

## Дискуссии

УДК 551.24

### РОЛЬ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ В ГЕОДИНАМИКЕ ЭГЕЙСКОГО МОРЯ (НА ОСНОВЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА С ГЕОДИНАМИКОЙ КОТЛОВИНЫ ВУДЛАРК)

© 2014 Е.Г. Мирлин, Ю.В. Миронов

*Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, 125009;  
e-mail: egmmir@gmail.com*

Геодинамика Эгейского моря как задугового бассейна рассмотрена на основе сравнительного анализа с геодинамикой задуговой спрединговой котловины Вудларк (активная окраина Евразии). Показано, что в кинематике раскрытия и в современном строении котловины, а также в строении и эволюции северо-восточной и юго-западной (Критское море) областей Эгейского моря наблюдаются признаки вихревой компоненты движения. К ним относятся: закругленные, вихреподобные контуры обеих областей; изменение плановой геометрии впадин в пределах северо-восточной области (включая впадину Мраморного моря) как следствие совокупного воздействия раздвиговой и сдвиговой компонент; присутствие напряжений сжатия в области замыкания вихревой структуры; тектоническая расслоенность коры; специфика магматизма. Впадины в пределах Эгейского моря, а также впадина Мраморного моря образуют единую геодинамическую систему, сформированную под воздействием вихревой компоненты раскрытия.

*Ключевые слова: вихревое движение, геодинамика, магматизм, спрединг, задуговой бассейн.*

#### ВВЕДЕНИЕ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С точки зрения плитотектонической парадигмы геодинамика Восточного Средиземноморья определяется «захлопыванием» палеоокеана Тетис. Его погружение под Евразию сопровождалось формированием островных дуг и задуговых бассейнов, к которым относится и Эгейское море (рис. 1). Как и во многих других задуговых бассейнах Евразии, процесс растяжения литосферы в Эгейском море характеризовался неустойчивостью. Как следствие, его формирование было двухэтапным: на раннем этапе была сформирована юго-западная (Критское море), на позднем – северо-восточная области моря. Они разделены поднятием дна, увенчанным архипелагом Киклады с нормальной по мощности континентальной корой. В настоящее время «захлопывание» океана Тетис, субдукция и альпийская складчатость продолжают (Хаин, Ломизе, 2005; Atlas ..., 1993).

Согласно мнению подавляющего числа исследователей, на глобальном уровне господ-

ствующая в настоящее время концепция тектоники плит применительно к Восточному Средиземноморью «работает» достаточно удовлетворительно (Хаин, Ломизе, 2005; Kahle, Mueller, 1998; Savostin et al., 1986 и др.). Вместе с тем, на уровне отдельных морских бассейнов и фрагментов коры возникает существенная неоднозначность в истолковании кинематической модели раскрытия Эгейского моря, основанной исключительно на движениях жестких плит и блоков. Так, в период с 1972-1978 гг. (McKenzie, 1972, 1978) до 2004 г. было построено восемь таких моделей. Они отличаются не только степенью детальности (что, отчасти, может быть связано с появлением новых данных), но и характером распределения в пространстве зон деформаций.

Деформации литосферы особенно отчетливо выявляются при анализе материалов, полученных с помощью глобальной системы позиционирования GPS. Это касается, прежде всего, Анатолийской плиты, в пределах которой исследования такого рода в последние годы были осо-

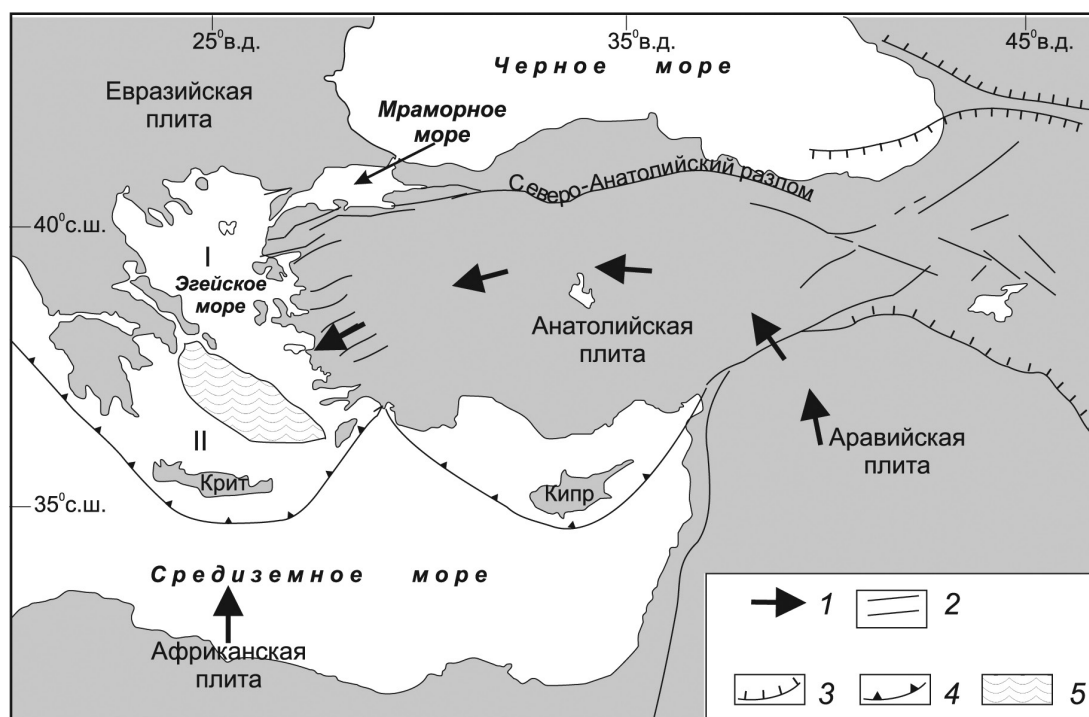


Рис. 1. Литосферные плиты и основные структурные элементы Восточного Средиземноморья: 1 – генеральное направление движения плит и блоков; 2 – сбросы и сдвиги, 3 – надвиги; 4 – зоны конвергенции плит; 5 – массив Киклады, разделяющий северо-восточную (I) и юго-западную (II) области Эгейского моря по (Orhan Tatar et al., 2012) с изменениями.

бенно интенсивны. С точки зрения плитотектонической модели ее движение как единого целого относительно Евразии описывается простым вращением против часовой стрелки вокруг полюса, расположенного в восточной части Средиземного моря к югу от Кипра (Le Pichon et al., 1995). Но вектора движения, определенные с помощью GPS, дают гораздо более сложную кинематическую картину: отдельные блоки внутри Анатолийской плиты испытывают разнонаправленные движения, близкие к вращательным. Тем не менее, как отмечают сами авторы исследований, вектора в совокупности образуют форму, близкую вихрю (Nyst, Thatcher, 2004). Это находит отражение на схеме основных плит литосферы Восточного Средиземноморья и их кинематики (рис. 1). В пользу существования в пределах изученной территории относительно мелко-масштабных неоднородностей коры, каждая из которых имеет свой вектор движения, указывают и данные по распределению зон деформаций, а также зон повышенной сейсмичности и тектонических форм подводного рельефа в Эгейском море (Nyst, Thatcher, 2004; Orhan Tatar, 2012).

Таким образом, и накопленные многочисленные геолого-геофизические материалы, и их истолкование делают актуальным поиск альтернативного подхода к разработке геодинамической модели Эгейского моря. В настоящей работе мы поставили задачу рассмотреть его геодинамику на основе развиваемых в последние годы пред-

ставлений о вихревых движениях в «твердых» оболочках Земли. Хотя интерес к структурам вихревого типа в литосфере и, соответственно, к движениям такого рода насчитывает уже не один десяток лет (Ли Сы-Гуан, 1954; Слензак, 1972; Lee, 1928 и др.), они вновь стали вновь привлекать к себе внимание уже в недавнее время (Арсеньев, Корчуганова, 2000; Викулин, 2008, 2010; Викулин, Тверитинова, 2007, 2008; Вихри..., 2004; Мирлин, 2006; Тверитинова, Викулин, 2005 и др.). Несомненно, этому способствовала разработка отечественными исследователями принципиально новой концепции природной среды литосферы – геосреды, согласно которой она характеризуется разноранговой неоднородностью (Николаев, 2003; Садовский, 1986; Keilis-Borok, 1990) и становится более похожей на систему «перетекающих жидких сгустков, чем на укоренившуюся в нашем воображении земную твердь» (Садовский, Писаренко, 1989, стр. 7). Этой концепции вполне отвечают признаки вихревых движений при раскрытии океанских спрединговых бассейнов. В отличие от континентальных вихревых морфоструктур, которые могут быть изучены только в статике (если не считать примеров фиксации движения континентальных блоков по данным GPS), анализ кинематики спрединга в океанских котловинах позволяет получить представление об изменении их геометрии во времени. На основе совокупного анализа геолого-геофизических материалов по строению дна Мирового океана было показано,

что движение плит литосферы только в первом приближении описывается простым вращением вокруг определенного полюса, на самом деле в их кинематике присутствуют признаки вихревой компоненты (Мирлин, 2006, 2009). Особенно отчетливо признаки вихревых движений проявлены в эволюции ряда спрединговых задуговых бассейнов зоны сочленения Евразии с Тихим океаном (Мирлин и др., 2006, 2010).

