

УДК 551.242.2(268)

## ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЕВРАЗИЙСКОГО БАССЕЙНА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОИСТОРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2006 г. В. Ю. Глебовский<sup>1</sup>, В. Д. Каминский<sup>1</sup>, А. Н. Минаков<sup>1</sup>,  
С. А. Меркурьев<sup>2</sup>, В. А. Чилдерс<sup>3</sup>, Дж. М. Брозина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана, 190121, Санкт-Петербург, Английский пр., 1, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. А.Н. Пушкова, 191023, Санкт-Петербург, Мучной пер., 2, Россия

<sup>3</sup>Naval Research Laboratory, Code 7421, 4555 Overlook ave., SW, Washington, D.C. 20375, USA

Поступила в редакцию 14.09.2005 г.

В результате увязки материалов старых и современных российских и американских аэромагнитных съемок, созданы новая сводная база данных и карта графиков аномального магнитного поля Евразийского бассейна (ЕБ). Проведен геосторический анализ магнитных данных. Он включал: идентификацию линейных магнитных аномалий (ЛМА) вдоль каждого профиля, вычисление положения полюсов вращения для относительного движения Северо-Американской и Евразийской плит, анализ изменения скоростей спрединга во времени и пространстве, а также палеорекострукции. Построена схема ключевых магнитных изохрон кайнозойской последовательности (24, 20, 18, 13, 6, 5, 2а) в пределах всего ЕБ. В западной половине бассейна она хорошо согласуется с недавно опубликованной [16]. В восточной его половине магнитные изохроны впервые детально определены и прослежены вплоть до шельфа моря Лаптевых. Установлены основные стадии раскрытия ЕБ. Каждая из этих стадий характеризуется разными скоростями и степенью асимметрии раскрытия бассейна. Обнаруженные различия прослежены вдоль простираения хребта Гаккеля. Выявлены закономерности в перемещениях полюса раскрытия ЕБ на отдельных стадиях его формирования. По гравиметрическим данным выявлена граница перехода континент–океан, отвечающая линии первичного раскола плит в исследуемом регионе. Обсуждаются причины различий, установленных в структуре потенциальных полей и рельефе дна по разные стороны от хребта Гаккеля. На основе анализа полученных материалов, а также новых опубликованных данных, сделаны выводы об особенностях формирования дна исследованной акватории на основных этапах раскрытия бассейна и уточнены схемы его эволюции. Результаты исследования хорошо увязываются с глобальной геодинамикой плит в Северной Атлантике и прилегающих арктических акваториях.

### ВВЕДЕНИЕ

Глубоководный Евразийский бассейн (ЕБ) Северного Ледовитого океана (СЛО) включает хребет Гаккеля с прилегающими глубоководными котловинами Нансена и Амундсена. Он ограничен шельфовыми областями Гренландии, острова Элсмир, Баренцева моря и моря Лаптевых, а также хребтом Ломоносова. Постоянный ледовый покров и суровые природные условия ограничивают возможности проведения сейсмических методов исследований на арктической акватории, поэтому основными экспресс-методами ее регионального изучения являются магнитометрический и гравиметрический. Причем, при изучении эволюции дна СЛО, как и других океанических акваторий, аэромагнитные съемки по-прежнему остаются наиболее информативными.

Результаты еще самых первых аэромагнитных съемок [31] выявили различный характер аномального магнитного поля (АМП) по разные стороны хребта Ломоносова. Оказалось, что поле ЕБ СЛО имеет сходство с полями Атлантического и Тихого океанов, в то время как в Амеразийском бассейне оно существенно отличается от “типично океанического” облика. Толчком к прояснению природы и истории формирования исследуемого региона явилось появление первой, построенной вручную, сводной карты магнитных аномалий ЕБ [7]. В дальнейшем, по мере появления новой информации о магнитном поле СЛО, и ее обобщения с результатами старых аэромагнитных исследований различными авторами публиковались все новые карты АМП, как, например [8, 9, 23, 40, 43, 45], и другие.

Наиболее полной из всех существующих сводных карт АМП СЛО, доступной Мировому геологическому сообществу исследователей, стала международная цифровая карта магнитных аномалий Арктики, Северной Атлантики и прилегающих континентальных областей, созданная по инициативе Атлантического отдела Геологической службы Канады (Geological Survey of Canada – Atlantic-GSC-A) [44]. Она основана на результатах компиляции разнородной магнитометрической информации, накопленной в указанных регионах преимущественно Россией, США и Канадой до начала 1990-х гг. Уже к моменту опубликования карты стало ясно, что она имеет существенные недостатки в выборе уровня нормального поля и рисовке очертаний магнитных аномалий в области, закрытой российскими съемками. Основные достоинства и слабые стороны карты АМП, опубликованной GSC-A, рассмотрены в ряде работ [3, 5, 12, 26].

Для устранения выявленных недостатков, еще до выхода карты в свет (начиная с 1992 г.), были начаты работы по созданию ее уточненной версии. При этом, все ранее существующие первичные профильные российские магнитометрические данные, накопленные в СЛО вплоть до начала 1990-х гг., были оцифрованы и заново обработаны с учетом зарубежной (преимущественно американской) информации. Полученная в результате работ совместная российско-американская карта глубоководной части арктической акватории и соответствующий ей грид с размером ячейки  $5 \times 5$  км [32] переданы в Национальный центр геофизических данных США (National Geophysical Data Center – NGDC) в 2005 г. По оценкам специалистов эта карта являлась на момент ее создания наиболее детальной из карт АМП глубоководной части СЛО.

