

УДК 550.380:267.3

Памяти Аркадия Михайловича Карасика посвящается

ХРЕБЕТ КАРЛСБЕРГ НА ДРЕВНЕМ И СОВРЕМЕННОМ ЭТАПАХ РАСКРЫТИЯ

© 2008 С.А. Меркурьев, Н.А. Сочеванова

СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, 191023, Мучной пер., 2; e-mail: sam@ns1480.spb.edu

Представлены результаты систематических магнитометрических и батиметрических исследований, выполненных российскими судами в 90-х годах в северо-западной части Индийского океана. В результате геоисторического анализа аномального магнитного поля выявлены две дискордантные системы линейных магнитных аномалий. Одна соответствует быстрому раскрытию относительно широтной оси протохребта Карлсберг, а другая соответствует медленному раскрытию относительно современной оси хребта Карлсберг, имеющей СЗ простирание. Показано, что обе системы аномалий асимметричны одна относительно другой и относительно осевой аномалии. Сделан вывод, что во время обоих периодов структура и спрединг на хребте Карлсберг были нестационарны.

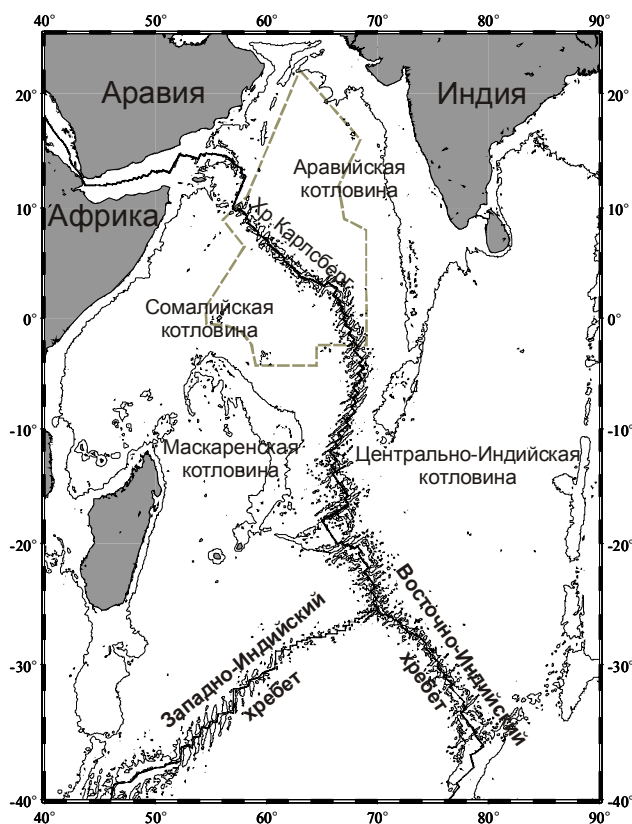


Рис. 1. Обобщенная карта Северо-Западной части Индийского океана. Пунктирная линия охватывает район систематических магнитометрических исследований. Тонкая серая линия - изобата 3000 м по данным ETOPO5 (5 Min Gridded Earth Topography Data).

В основе изучения относительного движения литосферных плит лежат результаты геоисторического анализа аномального магнитного поля (АМП) океана, представляемые в форме осей палеомагнитных аномалий и смещающих их поперечных нарушений. Развитие теории и методов геоисторического анализа АМП в отечественной геофизике связано, в первую очередь, с именем А.М. Карасика (1978, 1979, 1981). Последний период его жизни был посвящен началу российских систематических магнитометрических исследований Индийского океана, которые до сих пор продолжают в СПбФ ИЗМИРАН основанной им Группой морской геофизики. Данная работа имеет целью познакомить с некоторыми результатами этих исследований, которые ранее в основном докладывались на научных конференциях.

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хребет Карлсберг был открыт в 30-х годах XX в. датской океанографической экспедицией «Дана» (Carlsberg Foundation..., 1930) и долгое время оставался одним из самых малоизученных срединно-океанических хребтов (СОХ) Мирового океана (рис. 1). По данным рекогносцировочных маршрутов его классифицировали как хребет с малой скоростью разрастания, имеющий расчлененный рельеф, глубокую рифтовую долину и сеть поперечных разломов. Постепенное нако-

пление информации о структуре АМП и других геофизических полей на акватории Индийского океана происходило в рамках национальных и международных программ. Анализ и интерпретация полученных данных позволили восстановить главные этапы образования Индийского океана.

Индийский океан сформировался в результате раскола Гондваны и последующего дрейфа ее обломков, наиболее крупными из которых являются Африка, Индия, Австралия и Антарктида, составляющие его современное обрамление (Johnson et al., 1980; Norton, Sclater, 1979; Veevers et al., 1975). Неодновременность этого раскола, растянувшегося на десятки миллионов лет, обусловила неоднородность и многоэтапность раскрытия, с дополнительными осложнениями, возникшими вследствие столкновения Индии с Азиатским материком.

История позднемиоценового и последующего раскрытия С-З части Индийского океана представляется особенно трудной для исследования, поскольку проходила под знаком последовательного распада нескольких небольших континентальных блоков (Coffin, Rabinowitz, 1988).

Раскол Мадагаскара, Сейшелл и Индии, начался с взаимного разделения первых двух микроконтинентов, о чем свидетельствуют аномалии с номерами 34-27 в Маскаренской котловине (Schlich, 1982). Основной особенностью раскрытия этого бассейна было прогрессивное угасание спрединга, которое происходило с севера на юг, что нашло отражение в веерообразной структуре аномалий и постепенном уменьшении возраста датировки древних центров спрединга на Маскаренском хребте от аномалии 30 на северном сегменте до аномалии 27 на его южной оконечности (Bernard, Munsch, 2000).

Раскрытие Аравийского моря – последний эпизод в дроблении Гондваны, начавшийся с отделения Сейшелл от Индии по некоторым данным не позже 68 млн. лет (эпоха аномалии 29). До настоящего времени не существует общепринятой кинематической модели, описывающей начальный период раскрытия С-З части Индийского океана, поскольку не удалось уверенно проидентифицировать магнитные аномалии и провести оси в северо-восточной части Аравийской котловины, примыкающей к западному побережью Индии, и в комплементарной области, расположенной в восточной части Сомалийской котловины у восточной окраины Сейшельского плато (Talwani, Reif, 1998). Со времени первых работ (Fisher, Sclater, 1983; McKenzie, Sclater, 1971; Patriat, 1987; Schlich, 1982) в истории раскрытия С-З части Индийского океана принято выделять три фазы.

К ранней фазе в период от аномалии 28 (65 млн. лет) до аномалии 23 (53 млн. лет) относят быстрое

разрастание океанического дна относительно древней широтной оси хр. Карлсберг. К последней фазе относят медленный спрединг относительно современной оси этого хребта, начавшийся предположительно 20-30 млн. лет назад. Указанные периоды активного раскрытия разделены фазой, которая характеризуется либо полным отсутствием спрединга, либо его очень медленными темпами, сформировавшими плохо идентифицируемые аномалии.