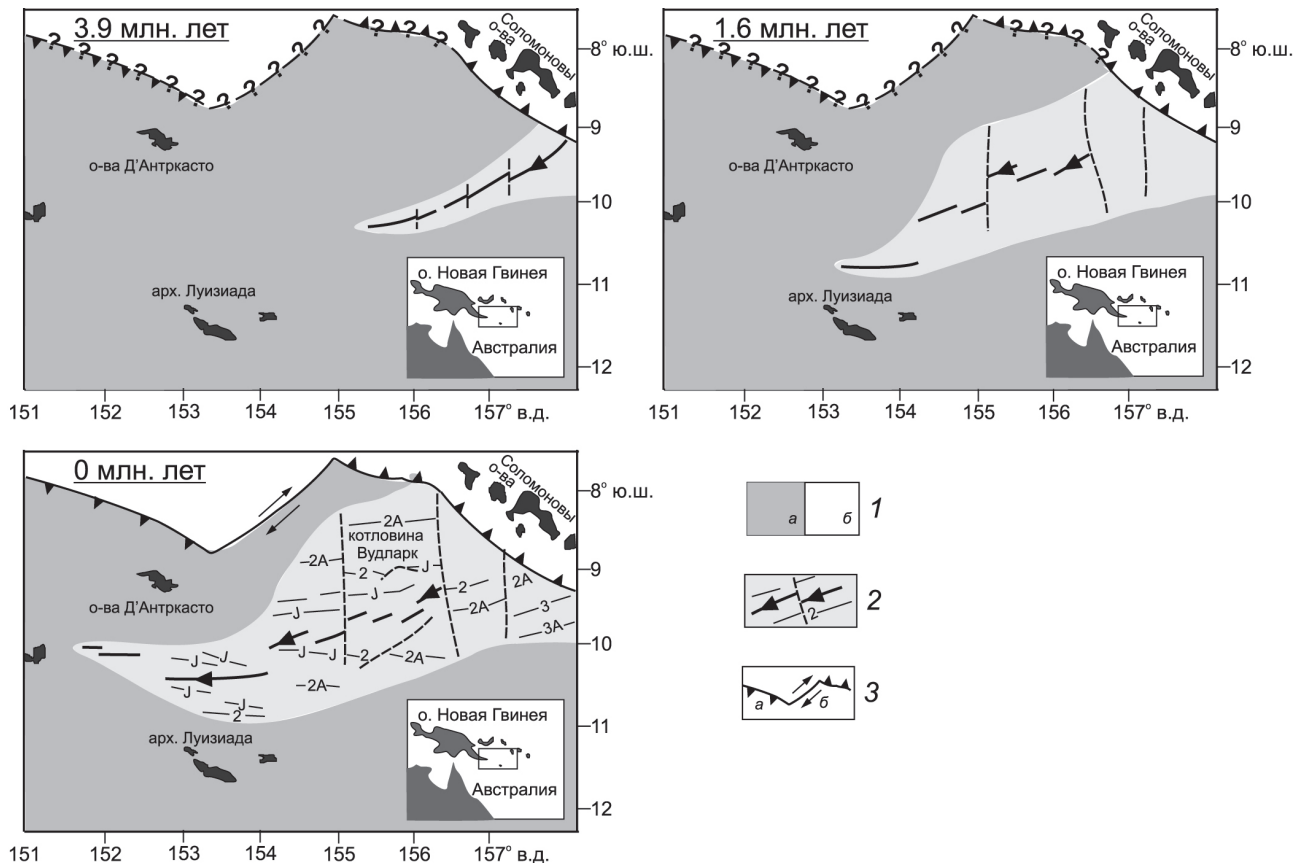
Несмотря на значительный ряд работ, посвященных физическим основам вихревых движений и признакам выявления вихревых структур в геологической среде (Викулин, Иванчин, 2013; Викулин и др., 2011; Викулин, Тверитинова, 2007; Мирлин, 2006), методологическая база вихревой тектоники находится в стадии становления. Отсюда вытекает логика анализа, который отвечает необходимости наращивания методологического аппарата вихревой тектоники и реализуется в настоящей работе: сперва систематизируются признаки вихревой компоненты раскрытия задуговых бассейнов там, где они фиксируются достаточно четко, а затем анализируется, насколько эти признаки проявлены в геодинамике Эгейского моря. В рассмо-

трение было также включено строение впадины Мраморного моря (рис. 1): далее будет показано, что ее строение и эволюция тесно связаны с особенностями морфоструктуры и развития впадин в пределах Эгейского моря. В качестве объекта для сравнительного анализа выбрана спрединговая котловина Вудларк (рис. 2), расположенная в тылу зоны субдукции Соломоновых островов (зона сочленения Евразии с Тихим океаном). В пользу этого выбора послужили следующие аргументы:

– она относится к числу наиболее изученных задуговых бассейнов – в ее пределах, в частности, было выполнено глубоководное бурение (Famin, Nakashima, 2005; Ferris et al., 2006; Luyendyk et al., 1973; Martinez et al., 1999; Taylor, Huchon, 2002; Weissel et al., 1982);

– котловина рассматривается как типичный пример раскола континентального массива и последующего океанского спрединга (Taylor et al., 1995, 1999);

– ранее уже обращалось внимание на присутствие отчетливо выраженных признаков вихревой компоненты в кинематике ее раскрытия (Мирлин, 2009).



**Рис. 2.** Принципиальная схема раскола континентального массива островов Папуа-Новая Гвинея и образование вихревой спрединговой системы котловины Вудларк по (Taylor et al., 1999) с изменениями: 1 – земная кора: а – континентальная, б – океанская; 2 – спрединговая система котловины Вудларк с новообразованной океанской корой: оси магнитных аномалий с номерами (тонкие линии), трансформные разломы (штриховые линии), оси спрединга (утолщенные линии) и направление пропегейтинга (стрелки); 3 – зоны субдукции (а) и соединяющий их разлом (б). Те же линии с вопросительным знаком – предполагаемое положение указанных границ.

## ГЕОДИНАМИКА КОТЛОВИНЫ ВУДЛАРК: РОЛЬ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ

Согласно определению вихревого движения, малые объемы вещества в закручивающемся вихревом потоке перемещаются не только поступательно, но и вращаются вокруг некоторой мгновенной оси, при этом скорость поступательно-вращательного перемещения вещества в закручивающемся вихревом потоке меняется от внутренней его части к внешней. В работах (Мирлин, 2006; Мирлин и др., 2006) были рассмотрены морфоструктурные и геофизические особенности строения океанских бассейнов, а также специфика их эволюции, которые в совокупности могут рассматриваться как признаки присутствия вихревой компоненты в их раскрытии. Рассмотрим, насколько эти признаки присущи строению и эволюции котловины Вудларк. Первый признак – специфика плановой геометрии спрединговых океанских впадин, которая возникает вследствие следующих факторов: во-первых, продвижение («пропагейтинг») оси раздвига, во-вторых, уменьшение его скорости по мере продвижения, и, в-третьих, закручивание оси раздвига. Благодаря этим факторам океанские спрединговые бассейны в плане имеют не прямолинейные, а плавные, закругленные – вихреподобные генерализованные контуры. Детальная магнитная съемка в котловине выявила систему полосовых магнитных аномалий, природа которых связана со спредингом океанского дна. Их интерпретация показывает, что после раскола около 6 млн. лет назад континентального массива острова Новая Гвинея в ее северо-восточной части начался спрединг, и далее ось его продвигалась сначала в юго-западном направлении, а затем постепенно изменяла свое простирание на субширотное. Вследствие «пропагейтинга» и закручивания оси раздвига генерализованные контуры котловины имеют округлые очертания (рис. 2). Вторым признаком – «вложенность» структур разного ранга: в плавные закругленные контуры океанских впадин, образующиеся под воздействием вихревого потока, вложена изломанная, ступенчатая геометрия спрединговых сегментов и пассивных окраин. Последняя, как и сегментация океанского ложа в целом, является результатом обязательного присутствия компоненты сдвига внутри вихря. Нетрудно видеть (рис. 2), что данный признак выражен вполне отчетливо в изучаемой котловине.