Тем не менее, оказалось, что и эта карта может быть существенно улучшена в информационном отношении за счет притока новых высокоточных аэромагнитных данных. В период с 1993–2000 гг. Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ) провела серию площадных аэромагнитных и аэрогравиметрических съемок над архипелагом Земля Франца Иосифа с прилегающей акваторией (рис. 1). В 1998–1999 гг. Морская исследовательская лаборатория ВМФ США (Naval Research Laboratory – NRL) осуществила аналогичные площадные съемки в западной половине ЕБ, результаты которых были опубликованы в 2003 г. [16]. Новые российские и американские данные позволили, во-первых, значительно повысить степень изученности исследуемого региона и, во-вторых, скорректировать плановую привязку маршрутов старых аэромагнитных съемок 1970-х гг., путем их увязки с новой информа-

цией, использованной в качестве опорной [25]. Работа по обобщению и увязке всех аэромагнитных съемок, проведенных к настоящему времени в СЛО, была проведена во ВНИИОкеангеология. В результате были созданы новые сводная база магнитометрических данных и цифровая карта графиков АМП ЕБ, которые и послужили основой для геоисторического анализа.

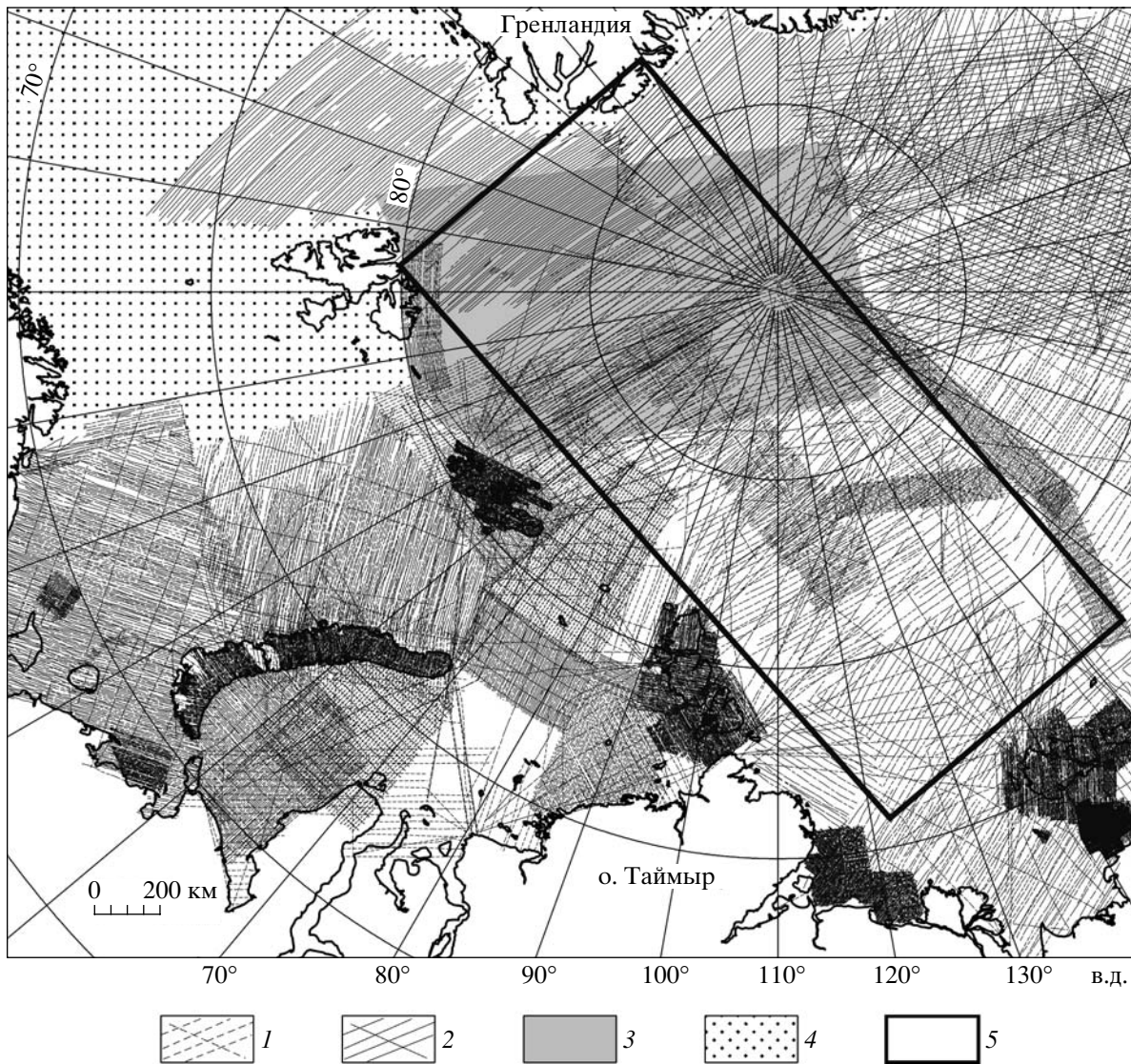
Генеральные черты строения и эволюции ЕБ стали известны уже после анализа аномального магнитного, проведенного А.М. Карасиком [8–10]. Со временем, благодаря усилиям многих западных и российских исследователей, они были существенно уточнены. В частности, были уточнены кинематические характеристики раскрытия ЕБ на разных стадиях его формирования и предложены новые уточненные схемы эволюции его дна [16] и дна Мирового океана в целом [33, 34].