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 1980 году под руководством А.М. Карасика была осуществлена первая российская систематическая морская магнитная съемка в ходе экспедиции на НИС «Фаддей Беллинсгаузен» к востоку от зоны разломов Оуэн и к югу от хр. Меррей, охватившая акваторию Аравийской котловины и северо-восточный склон хр. Карлсберг (Карасик и др., 1981). По материалам этой экспедиции была построена карта АМП, интерпретация которой впервые позволила выявить систему осей линейных аномалий, охватывающих всю площадь региона, включая зону плохо идентифицируемых аномалий. Эти данные легли в основу ряда работ по исследованию структуры АМП этого региона (Карасик и др., 1981, 1986б, 1988). Были выделены две дискордантные системы линейных магнитных аномалий, которые различаются между собой по ширине, интенсивности и простиранию, а также по степени их межгалсовой корреляции и приуроченности к морфологическим провинциям океанического дна.

Первая система магнитных аномалий имеет ЮВ простирание (130°), совпадающее с простиранием оси хр. Карлсберг, его рифтовой долины и осевой аномалии. Интенсивность аномалий в пределах хребта, в целом, убывает от его оси и рифовых гор к флангам, что соответствует обобщенному региональному топографическому разрезу хребта.

Вторая система линейных магнитных аномалий, приуроченная к Аравийской котловине, имеет широтное и субширотное простирание и сменяет первую систему, расположенную на оси хр. Карлсберг и его флангах. В северной части Аравийской котловины удалось уточнить положение ряда ранее открытых трансформных разломов: Анахита, Брахма, Шива и выделить новую зону разломов Ганеша. Геохронологическая интерпретация АМП позволила проидентифицировать полную последовательность линейных магнитных аномалий как на оси хр. Карлсберг, так и в глубоководной части Аравийской котловины и впервые сделать предположение о том, что формирование современной системы разрастания проходило в форме продвижения рифта и сопровождалось откалыванием небольших

фрагментов коры и их взаимобменом между Индийской и Африканской плитами (Карасик и др., 1986а, 1988).

В последующие годы в результате систематических морских магнитных съемок, выполненных в 1983, 1984 и 1986 годах, магнитными и батиметрическими исследованиями были охвачены хр. Карлсберг и его склоны на протяжении более 1500 км от зоны разломов Оуэн до зоны разломов Академика Вернадского. Наконец, в 1987, 1988 и 1990 годах систематические исследования были проведены в юго-восточной части Сомалийской котловины между Сейшельской банкой и хр. Карлсберг (Меркурьев, 1990; Меркурьев, Сочеванова, 1990).

Анализ АМП и структуры хр. Карлсберг на всем его протяжении от зоны разломов Оуэн до зоны разломов Академика Вернадского был выполнен в 1986 г. под руководством А.М. Карасика на основе карт графиков АМП и рельефа дна, составленным по данным систематических исследований (Карасик и др., 1986а, 1986б). Эти исследования показали, что существовавшие ранее представления о структуре медленноспрединговых СОХ, которые представляют собой прямые спрединговые сегменты с узкими зонами кристаллической аккреции, ограниченные трансформными разломами, вдоль которых осуществляется сдвиг сегментов, являются сильно упрощенными. Оказалось, что ось хр. Карлсберг состоит из узких, сегментированных неовулканических зон шириной 1-3 км. Помимо стабильных трансформных разломов, вдоль которых ось хребта латерально смещена на первые десятки километров, центры спрединга разбиты на тектонические сегменты многочисленными мелкими разрывами непрерывности. Проведенный геохронологический анализ АМП и морфологический анализ рельефа дна позволили выделить на хр. Карлсберг целый ряд магнитных и тектонических неоднородностей. Анализ показал, что эти неоднородности связаны с продвижением рифта, перекрытиями центров спрединга, небольшими сдвигами без перекрытия центров спрединга и отклонениями от осевой линейности, то есть с процессами, считавшимися ранее свойственными лишь быстрым центрам спрединга (Карасик и др., 1986в).

СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП ИССЛЕДОВАНИЙ

Современный этап исследований Индийского океана, совпал с бурным развитием компьютерных технологий. Основу этого этапа составляют создание банков геофизических данных, использование систем управления базами данных и геоинформационных систем. В настоящее время для всего Мирового океана, происходит широкомасштабная систематизация и аккумуляция

данных в рамках национальных и интернациональных проектов компиляции геофизических данных. Такая работа по переводу в цифровой вид оригинальных данных систематических съемок в Индийском и Атлантическом океанах была начата в 1991 г. группой морской геофизики в СПбФ ИЗМИРАН.

К концу 2000 г. была создана сводная база геофизических данных по С-З части Индийского океана, в которую после стандартных процедур, включающих редактирование, корректировку, устранение выбросов, внесение поправок, анализ точек пересечений, приведение к нормальному уровню с использованием международной аналитической модели IGRF (Langel, 1991), для последующего картографического представления, были загружены все цифровые магнитометрические и батиметрические данные.

Эти данные позволили рассчитать магнитометрические и батиметрические grids с шагом 2x2 минуты дугового расстояния для района с координатами 10° ю.ш.; 50° в.д. – 25° с.ш.; 75° в.д. Для регионального тектонического анализа структуры дна и для заполнения районов, не охваченных съемками, были использованы данные спутниковой альтиметрии (Sandwell, Smith, 1992). По этим данным был составлен комплект карт, включающий карту рельефа дна, карту графиков и карту изолиний аномального магнитного поля (рис. 2, 3 на 3 стр. обложки). Вся совокупность данных легла в основу изучения эволюции хр. Карлсберг на древнем и современном этапе - предмете наших исследований в последнее десятилетие (Меркурьев, Сочеванова, 1993, 1996; Mercouriev, Sochevanova, 1995; Merkouriev, DeMets, 2006).

СЕГМЕНТАЦИЯ ХРЕБТА КАРЛСБЕРГ

Хребет Карлсберг представляет современную границу плит между Индией и Африкой. Разрывы непрерывности оси хребта, проявляющиеся в рельефе дна, являются индикаторами поверхностных границ спрединговых ячеек и содержат информацию о широком классе аккреционных процессов, происходящих на СОХ. Обычно, для выделения разрывов непрерывности высокого порядка в структуре осей СОХ используют данные площадного эхолотирования. Ввиду отсутствия этих данных и учитывая также, что морфологические изменения, определяющие сегментацию хребта, сопровождаются также изменением характеристик геофизических полей, мы использовали данные детальных магнитометрических и батиметрических (данные однолучевого эхолота) исследований. Для изучения структуры осевой части хр. Карлсберг и выделения сегментов меньшего порядка мы провели комплексный анализ геофизических полей, используя оригинальное программное обеспечение.

На первом этапе мы определили положение оси хребта на основе магнитных и батиметрических данных с использованием методов корреляционного анализа. В некоторых случаях найденное положение «магнитной» оси, соответствующей центру осевой аномалии, приведенной к полюсу, не совпадало с «батиметрической» и «тектонической» осями хребта, проявляемых в рельефе дна. Поэтому приходилось выбирать компромиссные варианты положения оси.