Третий признак – возникновение деформаций сжатия – растяжения, циклически сменяющих друг друга во времени и в пространстве в процессе аккреции океанской литосферы. В вихревом потоке малые объемы (блоки,

частицы) вещества кроме поступательного движения вращаются вокруг некоторой оси, положение которой меняется со временем. Специфика взаимодействия блоков в таком потоке обуславливает смену геодинамической обстановки (Мирлин и др., 2008), причем градиент перехода от сжатия к растяжению возрастает по мере закручивания вихревой системы. Это приводит к возникновению структур земной коры, обусловленных сжимающими напряжениями в области наибольшего закручивания вихревых структур. В зоне замыкания спрединговой системы Вудларк, где по механизмам в очагах землетрясений установлены отчетливые признаки современных сжимающих напряжений (Famin, Nakashima, 2005), расположено тектоническое поднятие Морсби, ограниченное взбросами и возвышающееся на дне котловины на 2.5-3 км (рис. 3, 4). Серией глубоководных скважин в пределах этих поднятий, а также прилегающих участков котловины была вскрыта мощная толща позднемиоцен-современных осадочных пород, которая с несогласием перекрывает метаморфизованный офиолитовый комплекс, сложенный породами маастрихт-палеоценового возраста (66-54 млн. лет). На основе анализа состава осадочных пород с использованием данных по сейсмической стратиграфии был сделан вывод, что само поднятие Морсби возникло совсем недавно (менее 1.2 млн. лет назад) (Taylor et al., 1999). До этого момента, начиная примерно с 4 млн. лет назад, на месте современного поднятия Морсби располагалась достаточно глубокая троговая структура (рис. 3). Таким образом, чрезвычайно быстрое формирование поднятия Морсби и пространственно, и по времени связано с появлением сжимающих напряжений и выдавливанием вверх блока фундамента в зоне замыкания продвигающегося и закручивающегося рифта.

Отметим, что область сжатия отличается и спецификой магматизма. В западной, наименее раскрытой части бассейна, на продолжении зоны спрединга выявлена система разломов. Здесь широко распространены вулканы-острова, подводные основания которых сложены базальтами и андезибазальтами, а вершины – щелочными базальтами и риолитами (Davies, Price, 1986). В осевой части рифта, в пределах сегмента, который непосредственно примыкает к поднятию Морсби, выявлены относительно щелочные базальты и андезибазальты, реже андезиты и риолиты, содержащие примесь вещества субконтинентальной литосферы (Drill et al., 1997; Mahike et al., 2011). По соотношению некогерентных элементов эти породы аналогичны наименее щелочным разновидностям «внутриплитных» пород, переходным к базальтам срединно-океанских хребтов (MORB) (Миронов и др., 1999). Далее к

РОЛЬ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ

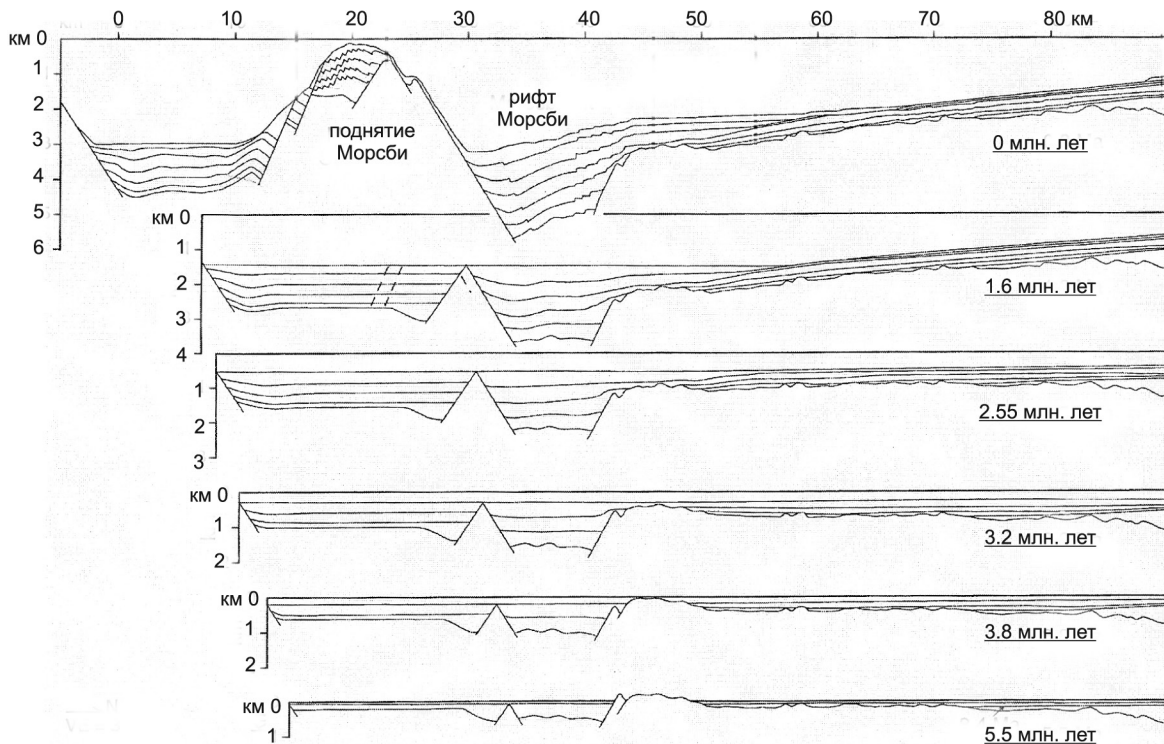


Рис. 3. Схема формирования тектонического поднятия – подводных гор Морсби в зоне замыкания котловины Вудларк (на основе результатов глубоководного бурения) по (Taylor et al., 1999).

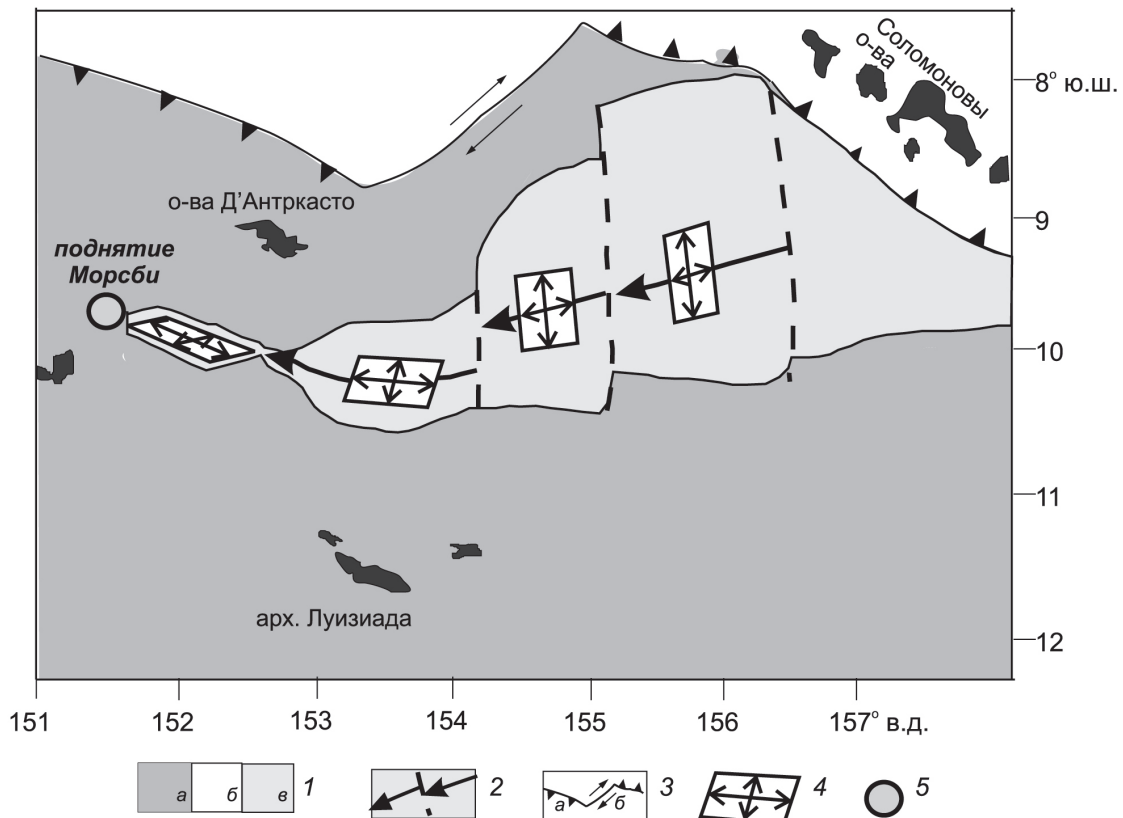


Рис. 4. Геодинамическое истолкование изменения плановой геометрии спрединговых сегментов в котловине Вудларк (по Martinez et al., 1999) на основе представлений о влиянии вихревой компоненты движения при раскрытии котловины: 1 – земная кора: *a* – континентальная, *б* – океанская, *в* – новообразованная океанская кора спрединговой системы Вудларк; 2 – ось спрединга – сплошная линия (стрелки – направление пропегейтинга) и трансформные разломы – штриховая линия; 3 – зоны субдукции (*a*) и соединяющий их разлом (*б*); 4 – диаграммы, показывающие соотношение векторов растяжения и сдвига в пределах различных сегментов спрединговой системы; 5 – поднятие Морсби.