По мнению абсолютного большинства геологов и геофизиков ЕБ возник в кайнозойское время в результате разрастания океанического дна, за счет прироста океанической коры в осевой зоне хребта Гаккеля. При этом хребет Ломоносова, будучи ранее присоединенным к Евразийской плите, постепенно дрейфовал к востоку, пока не занял свое современное положение. Хребет Гаккеля, трассирующий осевую зону бассейна, является самой медленной частью глобальной системы срединно-океанических хребтов и поэтому имеет отличительные черты, характерные для ультрамедленного раскрытия. Формирование дна ЕБ происходило в несколько стадий на фоне инверсий геомагнитного поля, начиная с позднего палеоцена – раннего эоцена до настоящего времени. Существенное влияние на характер раскрытия бассейна оказывало взаимное перемещение литосферных плит в Северной Атлантике и прилегающих арктических бассейнах.

Обзор и анализ результатов предшествующих исследований показал, что, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в последние годы в изучении геолого-геофизических характеристик исследуемого региона, оставался ряд основных нерешенных проблем, имеющих существенное значение при определении его строения и эволюции, а именно:

- отсутствовала надежная сводная цифровая карта графиков АМП на всю исследуемую акваторию, включающая в себя результаты высокоточных российских и зарубежных аэромагнитных съемок 1990–2000-х гг. (последняя российская аналоговая сводная карта была создана еще А.М. Карасиком около 30 лет назад и не опубликована);

- отсутствовала сводная цифровая карта идентифицированных осей линейных магнитных аномалий (ЛМА) – изохрон возраста океанического



**Рис. 1.** Аэромагнитная изученность глубоководного Евразийского бассейна (ЕБ)

1, 2 – маршруты аэромагнитных съемок (АМС): 1 – российских; 2 – американских; 3 – область современных американских АМС (1998–1999 гг.); 4 – область аномального магнитного поля, представленная международным гридом [44]; 5 – граница области исследования

дна (подобной карты для всего бассейна в начале работы не было, а для западной его половины она была опубликована лишь по западным съемкам в 2003 г. [16]);

– существующие схемы эволюции ЕБ на значительной части акватории (особенно в центральной и восточной) были слишком схематичными как ввиду недостатка аэромагнитных данных, так и из-за отсутствия компьютерных средств их оцифровки, обработки и геоисторического анализа;

– не была ясна природа плато Ермак и поднятия Моррис Джесуп, поэтому история их формирования оставалась дискуссионной;

– время и конфигурация первичного откола хребта Ломоносова от Евразийского шельфа были определены достаточно приблизительно, в частности, было неясно, почему конфигурации хребта и шельфа заметно отличаются;

– оставались не решенными вопросы причин изменчивости кинематических параметров раскрытия бассейна;

– не были полностью решены проблемы, связанные с характером взаимодействия литосферных плит в ЕБ и в прилегающих арктических бассейнах в процессе их эволюции.

В рамках настоящего исследования проведена попытка решения этих проблем.

**Краткие сведения о методике геоисторического анализа.** Основой для геоисторического анализа послужила новая сводная цифровая карта графиков АМП Евразийского бассейна, созданная в рамках данного исследования. Этот анализ, выполненный с использованием оригинального программного обеспечения, разработанного С.А. Меркурьевым [13], включал: построение модели магнитоактивного слоя, расчет модельного поля и его сопоставление с наблюдаемым, выделение магнитных изохрон и их оцифровку, расчеты угловых и линейных скоростей раскрытия бассейна, расчет полюсов вращения и линий дрейфа Северо-Американской и Евразийской плит.

**Идентификация линейных магнитных аномалий.** Идентификация магнитных аномалий осуществлялась вдоль каждого отдельно взятого профиля. Модели магнитоактивного слоя и расчет АМП от модели строились в предположении хрупкого раскола литосферы у постоянной оси спрединга и представляли собой горизонтальный пласт (рис. 2), состоящий из системы вертикальных призм, намагниченных в древнем геомагнитном поле и меняющем полярность в соответствии с выбранной шкалой инверсий [19]. Кроме этого в программе [13] была предусмотрена процедура сглаживания модельного поля по методике Тиссо-Патриа [38]. Это сглаживание позволяет учитывать наличие зоны переходной намагниченности между блоками прямой и обратной полярности, что особенно важно при моделировании магнитоактивного слоя, сформированного при медленных скоростях спрединга.

При оцифровке осей ЛМА за ось спрединговой аномалии принимался тот ее участок (точка максимального градиента), который соответствовал границе инверсионного блока модели. Каждая аномалия на профиле была проидентифицирована независимо от остальных. В то же время проводилось сопоставление результатов оцифровки и идентификации всех аномалий на каждом из профилей с соседними. В случае отсутствия корреляции в прослеживании одноименных осей ЛМА на соседних маршрутах производилась проверка и корректировка результатов идентификации по одиночным профилям. При оцифровке осевой аномалии учитывались также батиметрические данные, извлеченные из международного грида ИВСаО [30] и цифровой версии российской карты рельефа дна СЛО [14].