Далее, с учетом линейной структуры АМП, рельефа дна и высокой плотности галсов, для выделения крупномасштабных сегментов хр. Карлсберг был использован метод попрофильной корреляции. Его результаты представлены на [рис. 4 \(3 стр. обложки\)](#). Уменьшение значений коэффициентов корреляции магнитных и батиметрических профилей естественно связывать с нарушениями в структуре АМП и рельефа дна, которые приурочены к границам спрединговых ячеек. Отрезок оси хребта, соответствующий участку кривой, заключенной между двумя локальными минимумами, мы отождествляем с отдельным сегментом хребта. Сопоставление кривых, полученных по магнитным и батиметрическим данным, показывает, что обе кривые синфазны и все локальные минимумы на кривой, полученной по магнитным данным, достигаются в тех же точках, что и на кривой, полученной по батиметрическим данным, но количество этих минимумов разное. Анализ батиметрических данных позволяет выделить большее количество сегментов, на которые можно разбить ось хребта по сравнению с результатами анализа магнитометрических данных, что свидетельствует о том, что не все сегменты проявляются в магнитном поле. С помощью указанной процедуры мы присвоили порядковые номера выделенным сегментам, начиная с северного, который расположен недалеко от зоны разломов Оуэн, являющейся северной границей хр. Карлсберг (Merkouriev et al., 1998).

Для исследования глубинного строения хр. Карлсберг был использован набор гравиметрических данных, полученных на основе спутниковых альтиметрических измерений (Sandwell et al., 1995). Чтобы очистить гравиметрический эффект топографии при постоянной толщине коры, мы рассчитали грид гравиметрических аномалий, приведенных к мантии (МБА - мантийная аномалия Буге) ([рис. 5 на 3 стр. обложки](#)). Сегменты СОХ характеризуются увеличением МБА от центра к краям. Эта гравиметрическая аномалия, имеющая круглую форму в центре сегмента получила название «бычий глаз» (Lin et al., 1990). Такую форму гравиметрических аномалий можно проинтерпретировать или как утолщение кристаллического фундамента в центре сегмента, или изменением плотности, а, следовательно, и температуры мантии вдоль сегмента. Эти две интерпре-

тации объединяются, когда более толстая кора в центре сегмента вызвана более сильным магматизмом и, следовательно, более теплой мантией.

Этот набор данных в совокупности с цифровой картой осей линейных магнитных аномалий и намагниченностью, рассчитанной вдоль магнитных профилей, позволил определить крупномасштабную сегментацию исследуемого отрезка хребта (Merkouriev et al., 1999).

В процессе анализа строения хр. Карлсберг было обнаружено изменение общего простирания хребта в районе 2.5° с.ш. - 66° в.д., где он разбивается на две разные части: северо-западную и юго-восточную. Для северо-западной части характерно генеральное простирание, почти ортогональное к современному направлению спрединга, в то время как юго-восточная часть отличается косым простиранием - примерно 45° СВ. В северо-западной части хребта ось состоит из 20 сегментов. Большинство разрывов непрерывности имеет малое или нулевое смещение и только два из них являются трансформными разломами. В юго-восточной части хребта ось разбита на 6 сегментов. Разрывы непрерывности имеют значительные смещения (до 100 км), однако, некоторые из них - не трансформные, а косые разломы. Несмотря на эти отличия, средняя длина сегментов в обеих частях приблизительно одинаковая - порядка 50 км. Батиметрические и гравиметрические профили вдоль оси хр. Карлсберг показывают, что северо-западная часть хребта разделяется в свою очередь еще на два крупных участка, граница которых проходит по 64° в.д., 3.5° с.ш., что на 200 км западнее, чем соответствующая «геометрическая» граница. Южный участок характеризуется небольшими вариациями амплитуды МБА вдоль оси, среднее значение которой больше чем аналогичное на северном участке. Сопоставление геоморфологических характеристик хр. Карлсберг и его глубинной структуры, выявленной по гравиметрическим данным, позволяет сделать ряд выводов. Геометрия оси хребта, которая, по-видимому, унаследована со времени раскрытия данного океанического бассейна, в значительной степени определяет морфологию хребта. В то же время, геометрия не «управляет» глубинной структурой, так как МБА указывают на непрерывный магматический источник под этой хаотичной морфологией. Эта необычная глубинная структура могла бы быть комбинацией влияния горячей точки и увеличивающейся скорости спрединга в южном направлении.

АСИММЕТРИЧНОСТЬ АНОМАЛИЙ И МОДЕЛЬ ПЕРЕСКОКОВ ОСИ СПРЕДИНГА

Для исследования эволюции центров спрединга на хр. Карлсберг во времени и пространстве

нами был проведен геохронологический анализ АМП вдоль всего простираения хребта (1300 км) и на обоих его флангах, во временном диапазоне 0-10 млн. лет.

Мы провели анализ тонкой структуры АМП на отрезке хр. Карлсберг длиной более 700 км к югу от зоны разломов Оуэн по детальным магнитометрическим и батиметрическим данным (среднее межпрофильное расстояние 5-7 км). На репрезентативных профилях, пересекающих ось хр. Карлсберг, в пределах каждого сегмента были идентифицированы магнитные аномалии от осевой до аномалии 5 (10 млн. лет). Линейная скорость спрединга вдоль оси хр. Карлсберг изменяется от 1.1 см/год на его северо-западной оконечности до 1.5 см/год в районе 2° ю.ш. Как правило, на всех магнитных профилях уверенно прослеживается аномалия 5, благодаря своей характерной форме, длине и амплитуде. При сопоставлении других аномалий на флангах хребта от профиля к профилю выявляется довольно быстрое изменение их формы и знака, что приводит к некоторому разрушению линейной структуры поля и затрудняет идентификацию (Patriat et al., 1998). Тем не менее, на обоих флангах хребта путем поперечной корреляции проидентифицированы аномалии на всех остальных профилях и составлена цифровая карта изохрон, которую мы использовали при изучении распределения скорости спрединга вдоль оси хребта и для кинематического анализа.

Расчет кинематических параметров вращения Индийской и Африканской плит показал, что за последние 10 млн. лет полюс (23.6° с.ш. 30.5° в.д.) и угловая скорость вращения (0.39 град/млн. лет) оставались практически без изменения. В то же время детальный анализ распределения полной линейной скорости спрединга вдоль хребта, кроме закономерного ее уменьшения в северо-западном направлении, связанного с приближением к полюсу раскрытия, выявил локальные вариации полускорости спрединга на левом и правом флангах, связанные с нестационарностями раскрытия.