востоку на всем протяжении спрединговой зоны Вудларк развиты исключительно толеитовые базальты типа MORB (Davies, Price, 1986; Mahike et al., 2011). В совокупности эти данные могут свидетельствовать о том, что неконтаминированное вещество верхней мантии достаточно быстро внедряется в расщепляемый континентальный блок, практически сразу после смены рифтового режима на режим спрединга.

Признаком присутствия вихревой компоненты при раскрытии задуговых бассейнов является тектоническая расслоенность коры по вертикали. Она может быть следствием дифференциального вращения разноранговых объемов вещества в вихревом потоке. Это вызывает разделение океанской коры и литосферы в целом на отдельные литопластины, которые смещаются друг относительно друга по субгоризонтальным плоскостям раздела. При глубоководном бурении в котловине Вудларк были выявлены многочисленные биостратиграфические, литологические и региональные несогласия в разрезах коры, которые могут отражать наличие тектонической расслоенности океанской коры по вертикали (Taylor, Huchon, 2002).

Еще одним признаком присутствия вихревой компоненты при раскрытии котловины Вудларк является изменение плановой геометрии спрединговых сегментов, разделенных трансформными разломами. Восстановление кинематики спрединга, осуществленное по магнитным аномалиям, показывает, что продвижение его оси в юго-запад-западном направлении было не постепенным, а скачкообразным (Taylor et al., 1995). Следствием этого было формирование отдельных сегментов спрединговой котловины, разделенных трансформными разломами, ориентированными в субмеридиональном направлении. Из реконструкции спрединговой системы котловины Вудларк отчетливо видно, что их плановая геометрия меняется в направлении от востока к западу: на востоке они имеют почти прямоугольную форму, а в западной части она близка к параллелограмму. Истолкование такого изменения плановой геометрии показано на рис. 4, на котором сегменты спрединговой системы даны в более крупном масштабе по сравнению с рис. 2. По мере продвижения оси спрединга и закручивания вихря уменьшается компонента раздвига и, напротив, возрастает сдвиговая компонента. Одновременно несколько меняется направление векторов растягивающих напряжений в пределах отдельных сегментов в связи с тем, что они разворачиваются к центру вихревого потока. В совокупности это приводит к тому, что в области максимального его закручивания сегменты спрединга представляют собой, по сути, структуры типа пулл-апарт, то есть приоб-

ретают форму, близкую к параллелограмму, что и наблюдается в действительности.

Наконец, направления и скорости смещения отдельных фрагментов поверхности острова Новая Гвинея, определенные по данным спутниковой геодезии GPS (всего было задействовано 38 станций), свидетельствуют о том, что геодинамика региона, охватывающего указанные острова, котловину Вудларк, моря Новогвинейское и Соломоново, архипелаг Бисмарка, определяется взаимодействием шести тектонических разноранговых блоков (Wallace et al., 2004). При этом выясняется, что вектора смещений в пределах плоскогорья южной части о-ва Новая Гвинея указывают на преобладание пластических деформаций в коре. В свою очередь, это также может являться свидетельством, хотя и косвенным, возможности развития движений вихревого типа в области сочленения континентального массива Новой Гвинеи и зоны спрединга котловины Вудларк.

В итоге анализа строения и эволюции котловины Вудларк, можно заключить, что совокупность геолого-геофизических признаков может указывать на присутствие в ней вихревой компоненты движения. Обратимся далее к тому, насколько эти признаки проявлены в строении и эволюции Эгейского моря.

#### ГЕОДИНАМИКА ЭГЕЙСКОГО МОРЯ: РОЛЬ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ

Начало ранней стадии формирования Эгейского моря, когда растяжение было сосредоточено в его юго-западной области (Критском море), датируется по-разному: от позднего эоцена до нижнего – среднего миоцена – раннего плиоцена (Facenna et al., 2006, Gautier et al., 1999; Jolivet et al., 2013). Анализ геотермических данных показывает, что растяжение началось около 30 млн. лет назад (Вержбицкий, Казьмин, 1998). Граница между Критским морем и северо-западной областью проходит вдоль почти прямой линии, которая ориентирована с северо-запада на юго-восток, протягиваясь вдоль северо-восточного побережья о. Эвбея и архипелага Киклады (рис. 1).

Двухэтапное формирование Эгейского моря и, соответственно, разделение его на две области подтверждается и данными по возрасту и составу магматических пород, развитых в пределах как самого моря, так и прилегающих континентальных блоков (Agostini et al., 2010). Отмечается устойчивый тренд омоложения с северо-востока на юго-запад возраста вулканических комплексов орогенного (надсубдукционного) типа, которые сложены известково-щелочными андезитобазальтами, андезитами, дацитами, риолитами и их туфами, реже высококальциевыми

породами (до шошонитов и лампроитов) (рис. 5). Самые древние (поздний эоцен – ранний миоцен) известково-щелочные вулканыты встречаются на северном континентальном обрамлении Эгейского моря (Евразийская плита) и в северо-западной части Анатолийской плиты. Затем, начиная с миоцена, пояса орогенного вулканизма отчетливо смещаются к югу, и в настоящее время надсубдукционный вулканизм проявляется только в Южно-Эгейской вулканической дуге. При этом в Кикладах в среднем миоцене надсубдукционный вулканизм практически прекратился, но произошла вспышка анатектического гранитообразования, которая свидетельствует о повышении теплового потока, связанного, возможно, с подъемом мантийного вещества. Позднее пояса надсубдукционного вулканизма продолжали смещаться к югу, а к северу от Киклад (в пределах Фракии, Анатолии и северо-восточной области Эгейского моря) проявился принципиально иной – щелочной базальтовый вулканизм. Правда, находки продуктов этого

типа магматизма разрознены, незначительны по объему и преимущественно имеют возраст 7-12 млн. лет (конец среднего – начало позднего миоцена) (Agostini et al., 2010). Среди них выделяются натриевые и калиевые щелочные базальты. По изотопно-геохимическим характеристикам натриевые базальты сходны с базальтами внутриплитных океанских островов, генезис которых обычно связывается с частичным плавлением вещества мантии в геодинамических условиях растяжения. Калиевые базальты представляют собой промежуточные разновидности со следами контаминации пород более древних надсубдукционных комплексов. Они распространены в относительно южных районах, расположенных ближе к Кикладам, что свидетельствует о неполном разрыве континентальной коры в этих районах. Натриевые базальты средне-поздне-миоценового возраста, не несущие признаков коровой контаминации, напротив, встречаются только на севере рассматриваемой области. Наряду с этим, не только на севере, но и в цен-