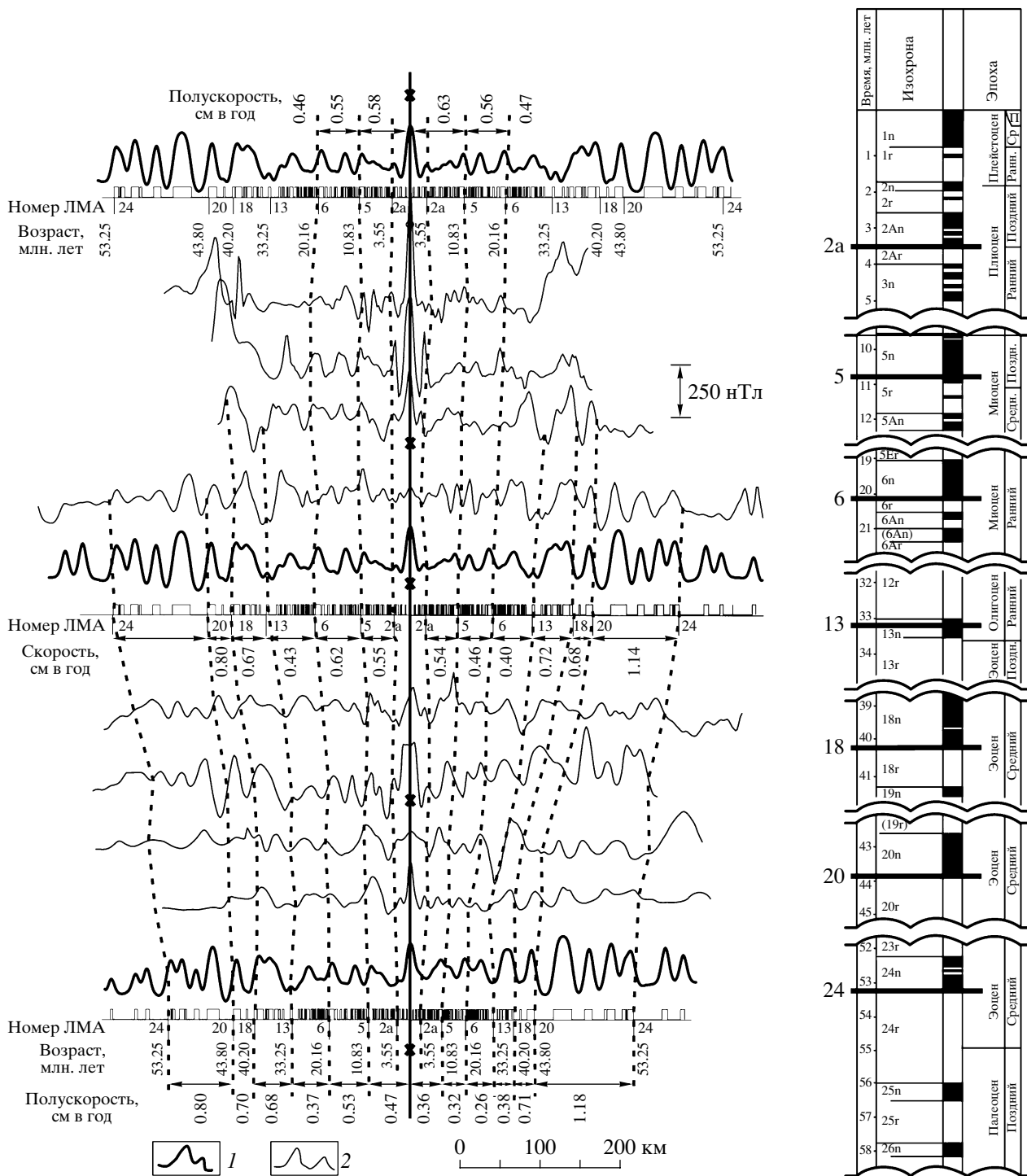
Работы по трассировке и определению возраста ЛМА были начаты с западной части ЕБ по двум причинам. Во-первых, благодаря исследованиям, проведенным американскими геофизиками [17], эта часть бассейна оказалась покрытой наиболее густой сетью магнитных профилей. Российских аэромагнитных данных здесь накоплено

значительно меньше. После взаимной увязки старых российских и зарубежных данных, проведенной нами с использованием высокоточной американской информации, достоверность и детальность карты АМП западной части ЕБ оказались более высокими чем в центральной и восточной [3, 26]. Во-вторых, сравнение карты магнитных изохрон, опубликованной зарубежными исследователями [16], с аналогичной картой, построенной независимо в рамках данной работы, подтвердило достоверность проведенной здесь идентификации ЛМА. Обе карты в генеральном плане оказались аналогичными.

В результате проведенной идентификации в западной части ЕБ были прослежены в деталях практически все ключевые ЛМА кайнозойской последовательности, начиная с 24-ой. Тем не менее, к наиболее достоверным из них, найденным также и в восточной половине бассейна, были отнесены лишь – 2а, 5, 6, 13, 18, 20 и 24 (рис. 3). При трассировке аномалий 21, 22 и 23 были встречены проблемы (см. ниже). Работа по их идентификации проводится с использованием более сложных моделей, учитывающих перескоки оси раскрытия.