На рис. 6 представлены результаты анализа распределения средней линейной скорости спрединга вдоль оси хр. Карлсберг за последние 10 млн. лет (эпоха аномалии 5). На рисунке показано, что кривые, описывающие распределение скоростей спрединга, измеряемых на левом или правом флангах хребта, расположены вдоль теоретической зависимости, отклоняясь от нее в ту или другую сторону, причем величины этих отклонений достигают 10-15%. Зато на графике распределения средних полускоростей спрединга, полученных без учета положения оси хребта, видно, что измеренные значения ложатся вдоль теоретической зависимости и величины отклонений не превышают 1-2%, что объясняется погрешностью

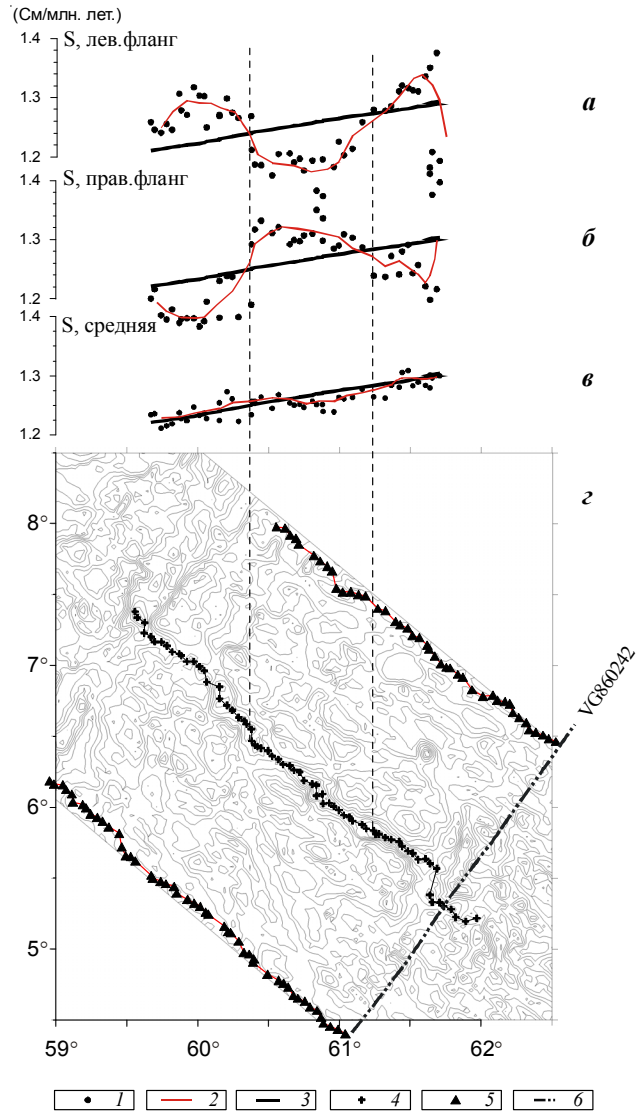


Рис. 6. Результаты анализа распределения скоростей спрединга вдоль оси хребта Карлсберг для эпохи аномалии 5. Скорости, измеренные для левого (а), для правого (б) флангов хребта и их средние значения (в). Магнитные аномалии, наблюдаемые над хребтом (г). 1 - значения скорости; 2 - результат сглаживания методом скользящего среднего; 3 - теоретически рассчитанные скорости спрединга на основе полученного ранее полюса раскрытия (23.6° с.ш. 30.5° в.д.); 4 - положение оси хребта Карлсберг; 5 - положение осей аномалии; 6 - положение репрезентативного профиля VG860242, для которого выполнялось магнитное моделирование.

метода. Сопоставление первых двух графиков на рис. 6 с третьим показывает, что повышение скорости спрединга на одном из флангов компенсируется ее понижением на другом. На изученном участке хр. Карлсберг, длиной более 200 км на его левом и правом флангах в среднем за последние 10 млн. лет наблюдаются одинаковые скорости спрединга. Таким образом, для исследованной части хр. Карлсберг можно говорить о некотором законе сохранения средней скорости, а следо-

вательно, и о законе «сохранения коры», нарастающей в среднем на обоих флангах хребта.

Особый интерес в нашем исследовании вызвал сегмент хр. Карлсберг в районе 61.5° в.д., где была обнаружена максимальная степень асимметричности, величина которой составила 20%. Сопоставление наблюдаемого (репрезентативного) профиля VG860242 из этого сегмента хр. Карлсберг с симметричной спрединговой моделью (рис. 7а), показало их неудовлетворительное соответствие. Поэтому анализ обнаруженной асимметричности структуры АМП рифтовой зоны потребовал привлечения моделей магнитоактивного слоя (МАС), сформированного в условиях нестационарного спрединга.

Характерным свойством структуры аномального магнитного поля рифтовых зон СОХ является его симметричность относительно оси разрастания, поэтому при геохронологической интерпретации линейных магнитных аномалий Мирового океана

над хребтами с разными скоростями разрастания, как правило, используется простая симметричная спрединговая модель (M_{cc}) намагниченных блоков прямой и обратной полярности. При идентификации магнитных аномалий над медленно-спрединговыми хребтами (полускорость разрастания < 2 см/год) с применением этой модели возникает ряд трудностей из-за асимметричного спрединга и искажения формы одновозрастных аномалий на обоих флангах хребта (Меркурьев, Сочеванова, 1996; Patriat et al., 1998). При низкой скорости спрединга расстояние между двумя соседними блоками противоположной полярности может оказаться настолько малым, что наблюдаемые на поверхности океана магнитные аномалии становятся результатом вклада целого ряда противоположно намагниченных блоков. Следовательно, асимметричный спрединг приводит не только к неодинаковой ширине одновозрастных