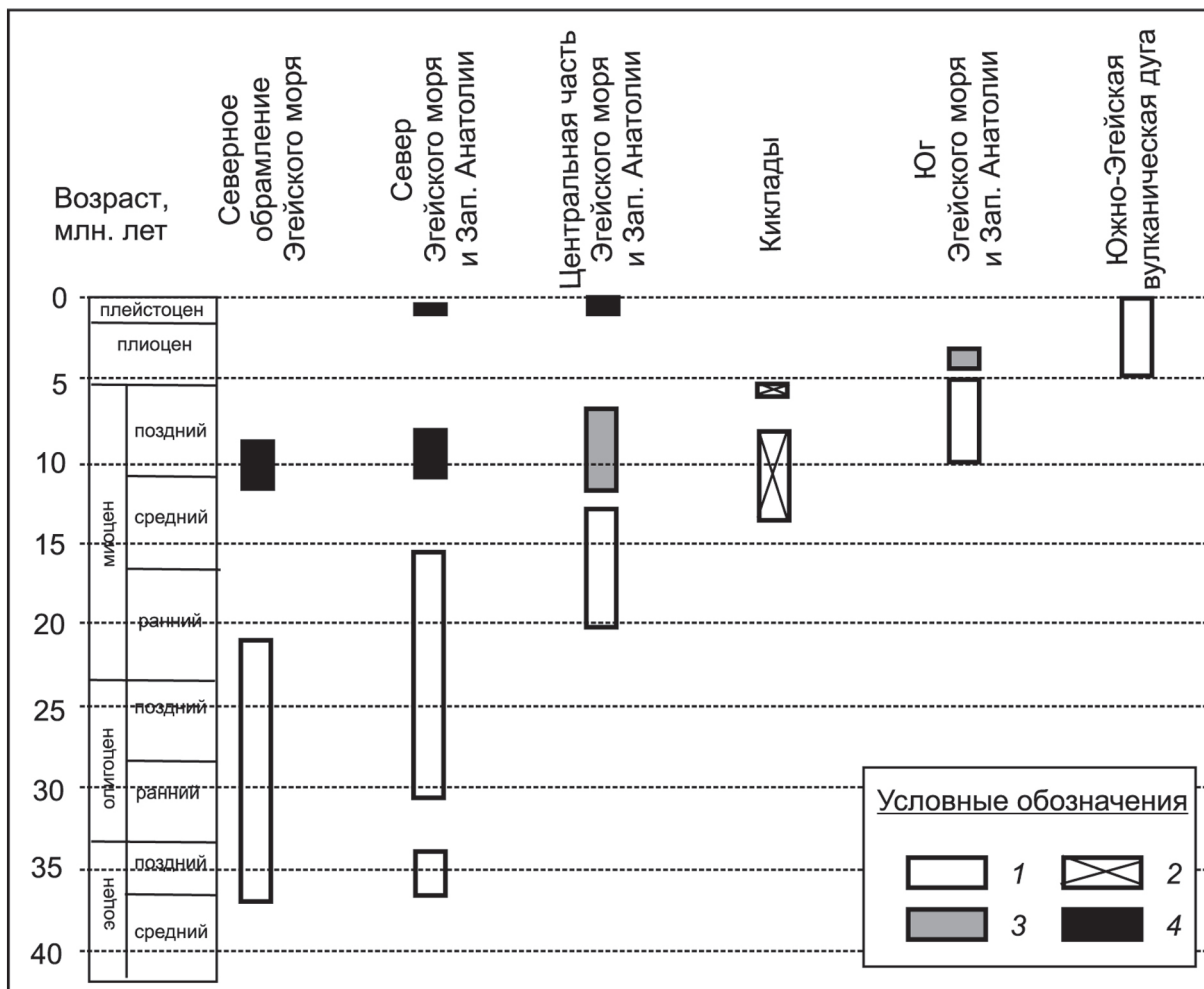


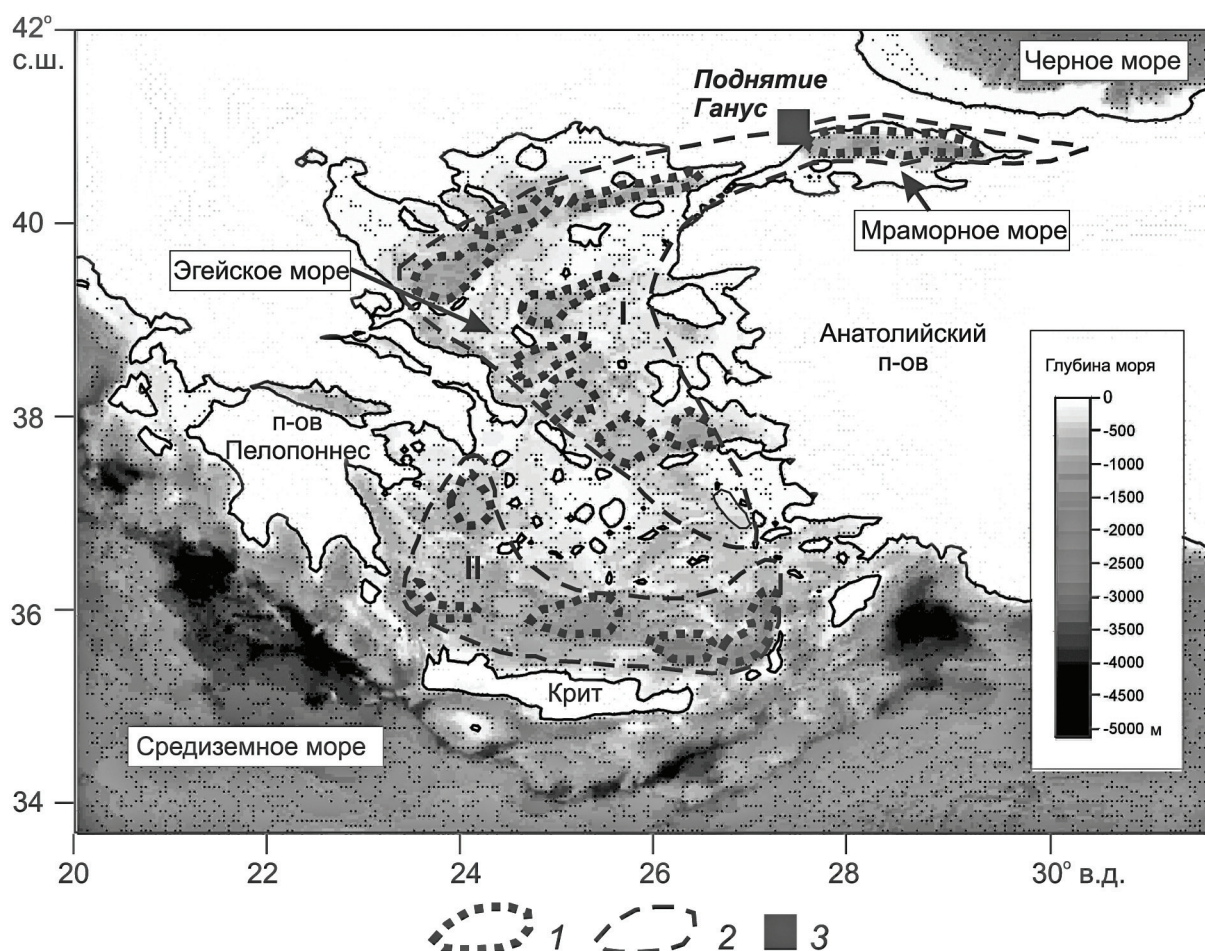
Рис. 5. Схема эволюции магматизма в Эгейском регионе по (Agostini et al., 2010): 1 – известково-щелочные, реже высококальциевые дифференцированные вулканические комплексы орогенного (надсубдукционного) типа; 2 – анатектические граниты и риолиты; 3-4 – щелочные базальты «внутриплитного» типа (3 – калиевые, 4 – натриевые).

тре северо-восточной области Эгейского моря отмечаются находки плейстоцен-голоценовых натриевых щелочных базальтов. Это косвенно может указывать на продолжающийся процесс растяжения, который если и приводит к полному разрыву континентальной коры, то лишь в отдельных участках данной области. Кроме того, отмечалось, что для проникновения как калиевых, так и натриевых щелочных магм к поверхности, необходимо наличие соответствующих разрывов и в субдукцируемой пластине. Действительно, по сейсмологическим данным на литосферных глубинах (80-200 км) сплошность слэба нарушается на восток от Кипра, то есть в слэбе Африканской плиты в настоящее время фиксируются «дырки» (Agostini et al., 2010).

В целом данные по составу изверженных пород в пределах северо-восточной области Эгейского моря свидетельствуют о смене фазы островодужного вулканизма на фазу растяжения в тылу дуги, что свойственно и другим бассейнам сходного геодинамического типа. Они также указывают на постепенное отступление зоны субдукции на юг, начиная с момента раскрытия рассматриваемого бассейна. Сходный вывод

об откате зоны субдукции и рассредоточенном растяжении континентальной коры в задуговом бассейне Эгейского моря получен при комплексном анализе геофизических данных по рассматриваемому региону (Jolivet et al., 2013).