Трассировка магнитных аномалий в восточной части ЕБ была затруднена. Основными причинами этого явились: слабая изученность значительной части глубоководных котловин Нансена и Амундсена, сопровождаемая, к тому же, низкой точностью плановой привязки и близостью полюса раскрытия бассейна. При приближении к полюсу раскрытия разновозрастные аномалии сливаются воедино и в условиях нестационарного ультрамедленного спрединга, особенно происходящего в период частых инверсий магнитного поля, могут существенно отличаться по форме от аномалий, вычисленных по упрощенным моделям.

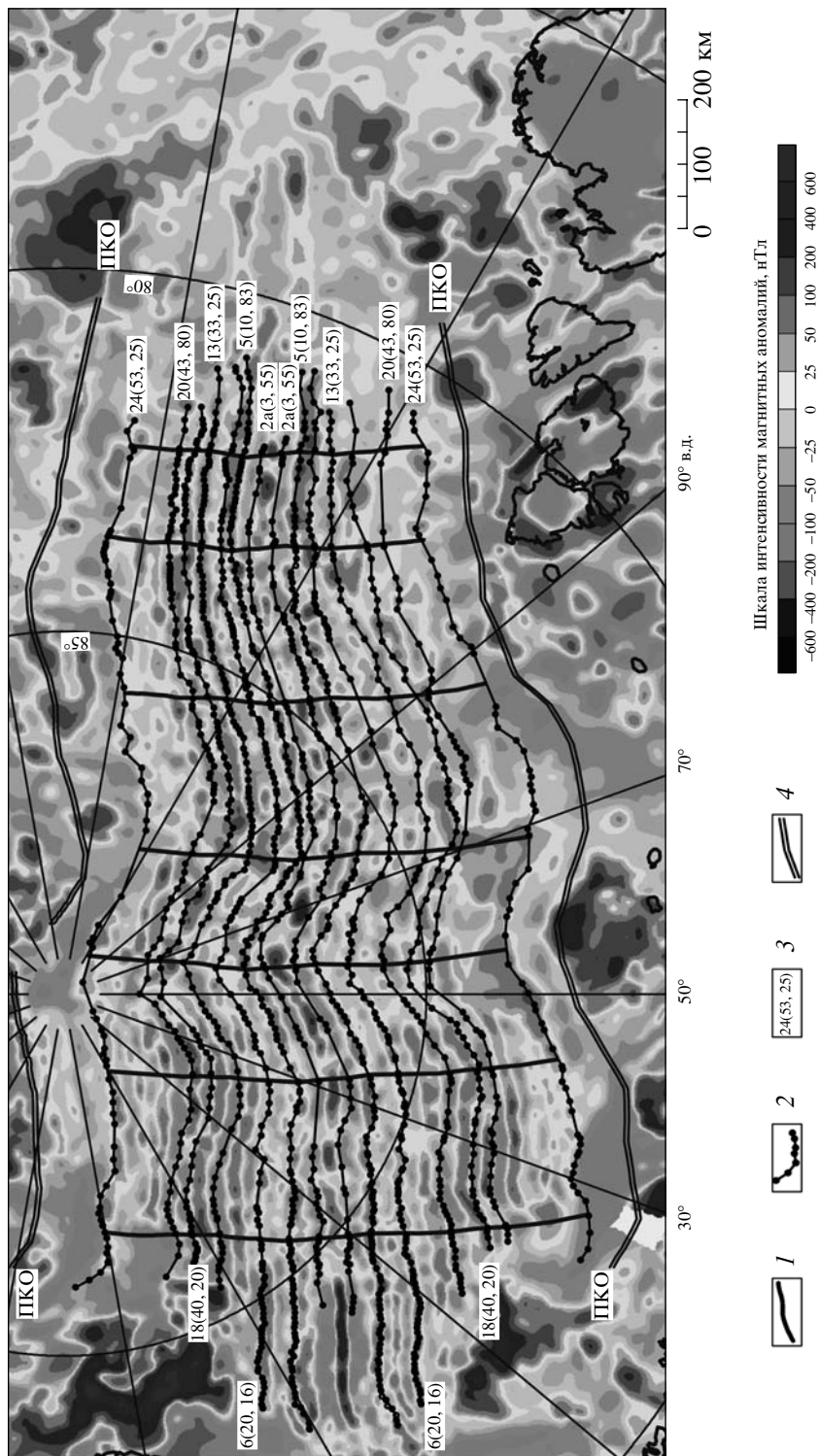
Все перечисленные трудности, связанные с идентификацией ЛМА в восточной части ЕБ, были очевидны исполнителям работы еще до начала исследований. Именно поэтому итоги геоисторического анализа в западной половине бассейна были использованы в качестве дополнительной информации для облегчения прослеживания магнитных изохрон в его восточной половине, в первую очередь там, где расстояния между профилями особенно значительны. А именно, на первом этапе идентификации была построена схема теоретических осей ЛМА восточной половины исследуемого региона. Для этого осевая магнитная аномалия, соответствующая в плане оси современного хребта Гаккеля, была оцифрована. В дальнейшем она поворачивалась относительно полюса вращения в обе стороны (к востоку и к западу от хребта Гаккеля) до совпадения с осями ключевых магнитных аномалий в западной



**Рис. 2.** Пример идентификации осей линейных магнитных аномалий (ЛМА)  
 1 – модельное поле, 2 – наблюдаемое поле  
 Номера аномалий соответствуют кайнозойской последовательности (2а–24)  
 Возраст дан в млн. лет, в соответствии с магнитохронологической шкалой [19], представленной в правой части рисунка

половине ЕБ. При вращении использовались данные о полюсах раскрытия (рис. 4) и углах поворота, рассчитанные для этих аномалий все в той же западной части исследуемого региона (см. ниже).