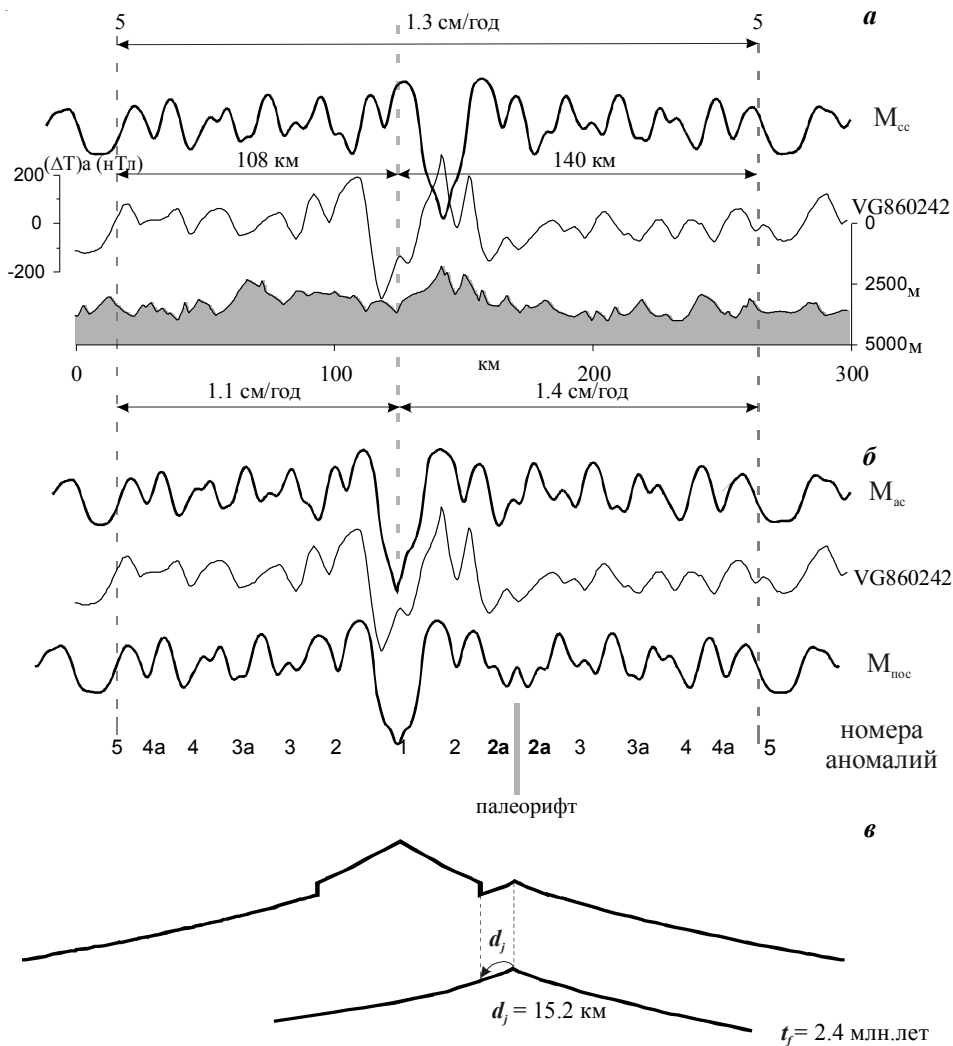


Рис. 7. Сопоставление репрезентативного профиля VG860242 на хребте Карлсберг с симметричной спрединговой моделью M_{cc} (а) и с двумя альтернативными моделями, позволяющими получить наблюдаемую степень асимметрии с помощью модели асимметричного спрединга M_{ac} и модели с перескоком оси спрединга M_{pos} (б). Схема скачка (джампинга) оси спрединга (в): t_j - время перескока оси спрединга; d_j - амплитуда скачка. Местоположение профиля приведено на рис. 6з.

аномалий на обоих флангах хребта, но и к различной их форме. Перескоки (джампинги) оси спрединга являются альтернативным механизмом, способным объяснить как изменение формы и ширины аномалий, так и их асимметричное положение.

Таким образом, существуют две модели, способные объяснить асимметричность структуры АМП, — это модель несимметричного разрастания и модель симметричного разрастания с перескоком оси спрединга. Для проверки этих гипотез мы провели математическое моделирование, имеющее целью сравнить эти модели и оценить их достоверность (Меркурьев, Сочеванова, 2000).

Нами разработана математическая модель МАС океанической литосферы, сформированной в режиме симметричного разрастания с перескоком оси спрединга, и проанализированы полученные соотношения между временными и пространственными параметрами перескока оси. На основе этой модели разработан алгоритм и создана программа расчета магнитных профилей, пересекающих ось срединно-океанических хребтов, а также метод определения перескоков центров спрединга, с использованием неформальных методов анализа данных, протестированный на модельном примере.

Для сегмента хр. Карлсберг с асимметричной структурой АМП были подобраны модели с асимметричным спредингом (M_{ac}) и с перескоком оси (M_{noc}) (рис. 7б). Для асимметричной модели, удовлетворяющей наблюденному профилю, были подобраны скорости спрединга для левого и правого флангов, равные 1.1 и 1.4 см/год. Из множества моделей с правосторонним перескоком оси была выбрана модель с амплитудой 15.2 км и временем скачка 2.4 млн. лет, поскольку она соответствовала максимальному коэффициенту корреляции с наблюденным профилем (рис. 7в). При сопоставлении наблюденного и двух альтернативных модельных профилей большее значение коэффициента корреляции достигается для модели с перескоком оси ($R_{noc}=0.78$) нежели для модели с асимметричным спредингом ($R_{ac}=0.68$). Кроме того, из общих геодинамических положений представляется маловероятным резкое локальное изменение скорости спрединга, поэтому природу асимметричности АМП в данном случае мы связываем с локальным перескоком оси спрединга. Анализ нарушений симметрии молодой последовательности (аномалии 1-6) на хр. Карлсберг выявил, что выпадение некоторых аномалий не связано с каким-либо флангом, но больше характерно для аномалий, сформировавшихся за последние 7-7.5 млн. лет. Причины, которые привели к образованию этих неоднородностей в этом временном интервале, возможно, являются следствием процесса деформации зоны, расположенной к югу на Центрально-Индийском хребте, начало

которой датируется 7.5-8 млн. лет (DeMets et al., 1994; Gordon et al., 1998). Выяснение природы асимметричности АМП на других сегментах хр. Карлсберг потребует дополнительных исследований, возможно, с привлечением модели продвижения рифта (Heu et al., 1980).

АСИММЕТРИЯ ДРЕВНИХ АНОМАЛИЙ — СЛЕДСТВИЕ ПРОДВИЖЕНИЯ РИФТА

Геохронологический анализ магнитных аномалий далее был продолжен вглубь Аравийской и Сомалийской котловин с целью исследования фазы промежуточного спрединга, о которой были весьма скудные сведения. С помощью разработанной методики интерпретации магнитных аномалий, сформированных на медленных центрах разрастания с переменной скоростью, нам удалось расшифровать последовательность слабо амплитудных аномалий, приуроченных к этой зоне (Merkouriev et al., 1995). Данный промежуточный этап проходил сверхмедленными темпами 0.6-0.8 см/год и длился от аномалий 18 до аномалии 7 (Mercuriev et al., 1996). Именно этот временной период отмечен глобальными изменениями кинематических параметров движения плит, которые сопровождалась перестройками центров спрединга во многих районах Мирового океана. Например, в этот же временной период наблюдалось замедление и изменение направления спрединга и на хр. Рейкьянес, обнаруженное нами ранее при исследовании Северной Атлантики (Карасик и др., 1990; Mercouriev et al., 1994).

Обращаясь к карте АМП с вынесенными на нее осями линейных магнитных аномалий (рис. 3 на 3 стр. обложки) не трудно заметить, что самой древней из молодой последовательности аномалий, рожденных на современном хр. Карлсберг, является аномалия 20, простирающая которой близко к северо-западному простиранию оси современных центров спрединга. Ось аномалии 20 прослеживается в Аравийской и Сомалийской котловинах и на всем своем протяжении не испытывает существенных сдвигов.

Последовательность более древних аномалий 21-26 существенно отличается по своему простиранию и геометрии центров спрединга от предыдущих аномалий молодой последовательности. Особенно эта разница простираний заметна в Аравийской котловине, где аномалии 21-26 имеют широтное простирание. Кроме того, в полной последовательности аномалий, расположенных в Аравийской и Сомалийской котловинах, можно выделить две группы, которые латерально сдвинуты друг относительно друга. Внешняя граница этих групп на северо-западе совпадает с зоной разломов Оуэн и ее пассивными продолжениями в Аравийской котловине и Сомалийской

котловине. На юго-востоке эта граница не имеет явного проявления в рельефе дна, но хорошо прослеживается в магнитном поле и проходит под углом 45° от точки с координатами 2.5° с.ш. и 66° в.д., где хр. Карлсберг меняет свое генеральное простирание.

В отличие от современной последовательности аномалий, расположенной в целом симметрично по отношению к современной оси хребта вдоль всего его простирания, древние последовательности аномалий в юго-восточной и северо-западной частях хребта расположены по-разному. Основное отличие состоит в том, что две комплементарные последовательности аномалий из юго-восточной группы расположены симметрично относительно современной оси хр. Карлсберг, тогда как расположение северо-западной группы аномалий асимметрично относительно современной оси при этом знак этой асимметрии в пользу Аравийской котловины. Вследствие этого амплитуда сдвига северо-западной и юго-восточной группы аномалий в Сомалийской котловине оказалась меньше чем в Аравийской котловине.