Результатом растяжения коры в Эгейском море было формирование ряда впадин в рельефе дна в обеих его областях (рис. 6). Эти впадины выявлены при частотном анализе рельефа, а также аномалий поля силы тяжести в Восточном Средиземноморье, включая Эгейское и Мраморное моря (Углов, Мирлин, 2013). Глубины впадин (относительно среднего уровня поверхности морского дна) составляют иногда более 200-300 метров. Сам факт многочисленности впадин (четыре в Критской котловине, семь – в северо-восточной области) подтверждает тот факт, что растяжение в Эгейском море носило рассредоточенный характер, что, вообще, свойственно начальной стадии раскола континентальной коры. Согласно интерпретации аномалий поля силы тяжести (Углов и др., 2005), а также сейсмическим данным, всем впадинам, включая Мраморное море, соответствуют выступы поверхности Мохоровичича,



**Рис. 6.** Впадины (троги) в подводном рельефе Эгейского и Мраморного морей, образовавшиеся в результате растяжения коры: 1 – границы впадин, 2 – генерализованные контуры северо-восточной области Эгейского моря и Мраморного моря (I) и юго-западной области Эгейского моря (II), 3 – поднятие Ганус.



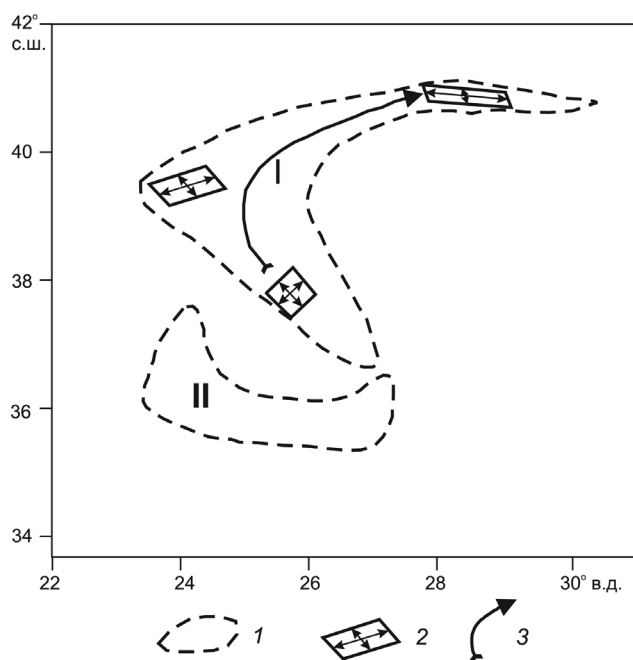
что указывает на существенное сокращение мощности земной коры в их пределах, а местами и на ее разрыв (Vecel et al., 2009; Tirel et al., 2004).

Для рассматриваемого вопроса о присутствии признаков вихревого движения при раскрытии Эгейского моря существенно, что плановая геометрия впадин в подводном рельефе меняется в различных его частях. В южной части Эгейского моря впадины имеют почти изометричную, а в северной части – удлинненную форму, близкую к параллелограмму, в силу чего часто именуется трогами. К этой же системе трогов принадлежит и глубоководная впадина – трог Мраморного моря (рис. 6). Важно также отметить, что как юго-западная, так и северо-восточная области Эгейского моря, включая Мраморное море, имеют плавные, закругленные генерализованные контуры. Таким образом, впадины, имеющие угловатую форму, «вложены» в вихреподобные в плане фигуры, сходные по конфигурации с той, которой очерчивается котловина Вудларк (рис. 2).

Геодинамическое истолкование изменения плановой геометрии впадин в пределах северо-восточной области Эгейского и Мраморного морей показано на рис. 7. Как и в котловине Вудларк, различие плановой геометрии впадин в различных частях данного региона, вероятно, указывает на изменение соотношения раздви-

говой и сдвиговой компонент. Такое изменение, скорее всего, обусловлено тем, что составляющая растяжения континентальной литосферы, обусловленная вихревой компонентой, включала в себя продвижение (пропагеттинг) оси растяжения в северо-восточном направлении, уменьшение его скорости и закручивание оси по часовой стрелке. В результате компонента сдвига по величине почти равна компоненте растяжения в юго-восточной части вихреподобной структуры и резко возрастает в ее северо-восточной части при уменьшении степени растяжения. Такая смена геодинамической обстановки приводит к тому, что впадина Мраморного моря, располагающаяся в зоне почти максимального закручивания вихревой структуры, представляет собой классический пример впадины пулл-апарт. Принадлежность его к данному типу структур подтверждается и реальными геоморфологическими и геофизическими данными (Armijo et al., 2002). Кроме того, как и в котловине Вудларк, вектор растяжения менял ориентировку по мере закручивания вихря. Что касается юго-западной области Эгейского моря (Критской котловины), то и ее вихреподобная геометрия, и различие плановой геометрии трогов в разных ее частях, также свидетельствуют о присутствии вихревой компоненты растяжения. Однако исходных данных недостаточно, чтобы восстановить ее кинематику.

Продолжая аналогию рассматриваемого моря с котловиной Вудларк, отметим, что в зоне замыкания – наибольшего закручивания вихреподобной структуры северо-восточной области Эгейского моря присутствуют явные признаки сжимающих напряжений. Эта зона располагается несколько восточнее района сочленения Северо-Анатолийского разлома с восточным заливом Мраморного моря, и именно здесь в очагах землетрясений установлены сжимающие напряжения (Nyst, Thatcher, 2004). Возможно, именно с напряжениями сжатия в зоне замыкания вихря обусловлено и относительно недавнее и быстрое поднятие фундамента на северо-западном борту впадины Мраморного моря, которое привело к формированию поднятия Ганус (рис. 6). Интерпретация геолого-геофизических данных показывает (Okay et al., 2004), что его природа, как и природа поднятия Морсби в котловине Вудларк, связана именно со сжимающими напряжениями в земной коре. Далее к востоку от поднятия Ганус в пределах самого моря доминирует напряжение растяжения со сдвиговой компонентой (Faccenna et al., 2006). Существенно, что поле скоростей перемещения блоков коры в пределах Анатолийской плиты, установленное по данным спутниковой геодезии GPS, указывает на вращение их против часовой стрелки



**Рис. 7.** Геодинамическое истолкование изменения плановой геометрии впадин в пределах северо-восточной области Эгейского моря и Мраморного моря. 1 – генерализованные контуры северо-восточной области Эгейского моря и Мраморного моря (I) и юго-западной области Эгейского моря (II), 2 – диаграммы, показывающие соотношение векторов растяжения и сдвига в пределах впадин, 3 – предполагаемое продвижение оси растяжения.

(Nocquet, 2012; Orhan Tatar et al., 2012). Это вполне совпадает с тем, что вытекает из присутствия вихревой компоненты в геодинамике раскрытия северо-восточной области Эгейского моря. Существенно, что палеомагнитные данные указывают на вращение по часовой стрелке полуострова Пелопоннес (рис. 1) (Kissel et al., 2003). Таким образом, имеются непосредственные свидетельства о вращательно-вихревых движениях при раскрытии Эгейского моря в современную эпоху, которые также оказывают влияние на формирование Мраморного моря.

Что касается еще одного признака вихреподобных движений – тектонической расслоенности коры, то он также присутствует, но проявлен не столько четко, как в котловине Вудларк. Согласно сейсмическим исследованиям в вертикальном разрезе литосферы Эгейского моря и прилегающих частях суши выявлено присутствие слоев с существенно различными скоростями (Bourova et al. 2005; Makris et al., 2001), но остается неясным, насколько их природа связана с дифференциальным вращением разноранговых объемов вещества в вихревом потоке. Впрочем, четкого проявления данного признака трудно ожидать с учетом того, что как в Эгейском, так и в Мраморном морях полного разрыва континентальной и формирование океанской коры не произошло. Следовательно, влияние вихревых движений на внутреннюю структуру коры не могло быть столь существенным, как в котловине Вудларк, где произошел полный раскол континентальной коры и литосферы и начался процесс океанского спрединга. Тем не менее, в обоих случаях на этапе, предшествующем расщеплению, континентальные блоки претерпели существенное изменение в ходе островодужного магматизма, а затем по мере прогрессирующего растяжения континентальной коры проявился принципиально иной тип магматизма, сходный с магматизмом внутриконтинентальных рифтов (Миронов и др., 1999; Миронов, Зорина, 1994; Agostini et al., 2010; Hegner, Smith, 1992).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Проведенный сравнительный анализ геодинамики котловины Вудларк и Эгейского моря позволяет сделать два взаимосвязанных вывода.