Оказалось, что полученная в результате проведенных манипуляций схема теоретических осей ЛМА в восточной части ЕБ в генеральном плане достаточно хорошо соответствует реальной схе-



**Рис. 3.** Схема осей линейных магнитных аномалий (магнитных изохрон) 1 – линии дрейфа плит, 2 – оси идентифицированных аномалий (точками показано их положение на профилях), 3 – номер и возраст аномалии (в млн. лет) в соответствии с магнитохронологической шкалой [19], 4 – граница перехода континент–океан, определенная по гравиметрическим данным

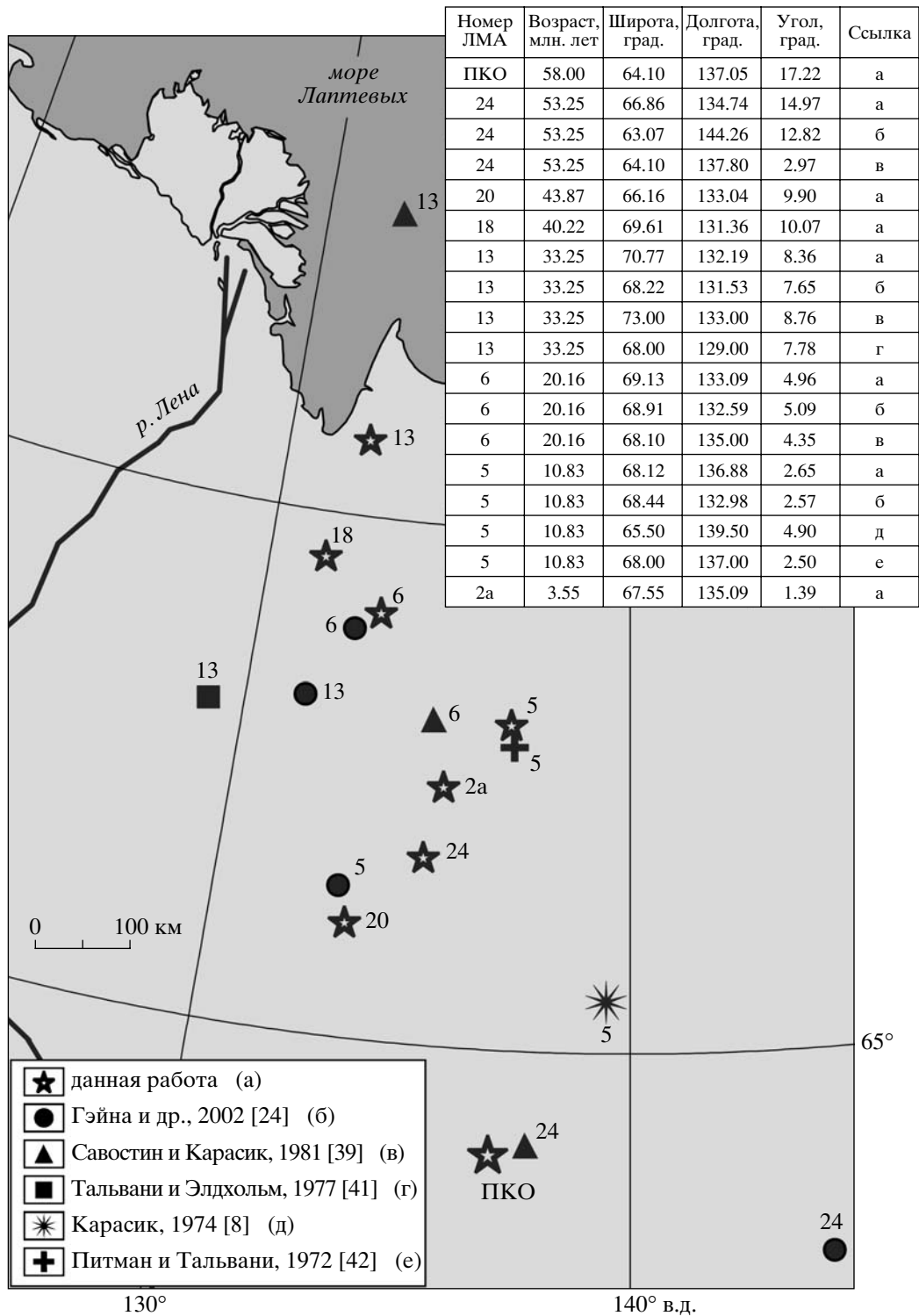


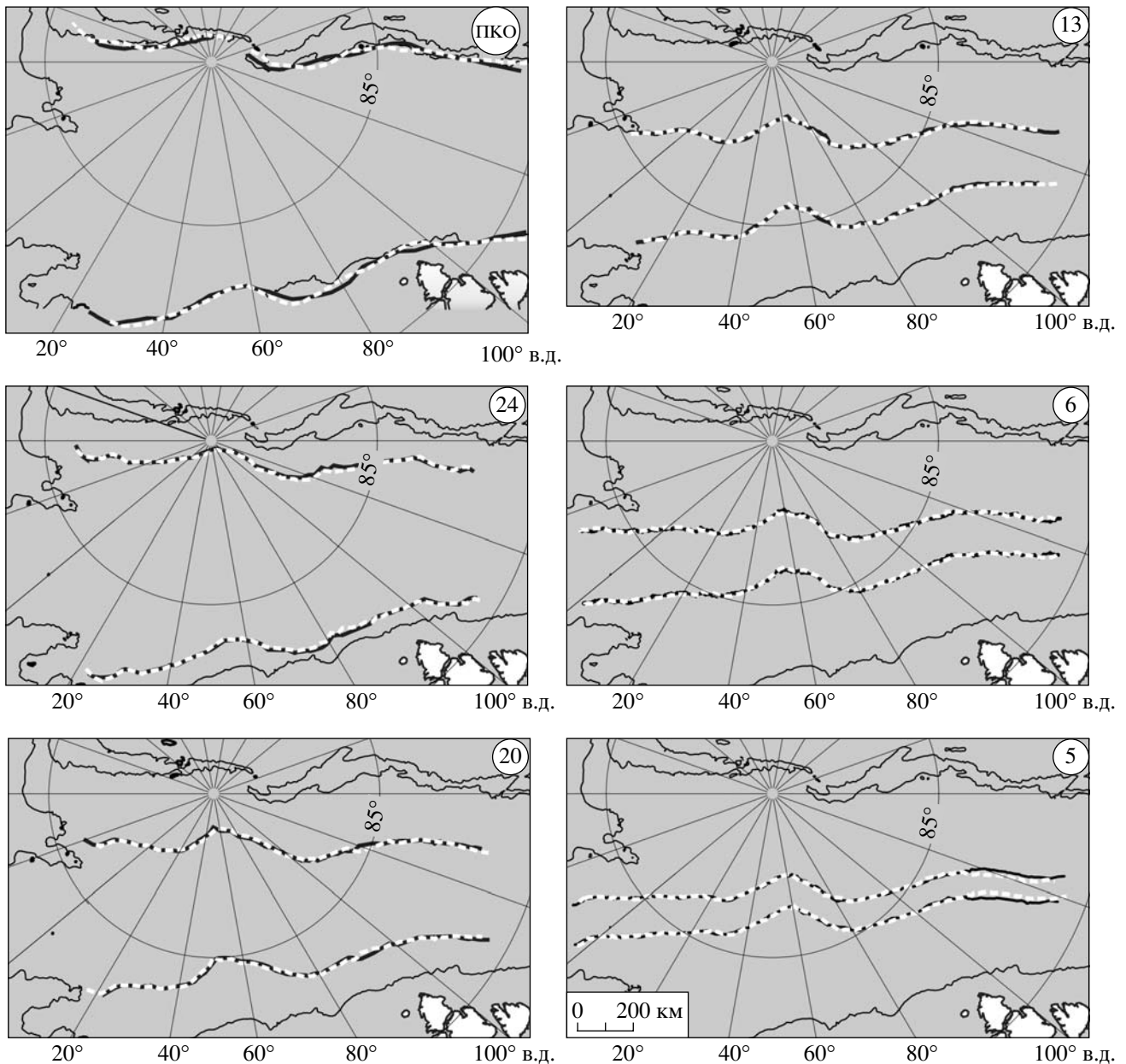
Рис. 4. Конечные полюса вращения Северо-Американской и Евразийской плит

ме изохрон, построенной по результатам попрофильной идентификации (см. рис. 3).

**Вычисление кинематических параметров раскрытия и палеореконструкции бассейна.** Существует несколько методов определения полюсов отно-

сительного движения двух плит [6, 18, 35, 36, 38], использующих различные виды данных. В нашем случае нахождение параметров относительного движения Северо-Американской и Евразийской литосферных плит осуществлялось с использовани-





**Рис. 5.** Результаты сопоставления осей ЛМА (магнитных изохрон) и ПКО в котловинах Нансена и Амундсена. Сплошными линиями показаны изохроны, идентифицированные по обе стороны от хребта Гаккеля; пунктиром показано положение изохрон, повернутых относительно соответствующего полюса вращения, до совпадения с одновозрастными изохронами на противоположной стороне от хребта Гаккеля. Показаны также изобата 1600 м и номера ЛМА.

ем оригинального программного обеспечения [13], путем совмещения достоверно выделенных осей одновозрастных линейных магнитных аномалий, расположенных по обе стороны от оси хребта Гаккеля. Процесс вычислений полюсов вращений и скоростей раскрытия Евразийского бассейна носил итерационный характер и был основан на минимизации функционала, представляющего собой разность между теоретически рассчитанной и эмпирически измеренной скоростями спрединга. В качестве окончательного полюса выби-

рался тот, при котором достигалось наилучшее совмещение этих осей (рис. 5). Линейные скорости спрединга (рис. 6) на разных этапах формирования ЕБ оценивались путем деления расстояния между сопряженными точками, расположенными на парных изохронах на возраст этих изохрон.