Для исследования периода перестройки центров спрединга, при переходе от быстрого этапа к медленному мы исследовали магнитные аномалии в северо-западной части Сомалийской котловины. Благодаря более высокой плотности данных удалось выделить четкую границу контакта древней последовательности длинноволновых аномалий ЗСЗ простирания, которая срезается молодой последовательностью коротковолновых

аномалий, параллельных оси хребта и имеющих северо-западное простирание (рис. 3 на 3 стр. обложки). Эта граница, простирание которой 315° СЗ от точки с координатами 0.5° с.ш. и 60° в.д., четко выражена и в рельефе дна Сомалийской котловины, где наблюдается переход расчлененного рельефа юго-западного фланга хр. Карлсберг к сглаженному рельефу глубоководной абиссальной котловины (рис. 2 на 3 стр. обложки). По результатам геохронологического анализа магнитных аномалий, пересекающих северную и южную оконечности этой линейной структуры, был определен разный возраст океанической коры. На севере возраст коры составил 50.2 млн. лет (аномалия 23), а на юге 53.35 млн. лет (аномалия 24а) по шкале (Cande, Kent, 1995). Положение аналогичной границы древней и молодой последовательности аномалий в Аравийской котловине нами было получено путем реконструкции. Для этого мы использовали опубликованные ранее кинематические параметры вращения Индийской и Африканской (Сомалийской) плит для данных эпох (Vesse, Courtillot, 1988). Отметим, что в рельефе дна Аравийской котловины эта граница никак не проявилась, что, по-видимому, связано с большим количеством осадков.

Анализ простирания этих линейных структур, напоминающих псевдоразломы и диахронно срезающих оси магнитных аномалий в Аравийской и Сомалийской котловинах, показывает, что при переходе от древнего к современному этапу раскрытия происходила смена конфигурации, и древние центры спрединга проявляли активность вдоль своей оси, т.е. происходило продвижение рифта с юго-востока на северо-запад. По нашим оценкам скорость продвижения рифта составляла 50 см/год. На рис. 8 показана тектономагнитная схема, объясняющая формирование двух систем линейных магнитных аномалий и механизм перехода от одной системы к другой, связанный с продвижением рифта и образованием псевдоразломов. Этот эпизод может быть связан с важнейшими геодинамическими событиями, происходившими в Индийском океане в эту эпоху. Именно в этот период происходило формирование Чагос-Лаккадивского хребта и Маскаренского плато вследствие активности горячей точки Реюньон-Декан.

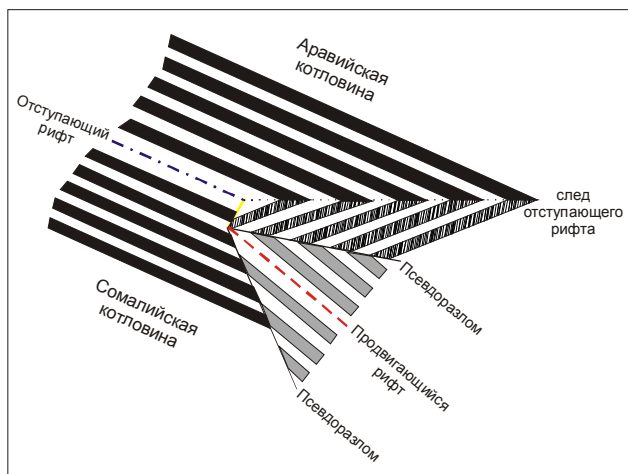


Рис. 8. Тектономагнитная схема перестройки геометрии центров спрединга на хр. Карлсберг от древней к современной конфигурации в форме продвижения рифта в северо-западном направлении. Черными полосами показаны изохроны, соответствующие древней последовательности магнитных аномалий, образовавшихся на древних центрах спрединга оступающего рифта. Серыми полосами показаны изохроны, соответствующие молодой последовательности магнитных аномалий, образовавшихся на современных центрах спрединга продвигающегося рифта. Молодая система магнитных аномалий срезает древнюю систему вдоль псевдоразломов, образовавшихся в процессе продвижения рифта. Вертикальной штриховкой показаны изохроны той части океанической коры, которая была отколота от Сомалийской плиты и присоединена к Индийской плите в результате продвижения рифта в северо-западном направлении. Точками показан след оступающего рифта. Штрих-пунктирная линия — оступающий рифт. Пунктирная линия — продвигающийся рифт. Линия, соединяющая продвигающийся и оступающий рифты — мгновенный трансформный разлом.

Необходимо отметить, что для объяснения особенностей структуры АМП в Аравийской котловине ранее высказывались предположения о роли процесса продвижения рифта в ее формировании (Карасик и др., 1986а; Chaubey et al., 1998; Dument, 1998; Miles, Roest, 1993). В данной работе мы предлагаем расчетную кинематическую модель продвижения рифта с учетом параметров вращения плит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематические магнитометрические исследования северо-западной части Индийского океана, которые были начаты в начале 80-ых годов прошлого века под руководством А.М. Карасика, позволили накопить уникальные магнитометрические и батиметрические данные, легшие в основу исследования этого региона. Созданный банк геофизических данных по СЗ части ИО позволил впервые провести комплексную интерпретацию этих данных.

Как показал геохронологический анализ АМП, раскрытие СЗ части Индийского океана является последним эпизодом дробления суперконтинента Гондваны и отколом Сейшельского микроконтинента от Индии, которое произошло в эпоху аномалий А28-А29 или по некоторым данным (Talwani, Reif, 1998), чуть ранее. Исследования хребта Карлсберг на всем его протяжении от зоны разломов Оуэн на северо-западе до зоны разломов Академика Вернадского на юго-востоке и прилегающих частей Аравийской и Сомалийской котловин, показали, что со времени своего происхождения хр. Карлсберг испытывал несколько периодов своего развития, в течение которых его конфигурация, направление и скорость разрастания существенно менялись. При этом, как показал анализ тонкой структуры АМП, выявивший магнитные и тектонические неоднородности, процесс океанической аккреции на хр. Карлсберг во время всей его эволюции происходил в значительной степени в нестационарном режиме.

Наличие двух дискордантных систем магнитных аномалий в СЗ части Индийского океана и их геоисторический анализ показали, что раскрытие этого бассейна происходило в три фазы. К ранней фазе относят быстрое разрастание океанического дна относительно широтной оси протохребта Карлсберг от аномалии 28 (65 млн. лет) до аномалии 23 (53 млн. лет). К последней фазе относят начавшийся 20-30 млн. лет назад медленный спрединг относительно современной оси этого хребта. Указанные периоды активного раскрытия разделены фазой, которая до недавнего времени имела скудные характеристики о продолжительности и скорости спрединга. Нам удалось расшифровать последовательность

слабоамплитудных аномалий, приуроченных к этой зоне и показать, что промежуточный этап проходил сверхмедленными темпами 0.6 см/год и длился от аномалий 20 до аномалии 7 (Mercuriev et al., 1996).