1) В геодинамике формирования Эгейского моря, как и котловины Вудларк, присутствуют признаки вихревого движения. Это означает, что вихревая компонента движения плит в задуговых бассейнах присутствует как на стадии спрединга (котловина Вудларк), так и на ранней стадии растяжения континентальной литосферы (Эгейское море). Данный вывод полностью соответствует выдвинутому ранее отечественными исследова-

телями представлениям об иерархически неоднородной, нелинейной среде литосферы (Николаев, 2003; Садовский, 1986; Keilis-Borok, 1990);

2) Хотя Эгейское и Мраморное моря рассматриваются как самостоятельные географические объекты, впадины в пределах Эгейского моря и впадина Мраморного моря образуют единую геодинамическую систему, сформированную в результате сочетания раздвиговых и сдвиговых напряжений под воздействием вихревой компоненты движения.

Выполненный анализ также позволяет сделать одно заключение более общего плана. Весьма знаменательно, что в статье И.Цемена, которая открывает один из специальных выпусков журнала «Tectonophysics», посвященный проблемам эволюции континентальной литосферы, особенно подчеркивается, что одним из наиболее интригующих аспектов континентального растяжения при раздвиге плит является то, что оно следует за сжатием – факт, который необъясним с точки зрения плитотектонической парадигмы (Cemen, 2010). Наблюдаемая смена напряжений и в рассматриваемых бассейнах, и на глобальном уровне – в пределах пассивных окраин континентов полностью отвечает модели формирования океанских впадин под влиянием вихревой компоненты движения (Мирлин и др., 2008), и на этот факт мы обращаем особое внимание. Необъяснимый с чисто плитотектонических позиций, он вполне понятен с точки зрения присутствия вихревой компоненты в движениях плит литосферы: в силу специфики вихревого движения смена напряжений – от сжатия (со сдвигом) к растяжению (со сдвигом) – происходит в каждой точке зоны раздвига.

Наконец, полученные результаты возвращают к проблеме механизма образования задуговых бассейнов окраинных морей. Общепринятой модели такого механизма не существует, хотя наиболее широко известными являются две точки зрения на их природу. Первая: растяжение литосферы в их пределах обусловлено вторичной конвекцией в тылу островной дуги, возникающей вследствие трения висячего крыла сейсмофокальной зоны. Восходящая ветвь конвективной ячейки приводит к утонению и разрыву литосферы и образованию впадины окраинного моря. Вторая точка зрения базируется на том факте, что зоны субдукции имеют тенденцию смещаться в сторону океана (в англоязычной литературе отступление зоны субдукции получило название «ролл-бэк» – откат назад). Отступление фронта дуги вызывает растяжение литосферы в ее тылу, декомпрессию мантийного вещества и подъем астеносферного диапира, что и влечет за собой утонение континентальной коры, а затем начало спрединга.

Как отмечено ранее, данные по составу изверженных пород и изменению их возраста, действительно, указывают на отступление зоны субдукции при формировании северо-восточной области Эгейского моря. Однако ее общий структурный план, определяемый расположением впадин в рельефе дна, обусловленных растяжением коры, оказывается гораздо более сложным, нежели вытекает из указанной модели. И, наконец, ни одна из этих точек зрения не объясняет присутствие вихревого движения в геодинамике задуговых бассейнов. Таким образом, возникают две весьма актуальные, связанные между собой задачи: первая – усовершенствование модели формирования задуговых бассейнов с учетом вихревой компоненты движения при их раскрытии. Возможно, она обусловлена вихревой составляющей мантийной конвекции, как об этом говорилось ранее (Мирлин и др., 2010). При этом важно подчеркнуть, что ось вихревой компоненты движения в задуговых бассейнах вертикальна в отличие от всех ранее разработанных плитотектонических моделей мантийной конвекции, в которых конвективные ячейки имеют исключительно горизонтальные оси вращения. Вторая задача: оценка напряжений, возникающих в результате влияния вихревой компоненты конвекции на литосферу, особенно на ее верхнюю границу. Сочетание плавных вихреподобных контуров спрединговых бассейнов и «вложенности» в них изломанной геометрии их пассивных окраин, спрединговых сегментов, а также впадин-трогов типа пулл-апарт (на раннем этапе раскрытия) может послужить отправной точкой для решения второй задачи. Наибольшие перспективы в этом отношении имеет тесное взаимодействие в одном творческом коллективе специалистов в области тектоники и физических свойств геосреды.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №23 «Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология».

#### Список литературы

*Арсеньев В.А., Корчуганова Н.И.* Вихревые структуры континентов: новые аспекты строения, условий образования, металлогенического значения (на примере юго-восточной части Канадского щита) // Известия вузов. Геология и разведка. 2000. № 4. С. 134-138.

*Вержбицкий Е.В., Казьмин В.Г.* Геотермический режим и генезис литосферы бассейнов восточного Средиземноморья // Геотектоника. 1998. № 3. С. 51-58.

*Викулин А.В.* Мир вихрей. Петропавловск-Камчатский: Камчат-ГТУ, 2008. 230 с.

*Викулин А.В.* Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 2. С. 119-141.

*Викулин А.В., Иванчин А.Г.* О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 3. С. 67-84.

*Викулин А.В., Иванчин А.Г., Тверитинова Т.Ю.* Моментная вихревая геодинамика // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 1. С. 29-35.

*Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю.* Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // ДАН. 2007. Т. 413. № 3. С. 372-374.

*Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю.* Моментная волновая природа геологической среды // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 4 геология. 2008. № 6. С. 19.

Вихри в геологических процессах / Под ред. А.В. Викулина. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского общественного фонда «Наука-для Камчатки» Камчатского ГПУ, 2004. 297 с.

*Ли Сы-гуан.* Вихревые структуры и их связь с крупными геотектоническими комплексами северо-западного Китая // Геологический вестник. 1954. Т. 34. Вып. 4. С. 380-382.

*Мирлин Е.Г.* Проблема вихревых движений в «твердых» оболочках Земли и их роли в геотектонике // Геотектоника. 2006. № 4. С. 43-60.

*Мирлин Е.Г.* Вихревая тектоника // ДАН. 2009. Т. 426. № 5. С. 649-652.

*Мирлин Е.Г., Кононов М.В., Голицын Г.С.* Статистика вихревых структур океанской литосферы // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. С. 67-80.

*Мирлин Е.Г., Кононов М.В., Миронов Ю.В.* Вихревые движения при океаногенезе. Проблема динамики зон сочленения океан-континент Евразии // Фундаментальные исследования океанов и морей. Кн. 2 / Под ред. Н.П. Лаверова. М: Наука, 2006. С. 86-111.

*Мирлин Е.Г., Кононов М.В., Миронов Ю.В., Углов Б.Д.* Литосфера как нелинейная система: проблемы динамики зон сочленения океан-континент // Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей / Под ред. С.М. Шаповалова. М.: Научный мир, 2010. С. 255-279.

*Мирлин Е.Г., Кононов М.В., Миронов Ю.В.* Возможная природа траппового магматизма (на основе концепций вихревых движений в тектоносфере и нелинейной геофизической среды) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 37-50.

