.
- Голицын Г.С.* О распределении числа литосферных плит по размерам // Физика Земли. 2008. № 3. С.3–8.
- Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 351 с.
- Дубинин Е.П., Ушаков С.А.* Океанический рифтогенез. М.: ГЕОС, 2001. 293 с.
- Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д.* Кольцевые структуры Земли: миф или реальность. М.: Наука, 1989. 157 с.
- Колмогоров А.Н.* О логарифмически нормальном распределении размеров частиц при дроблении // Докл. АН СССР. 1941. Т. 31, № 2. С.99–101.
- Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Гл. 5. Изд. 5-е. М.: ГИТТЛ, 1955. 480 с.
- Лавреньев М.А., Шабат Б.В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 408 с.
- Ле Пишон К., Франито Ж., Бонин Ж.* Тектоника плит. М.: Мир, 1977. 287 с.
- Ли Сы-гуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.; Л.: Госгеолтехиздат, 1958. 130 с.
- Ли Сы-гуан, Сунь Дянь-цин, У Лей-бо.* Вихревые и другие структуры вращения и проблемы сочетания тектонических систем. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 119 с.
- Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.
- Мирлин Е.Г.* Проблема вихревых движений в «твердых» оболочках Земли и их роли в геотектонике // Геотектоника. 2006. № 4. С.43–60.
- Мирлин Е.Г., Зорина Ю.Г.* Раскрытие океанских и окраинных спрединговых бассейнов: сравнительный анализ // Геотектоника. 1992. № 1. С.21–33.
- Мирлин Е.Г., Кононов М.В., Суцевская Н.М.* Вихревые спрединговые системы в литосфере и верхней мантии океанов // Докл. РАН. 2005. Т. 401, № 4. С.1–4.
- Мирлин Е.Г., Углов Б.Д.* Новые данные о структурной геометрии линеаментов в западном секторе Тихого и юго-восточном секторе Индийского океанов // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 1. С.1–4.
- Монин А.С., Сеидов Д.Г., Сорохтин О.Г., Сорохтин Ю.О.* Численное моделирование мантийной конвекции // Докл. АН СССР. 1987. Т. 294, № 1. С.58–63.
- Муравьев В.В.* Системные принципы и параметры структурной организации геопространства // Геоинформатика. 2006. № 3. С.121–125.
- Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. Гл. 15. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 676 с.
- Ротационные процессы в геологии и физике. М.: КомКнига, 2007. 528 с.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* О свойстве дискретности горных пород // Физика Земли. 1982. № 12. С.3–18.

- Слензак О.И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наук. думка, 1972. 181 с.
- Соловьев В.В. Структуры центрального типа территории СССР. Л.: Недра, 1978. 184 с.
- Структурный анализ при палеогеодинамических реконструкциях. Гл. ред. Н.В. Межеловский. М.: Роскомнедра, Госкомнедра Украины, Геокарт, МАНПО, 1994. 256 с.
- Трубицын В.П., Рыков В.В. Мантийная конвекция с плавающими континентами / Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С.7–28.
- Углов Б.Д., Мирлин Е.Г. Тектонические линейменты западной части Тихого и северо-восточной части Индийского океанов и связь с ними современного колчеданообразования // Отечественная геология. 2008. № 4. С.59–67.
- Bird P. An updated digital model of plate boundaries // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2003. V. 4, N 3. P.1027, doi: 10.1029/2001 GC 000252.
- Dubois J., Cheminee J.L. Fractal analysis of eruptive activity of some basaltic volcanoes // *J. Volcanology and Geothermal Res.* 1991. V. 45, N 3/4. P.197–208.
- Khain V., Poletaev A. Earth rotation tectonics // *Science in Russia*. 2007. N 6. P.4–21.
- Korenaga J., Hey R.N. Recent dueling propagation history at the fasted spreading center, the East Pacific Rise, 26-38 S // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101, N B8. P.18023–18041.
- Lee J.S. Some characteristic structural types in Eastern Asia and their bearing upon the problems of continental movements // *Geol. Mag.* 1928. LXVI. P.422–430.
- Macdonald K.C., Fox P.J. Overlapping-spreading centers: new accretion geometry on the East Pacific Rise // *Nature*. 1983. V. 302. P.55–58.
- Neev D., Hall J.K. A global system of spiraling geosutures // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87, N B13. P.10689–10708.
- Saffman P.G. *Vortex Dynamics*. Cambridge Univ. Press, 1992. (рус. пер.: Динамика вихрей. М.: Науч. мир, 2000. 376 с.)
- Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine gravity anomaly from GEOSAT and ERS satellite altimetry // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P.10039–10054.
- Turcotte D.L., Shubert G. *Geodynamics*. N.Y.: John Wiley and Sons, 1982. V. 1/2. 436 p.

Сведения об авторах

МИРЛИН Евгений Гилельевич – доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 2, ГГМ РАН. Тел.: 629-76-97. E-mail: egm@sgm.ru

КОНОНОВ Михаил Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, ИО РАН. Тел.: 148-99-01. E-mail: mv kononov@mail.ru

ГОЛИЦЫН Георгий Сергеевич – академик, научный руководитель института, советник РАН, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 117017, Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: 951-55-65. E-mail: mail_adm@ifaran.ru

THE STATISTICS OF THE VORTICAL STRUCTURES OF OCEAN LITHOSPHERE

E.G. Mirlin¹, M.W. Kononov², G.S. Golitsyn³

¹W.I. Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³A.M. Obuchov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The sizes of vortical structures of ocean lithosphere (radius, total length and a twisting angle) in the western sector of Pacific ocean and southeast sector of Indian ocean, revealed on materials satellite altimetry are defined; statistical processing of these parameters is carried out. Estimations of kinematic characteristics of the whirls motions conjugated to evolution of spreading systems of the World ocean, including a zone of a joint of Pacific ocean with Eurasia and Australia (angular speed of a twisting of an axis spreading and speeds of its propagation, angular speed of rotation of separate blocks of a crust) are executed. It is established that angular speed of a twisting of an axis in the course of spreading systems evolution of backarc and interarc basins in a joint zone considerably surpasses similar parameter of evolution extended spreading systems of mid-ocean ridges. The received results put a problem of special research of vortical components of substance movements in depths of the Earth and its influence on structural shape of crust and lithosphere, and also a problem of the physical description of properties of the geophysical environment in which motions of rotary and vortical type are possible.

Keywords: vortical structure, vortical movement, lithosphere, spreading system, lineament, backarc basin, isochrone.