Анализ АМП, рельефа дна и гравиметрических аномалий приведенных к мантии показывает, что хр. Карлсберг имеет сложное строение и, несмотря на почти точное соответствие между осью и направлением спрединга, хр. Карлсберг характеризуется быстрой эволюцией эшелонированных центров спрединга. Наши результаты, следовательно, подтверждают, что сегментация хр. Карлсберг – не следствие унаследованной геометрии дивергентной границы, связанной с изменениями условий спрединга, а результат аккреционных процессов, концентрирующих магму вдоль дискретных очагов на оси медленного хребта.

Детальный геохронологический анализ АМП и геоморфологический анализ рельефа дна рифтовой зоны хр. Карлсберг показали, что хребет имеет сложное строение, а его ось характеризуется эшелонированной системой центров спрединга. Анализ магнитных и батиметрических данных методом поперфильной корреляции магнитных и батиметрических данных позволил выделить 10 трансформных и нетрансформных разрывов с небольшими левосторонними латеральными смещениями оси хребта. Два разрыва непрерывности первого порядка были обнаружены в районе 60° в.д. и 61.5° в.д., которые характеризуются амплитудой смещения 55 и 25 км. Семь разломов непрерывности второго порядка характеризуются нулевым или небольшим смещением оси хр. Карлсберг.

Анализ распределения средней за 10 млн. лет скорости спрединга вдоль оси хребта Карлсберг показал, что она не всегда симметрична относительно оси хребта, знак этой симметрии не приурочен к одному из флангов или к одному из временных периодов раскрытия. Анализ АМП и рельефа дна показал, что природа этой асимметрии состоит в перескоках оси спрединга.

Созданная математическая модель магнитоактивного слоя океанической литосферы, сформированной в режиме нестационарного разрастания с перескоком оси спрединга, и разработанный алгоритм и метод определения параметров перескоков центров спрединга по магнитным и батиметрическим данным, позволили определить количественные параметры этого перескока. Предложенная нами «модель перескока оси» и методика определения параметров перескока позволили заключить, что перескок на оси хребта Карлсберг в районе 61.5° в.д. произошел в сторону Сомалийской котловины (к западу) примерно 2.4 млн. лет назад с амплитудой 15.2 км.

В результате исследований выявленной асим-

метрии древних магнитных аномалий в Аравийской и Сомалийской котловинах по отношению к современной оси хр. Карлсберг сделано предположение, что переход от быстрого спрединга к современному медленному раскрытию на хр. Карлсберг происходил в форме продвижения рифта.

Таким образом, наши исследования показывают, что на протяжении всей эволюции хр. Карлсберг спрединг относительно его оси происходил в значительной степени в нестационарном режиме, формы которого чрезвычайно разнообразны: изменение скорости и направления спрединга, несимметричный спрединг, продвижение оси спрединга, перескоки оси спрединга и т.п. Причина этих нестационарностей, скорее всего, связана с мантийной динамикой и изменением геодинамического режима.

Представленные результаты получены при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований по грантам: 96-05-64756, 98-05-65629, 06-05-64297. Рисунки к данной статье были выполнены с помощью пакета программ GMT (Wessel, Smith, 1998).

Список литературы

- Карасик А.М.* Аномальное магнитное поле океанов // Тектоносфера Земли. М.: Наука, 1978. С. 302-314.
- Карасик А.М.* Геоисторический анализ океанического магнитного поля и тектоника плит // Геофизические методы исследования Мирового океана. Л., 1979. С. 31-49.
- Карасик А.М.* Область приложений аномального магнитного поля океанов // Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами. М.: ИЗМИРАН, 1981. С. 161-171.
- Карасик А.М., Зимоглядов В.А., Золотов И.Г. и др.* Магнитные аномалии и хронология дна Аравийского моря // Тез. докл. II Всесоюз. съезда океанологов. Севастополь, 1981. Вып. 7. Ч. 1. С. 21-22.
- Карасик А.М., Меркурьев С.А., Митин Л.И. и др.* Основные особенности раскрытия Аравийского моря по данным систематической магнитной съемки. // ДАН СССР. 1986. Т. 286. № 4. С. 933-938.
- Карасик А.М., Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А. и др.* Аномальное магнитное поле Аравийско-Индийского хребта по данным систематической магнитной съемки // Тез. докл. III Всесоюз. съезда по геомагнетизму. Киев, 1986а. С. 58.
- Карасик А.М., Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А., Яновский В.Н.* Аномальное магнитное поле, морфология и хронология дна Аравийско-Индийского хребта между 60° и 69° в.д. // Тез. докл. 7 Всесоюз. школы по морской геологии. М.: 1986б. Т. 2. С. 100 -101.
- Карасик А.М., Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А., Яновский В.Н.* Районирование и природа аномального магнитного поля северо-западной части Индийского океана // Геофизические поля Тихого и Индийского океанов. М.: 1988. С. 80 - 90.
- Карасик А.М., Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А. и др.* Особенности процесса разрастания Северной Атлантики по данным площадных гидромагнитных съемок на хр. Рейкьянес и в Исландской котловине // Электромагнитная индукция в Мировом океане. М.: ИЗМИРАН, 1990. С. 57-69.
- Меркурьев С.А.* Аномальное магнитное поле и геодинамика северо-западной части Индийского океана: Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. Ленинград, 1990. 208 С.
- Меркурьев С.А., Карасик А.М., Сочеванова Н.А.* О некоторых процессах, происходящих на медленных рифтах на примере систематической магнитной съемки хр. Карлсберг // Тез. докл. 8 Всесоюз. школы по морской геологии. М.: 1988. Т. 2. С. 185-186.
- Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А.* Неоднородности в структуре аномального магнитного поля - следствие древнего тройного сочленения хр. Карлсберг? // Электромагнитная индукция в Мировом океане М.: ИЗМИРАН, 1990. С. 48-56.
- Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А.* Северо-западная часть Индийского океана // Магнитное поле океана / Отв. ред. А.М. Городницкий. М.: Наука, 1993. С. 134-156.
- Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А.* Аномальное магнитное поле и эволюция коры медленно-спрединговых хребтов // Природа магнитных аномалий и строение океанической коры / Отв. ред. А.М. Городницкий. М.: ВНИРО, 1996. С. 133-169.
- Меркурьев С.А., Сочеванова Н.А.* Асимметричность линейных магнитных аномалий и модель перескоков оси спрединга на примере хребта Карлсберг // Материалы 27-ой сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Москва: ОИФЗ РАН, 2000. С. 122-123.
- Bernard A., Munsch M.* Le bassin des Mascareignes et le bassin de Laxmi (océan Indien occidental) se sont-ils formés à l'axe d'un mkme centre d'expansion // C. R. Acad. Sci. 2000. Paris, 330. P. 777-783.
- Besse J., Courtillot V.* Paleogeographic maps of the continents bordering the Indian Ocean since the early Jurassic. // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. № B10, P. 11791-11808.
- Cande S., Kent D.V.* Revised calibration of the geo-

- magnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 6093-6095.
- Carlsberg Foundation Hydrographical observations made during the Dana expedition, 1928-1930. Dana Rep. № 12. 46 p.
- Chaubey A.K., Bhattacharya G.C., Murty G.P.S., et al.* Early Tertiary seafloor spreading magnetic anomalies and paleo-propagators in the northern Arabian Sea. // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 1998. V. 154. № 3-4. P. 41-52.
- Coffin M.F., Rabinowitz Ph.D.* Evolution of the conjugate East African-Madagascar margins of the western Somali Basin // *Geological Society of America, Special Paper.* 1988. V. 226. P.1-78.
- DeMets C., Gordon, R.G., Vogt P.* Location of the Africa-Australia-India triple junction and motion between the Australian and Indian plates: results from an aeromagnetic investigation of the Central Indian and Carlsberg ridges // *Geophys. J.* 1994. V. 199. № 3. P. 893-930.
- Dyment J.* Evolution of the Carlsberg Ridge between 60 and 45 Ma: Ridge propagation, spreading asymmetry, and Deccan-Reunion hotspot // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № B10. P. 24.067-24.080
- Fisher R.L., Sclater J.G.* Tectonic evolution of the Southwest Indian Ocean since the Mid-Cretaceous: plate motions and stability of the pole of Antarctica/Africa for at least 80 Myr // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1983. V. 73. № 2, P. 553-576.
- Gordon R.G., DeMets C., Royer J.-Y.* Evidence for long-term diffuse deformation of the lithosphere of the equatorial Indian Ocean // *Nature.* 1998. V. 395. № 24. P. 370-374.
- Hey R., Duennebie F.K., Morgan N.J.* Propagating rifts on mid-ocean ridges // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. № 137. P. 3647-3658.
- Johnson B.D., Powell C., Weevers J.J.* Early spreading history of the Indian ocean between India and Australia // *Earth Plane Sci. Lett.* 1980. V. 47. № 1. P. 131 - 190.
- Langel R.A.* IAGA News, 1991, Nr 30 Division I Working Group - International Geomagnetic Reference Fields: DGRF 1985, an IGRF 1990. P. 69.
- Lin J., Purdy G. M., Schouten H. et al.* Evidence from gravity data for focused magmatic accretion along the Mid-Atlantic Ridge // *Nature.* 1990. V. 344 № 6267. P. 627-632.
- McKenzie D.P., Sclater J.G.* The evolution of the Indian Ocean since the late Cretaceous // *Geophys. J.* 1971. V. 24. P. 437-528.
- Mercouriev S.A., Sochevanova N.A., Macnab R. et al.* Evidence for propagating rift in the Irminger basin near Reykjanes Ridge: detailed magnetic and bathymetric investigations // *Eos Trans. AGU. Spring Meeting. Baltimore, 1994. April 19. V. 75 (19).* № 16. P. 131.
- Mercouriev S., Sochevanova N.* Mid-Oceanic Ridges and Deep Oceanic Basins: AMF Structure. The Spreading Features of the NorthWestern Indian Ocean in Late Cenozoic Anomalous // *Magnetic Field of the World Ocean / Ed. A.Gorodnitsky. CRC Press, 1995. London-Tokyo-USA. P. 88-107.*
- Mercouriev S., Patriat Ph., Sochevanova N.* Evolution de la dorsale de Carlsberg: evidence pour une phase d'expansion tres lent entre 40 et 25 Ma (A18 a A7) // *Oceanologica Acta.* 1996. V. 19. № 1. P. 1-13.
- Merkouriev S., Patriat Ph., Sochevanova N., Munschy M.* The Evolution of The Carlsberg Ridge Since Anomaly 27 Time // *Terra Abstracts. Abstract supplement N1 to Terra Nova. Strasbourg, France, 9-13 April 1995. European Union of Geosciences, 1995. V.7. P. EUG-8.*
- Merkouriev S., Patriat Ph., Sotchevanova N.* The structure and evolution of the Carlsberg Ridge during last 10 Ma on the basis of detailed magnetic and bathymetric investigation., Paper presented at 35th Annual Convention of Indian Geophysical Union, 18-20 Nov., 1998. NIO, GAO, India., 1998. P. 1-5
- Merkouriev S., Rommevaux-Jestin C., Patriat Ph., Sotchevanova N.* Large scale segmentation of a 1300 km long section of the Carlsberg Ridge from bathymetry, gravimetry and magnetism // *Eos Trans. AGU Fall Meeting. November 16, 1999. V. 80. № 46. P. F1049.*
- Merkouriev S., DeMets C.* Constraints on Indian plate motion since 20 Ma from dense Russian magnetic data: Implications for Indian plate dynamics // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. V. 7, Q02002, doi:10.1029/2005GC001079
- Miles P.R., Roest W.R.* Earliest sea-floor spreading magnetic anomalies in the north Arabian Sea and the ocean-continent transition // *Geophys. J. Int.* 1993. V. 115. №3. P. 1025-1031.
- Norton I.O., Sclater J.G.* A model for the evolution of the Indian Ocean and the breakup of Gondwanaland // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. № 312. P. 6803-6830.
- Patriat Ph.* Reconstitution de l'evolution du systeme de dorsales de l'océan Indien par le methodes de la cinématique des plaques. Inst. de Physique du Globe de Paris. Reproduct par Instaprint S.A. Paris, 1987. 308 p.
- Patriat Ph., Rommevaux-Jestin C., Mercuriev S.* Variability of the Magnetic Anomalies over the Slow Spreading Ridges and their Interpretation. / *European Geophysical Society (EGS98), Annales Geophysicae, Part 1, Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Geodesy, Supplement 1 to Nice, 1998. V. 16. P. 301.*
- Sandwell D. T. Smith W. H. F.* Global marine gravity from ERS-1, Geosat and Seasat reveals new tectonic fabric // *EOS Trans. AGU, 1992. V. 73. № 43. P. 133.*

- Sandwell D.T., Smith W.H.F., Yale M.* Geodetic Mission reveals detailed tectonic structures // EOS Trans. AGU, 1995. V. 76 (17). P. 589.
- Schlich R.* The Indian Ocean: aseismic rides, spreading centers and oceanic basins. Ocean Basins and Margins. New York, London, 1982. V. 6. P. 51-147.
- Talwani M., Reif Ch.* Laxmi Ridge - A continental sliver in the Arabian Sea // Mar. Geophys. Res. 1998. V. 20. № 4. P. 259-271.
- Veevers J.J., Powell C.M.A., Johnson B.D.* Greater India's place in Gondwanaland and in Asia // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. V. 27. P. 383-388.
- Wessel P., Smith W.H.F.* New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released // EOS Trans. AGU, 1998. V. 79 (47). P. 579.

THE CARLSBERG RIDGE AT THE OLD AND MODERN STAGE OF OPENING

S.A. Merkouriev, N.A. Sotchevanova

SPbFIZMIRAN, Muchnov per, 2, Box 188, St. Petersburg, 191023, Russia

We present the results of magnetic and bathymetric data collected on board Russian vessels during the last decade. Our analysis shows that since late Cretaceous the proto-Carlsberg Ridge (CR) was spreading at a faster rate, prior to India's collision with Eurasia. Since Eocene, the present CR is characterized by slow spreading. Our results depict two discordant systems of linear magnetic anomalies. One corresponds with fast spreading with respect to latitude axis of the proto-ridge and the other with slow spreading with respect to modern axis of the CR, suggesting that the two spreading systems are asymmetric both relative to each other and relative to axial anomaly. We infer that during both these periods the structure and spreading on the CR was non-stationary.