- Миронов Ю.В., Ельянова Е.А., Зорина Ю.Г., Мирлин Е.Г.* Вулканизм и океанское колчеданообразование. М.: Научный Мир, 1999. 176 с.
- Миронов Ю.В., Зорина Ю.Г.* Эволюция вулканизма рифтогенных структур окраинных морей Западно-Тихоокеанской переходной зоны // Геотектоника. 1994. № 4. С. 14-26.
- Николаев А.В.* Черты геофизики XXI века // Проблемы геофизики XXI века / Под ред. А.В.Николаева. М.: Наука, 2003. 310 с.
- Садовский М.А.* Автомодельность геодинамических процессов // Вестник АН СССР. 1986. № 8. С. 3-11.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Случайность и неустойчивость в геофизических процессах // Физика Земли. 1989. № 2. С. 3-12.
- Слензак О.И.* Вихревые системы и структуры докембрия. Киев.: Наукова Думка, 1972. 181 с.
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В.* Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2005. № 5. С. 59-77.
- Углов Б.Д., Барышев А.Н., Зорина Ю.Г. Ельянова Е.А.* Геоструктуры и минерагения Средиземноморья. М.: ЦНИГРИ, 2005. 159 с.
- Углов Б.Д., Мирлин Е.Г.* Геодинамика Восточного Средиземноморья в свете новых данных о латеральной неоднородности литосферы // Отечественная геология. 2013. Вып. 6. С. 71-79.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во «КДУ», 2005. 560 с.
- Agostini S., Doglioni C., Innocenti F. et al.* On the geodynamics of the Aegean rift // Tectonophysics. 2010. V. 488. № 1-4. P. 7-21.
- 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. V. 14. № 2. P. 80-86.
- Atlas Tethys. Palaeoenvironmental maps / Eds. Dercourt J., Ricou L.-E., Vrieliink B. // Paris: Gauthier-Villars, 1993. 307 h. 14 maps. 1 pl.
- Becel A., Laigle M., Voogd B. et al.* Moho, crustal architecture and deep deformation under the North Marmara Trough, from the SEISMARMARA Leg 1 offshore – onshore reflection-refraction survey // Tectonophysics. 2009. V. 467. № 1-4. P. 1-21.
- Bourova E., Kassaras I., Pedersen .H. et al.* Constrains on absolute S velocities beneath the Aegan Sea from surface wave analysis // Geophysical Journal International. 2005. V. 160. № 3. P. 1006-1019.
- Cemen I.* Extensional tectonics in the Basin and Range, the Aegean, and Western Anatolia: Introduction // Tectonophysics. 2010. V. 488. № 1-4. P. 1-6.
- Davies H.L., Price R.C.* Basalts from the Solomon and Bismarck Seas // Geo-Marine Lett. 1986. V. 6. № 4. P. 193-202.
- Drill S.I., Kuzmin M.I., Tsipukova S.S., Zonenshain L.P.* Geochemistry of basalts from the West Woodlark, Lau and Manus basins: implication for their petrogenesis and source rock composition // Marine Geology. 1997. V. 142. № 1-4. P. 57-83.
- Facenna C., Bellier O., Martinod J. et al.* Slab detachment beneath eastern Anatolia: A possible cause for the formation of the North Anatolian fault // Earth Planet. Sci. Letters. 2006. V. 242. № 1-2. P. 85-97.
- Famin V., Nakashma S.* Hydrothermal fluid venting along a seismogenic detachment fault in the Moresby rift (Woodlark basin, Papua New Guinea) // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2005 (An Electronic journal of the Earth Sciences). V. 6. № 12. Q12003, doi:10.1029/2005GC001112. PDF.
- Ferris A., Abers C.A., Zeit B. et al.* Crustal structure across the transition from rifting to spreading: the Woodlark rift system of Papua New Guinea // Geophysical Journal International. 2006. V. 166. № 2. P. 622-634.
- Gautier P., Brun J.-P., Moriceau R. et al.* Timing, kinematics and cause of Aegean extension: a scenario based on a comparison with simple analogue experiments // Tectonophysics. 1999. V. 315. № 1-4. P. 31-72.
- Hegner E., Smith I.E.* Isotopic compositions of Late Cenozoic volcanics from southeast Papua New Guinea: evidence for multi-component sources in arc and rift environments // Chemical Geology. 1992. V. 97. № 3-4. P. 233-249.
- Jolivet L., Claudio Facenna C., Lacombe O. et al.* Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat // Tectonophysics. 2013. V. 597-598. P. 1-33.
- Kahle H.-G., Mueller S.* Structure and dynamics of the Eurasian-African/Arabian plate boundary system: objectives, tasks and resources of the Wegener group // J. Geodynamics. 1998. V. 25. № 3-4. P. 303-325.
- Keilis-Borok V.I.* Introduction: Non-linear systems in the problem of earthquake prediction // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. V. 61. № 1-2. P. 1-7.
- Kissel C., Laj C., Poisson A., Görör N.* Paleomagnetic reconstruction of the Cenozoic evolution of the Eastern Mediterranean // Tectonophysics. 2003. V. 362. № 1-4. P. 199-217
- Lee J.S.* Some characteristic structural types in The Eastern Asia and their bearing upon the problems of continental movements // Geol. Mag. 1928. LXVI. P. 422-430.
- Le Pichon X., Chamot-Rooke N., Lallemand S. et al.* Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe: Implications for eastern Mediterranean tectonics // JGR. 1995. V. 100. № B7. P. 12675-12690.

- Luyendyk B.P., MacDonald K.C., Bryan W.B.* Rifting History of the Woodlark Basin in the Southwest Pacific // *The Geology Society of America Bulletin*. 1973. V. 84. P. 1125-1134.
- Mahlke J., Devey C., Hoernle K., Garbe-Schonberg D.* Geochemistry of volcanic rocks from the Woodlark Basin // *Geophysical Research Abstracts*. 2011. V. 13, EGU General Assembly 2011. EGU2011-12864.
- Makris J., Papoulia J., Papanikolaou D., Srtavrakakis G.* Thinned continental crust below northern, Eoikos Gulf central Greece, detected from deep seismic soundings // *Tectonophysics*. 2001. V. 341. № 1-4. P. 225-236.
- Martinez F., Taylor B., Goodliffe A.* Contrasting styles of seafloor spreading in the Woodlark basin: indications of rift-induced secondary mantle convection // *JGR*. 1999. V. 104. № B6. P. 12909-12926.
- McKenzie D.P.* Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1978. V. 55. P. 217-254.
- McKenzie D.P.* Active tectonics of the Mediterranean region // *Geoph. J. Roy. Astr. Soc.* 1972. V. 30. № 2. P. 109-185.
- Nocquet J.-M.* Present-day kinematics of the Mediterranean A comprehensive overview of GPS results // *Tectonophysics*. 2012. V. 579. P. 220-242.
- Nyst M., Thatcher W.* New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean // *Journal of Geophysical Research*. 2004. V. 109. № B11. P. 115-147.
- Okay A.I., Tuysuz O., Kaya S.* From transpression to transtension: changes in morphology and structure around a bend on the North Anatolian Fault in the Marmara region // *Tectonophysics*. 2004. V. 391. № 1-4. P. 259-282.
- Orhan Tatar, Fatih Poyraz, Halil Gürsoy et al.* Crustal deformation and kinematics of the Eastern Part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) from GPS measurements // *Tectonophysics*. 2012. V. 518-521. P. 55-62.
- Savostin L.A., Sibuet J.C., Zonenshain L.P. et al.* Kinematic evolution of the Tethys belt from the Atlantic ocean to the Pamirs since the Triassic // *Tectonophysics*. 1986. V. 123. № 1-4. P. 1-35.
- Taylor B., Goodliffe A., Martinez F., Hey R.* Continental rifting and initial sea-floor spreading in the Woodlark basin // *Nature*. 1995. V. 374. № 6522. P. 534-537.
- Taylor B., Goodliffe A., Martinez F.* How continents break up: insights from Papua New Guinea // *JGR*. 1999. V. 104. № B4. P. 7497-7512.
- Taylor B., Huchon F.* Active continental extension in the Western Woodlark basin: a synthesis of Leg 180 results // *Proc. ODP Sci. Results*. 2002 / Huchon F., Taylor B., Klaus A. (Eds.). V. 180. P. 1-36.
- Tirel C., Gueydan F., Tiberi C., Brun J.-P.* Aegean crustal thickness inferred from gravity inversion. Geodynamical implications // *Earth and Planet. Sci. Letters*. 2004. V. 228. № 1-4. P. 267-280.
- Wallace L.M., Stevens C., Silver E. et al.* GPS and seismological constraints on active tectonics and arc-continent collision in Papua New Guinea: Implications for mechanics of microplate rotations in a plate boundary zone // *Journal of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109. B05404
- Weissel J.K., Taylor B., Karner G.D.* The opening of the Woodlark basin, subduction of the Woodlark spreading system, and the evolution of Northern Melanesia since mid-pliocene time // *Tectonophysics*. 1982. V. 87. № 1-4. P. 253-277.

## EFFECT OF VORTEX MOTION ON THE GEODYNAMICS OF THE AEGEAN SEA (BASED ON COMPARATIVE ANALYSIS WITH GEODYNAMICS OF THE WOODLARK BASIN)

E.G. Mirlin, Yu.V. Mironov

*Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow 125009, e-mail: egmmir@gmail.com*

The geodynamics of the Aegean Sea as a back-arc basin is considered on the basis of a comparative analysis with the geodynamics of the back-arc spreading Woodlark basin (active margin of Eurasia). The paper shows that properties of vortex motion components are revealed in the kinematics and in the modern structure of the basin, as well as in the structure and evolution of the north-east and south-west (Cretan Sea) areas of the Aegean Sea. These include: rounded, vortex-like contours of both regions; change in planned geometry of basins within the north-eastern region (including the Marmara Sea basin) caused by the effects from stretch and shear components; compressive stresses in the closure of the vortex structure; tectonic layering of the crust; magmatism peculiarities. Thus, basins within the Aegean and Marmara seas form a single geodynamic system formed under the influence of the vortex component of the evolution.

*Keywords: vortex motion, geodynamics, magmatism, spreading, back-arc basin.*