Границы первичного раскола Евразийской и Северо-Американской плит, соответствующие зонам перехода континент–океан (ПКО) по обе стороны от хребта Гаккеля, в магнитном поле не об-



наруживаются. В связи с этим в рамках данного исследования они были выявлены по гравиметрическим данным Международного Арктического гравиметрического проекта [http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/agp/index.html], а именно, по максимальным значениям градиента аномалий Буге, прослеженным вдоль бровки Евразийского шельфа и западного склона хребта Ломоносова. Конечный полюс вращения для границ ПКО рассчитывался так же как для магнитных изохрон.

На основании полученных полюсов вращения Евразийской и Северо-Американской плит были построены линии дрейфа, соединяющие сопряженные точки, расположенные по обе стороны относительно современной оси хребта Гаккеля (см. рис. 3). Углы поворота для левого и правого флангов хребта подбирались независимо [13].

Вдоль линий дрейфа сопряженных точек, расположенных на парных изохронах, была измерена разность их удаления от центра спрединга. Эта разность явилась общей оценкой степени асимметричности спрединга [29, 37]. Она была названа “генеральной асимметрией спрединга” и измерялась в километрах. Помимо этого измерялись расстояния между соседними изохронами по каждую сторону от оси хребта. Полученные величины позволили оценить разницу в приросте коры в котловинах Нансена и Амундсена на отдельных этапах их формирования, названную “стадийной асимметрией спрединга” (рис. 7).

Перечисленные выше операции позволили установить возрастные и кинематические характеристики разрастания океанического дна, отпечатавшиеся в магнитном поле. Таким образом, был получен набор данных, необходимых для построения схем эволюции ЕБ. Последовательное закрытие бассейна осуществлялось путем совмещения парных магнитных изохрон, начиная со 2-ой а (с возрастом 3.5 млн. лет) по 24-ую (53 млн. лет) [19], а также границ ПКО, расположенных по разные стороны от хребта Гаккеля. Помимо относительного движения Евразийской и Северо-Американской плит, анализировались особенности структуры современных потенциальных полей и рельефа дна, реконструированных на дивергентной границе в ключевые моменты эволюции исследуемой акватории.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Схема магнитных изохрон.** Итоговая схема магнитных изохрон представлена на рис. 3. В качестве подложки использована карта магнитных аномалий, созданная в рамках настоящего исследования. В магнитном поле региона отчетливо

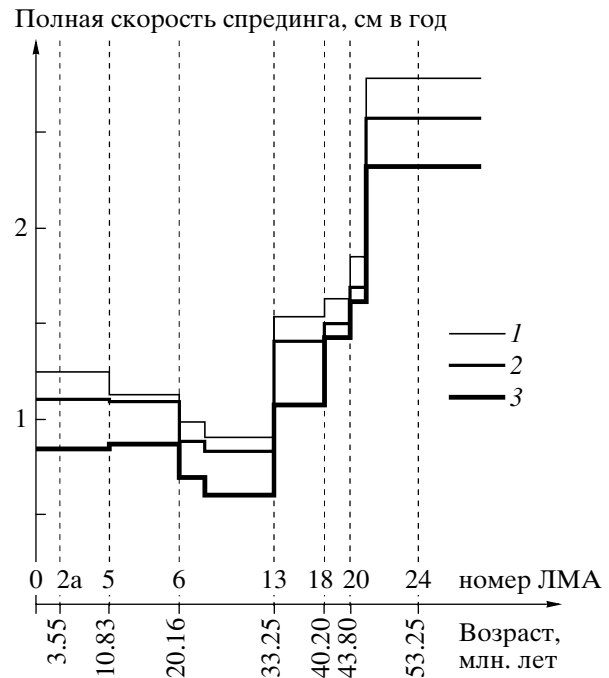


Рис. 6. Графики изменения средней полной скорости спрединга в западной (1), центральной (2) и восточной (3) части ЕБ

выделяются хребет Гаккеля и прилегающие к нему глубоководные котловины Нансена и Амундсена, хребет Ломоносова, а также плато Ермак и поднятие Моррис Джесуп, расположенные соответственно к северо-западу от архипелага Шпицберген и к северу от Гренландии.

Основные магнитные изохроны с возрастными от 3.5 до 53 млн. лет (аномалии 2а, 5, 6, 13, 18, 20 и 24) четко прослеживаются на всю длину бассейна, вплоть до широты 81° с.ш. Облик аномалий 21, 22 и 23, возникших в период времени около 53–44 млн. лет назад, заметно меняется вдоль хребта Гаккеля. В западной части акватории, ограниченной резким изгибом хребта (у 60° в.д.), они местами прослеживаются очень отчетливо в обеих глубоководных котловинах (Нансена и Амундсена), местами одна из них теряется или, наоборот, раздваивается в одной из котловин. При продвижении к востоку аномалии 21–23 начинают сливаться в длиннопериодные, отличающиеся от модельных. Еще дальше к востоку (двигаясь в сторону моря Лаптевых) они все более теряют облик обособленных спрединговых аномалий. Особенно ярко эта тенденция проявляется в котловине Нансена. В котловине Амундсена эти аномалии все же фрагментарно прослеживаются. Возможные причины отличия облика наблюдаемых аномалий 21–23 от модельных обсуждаются ниже.

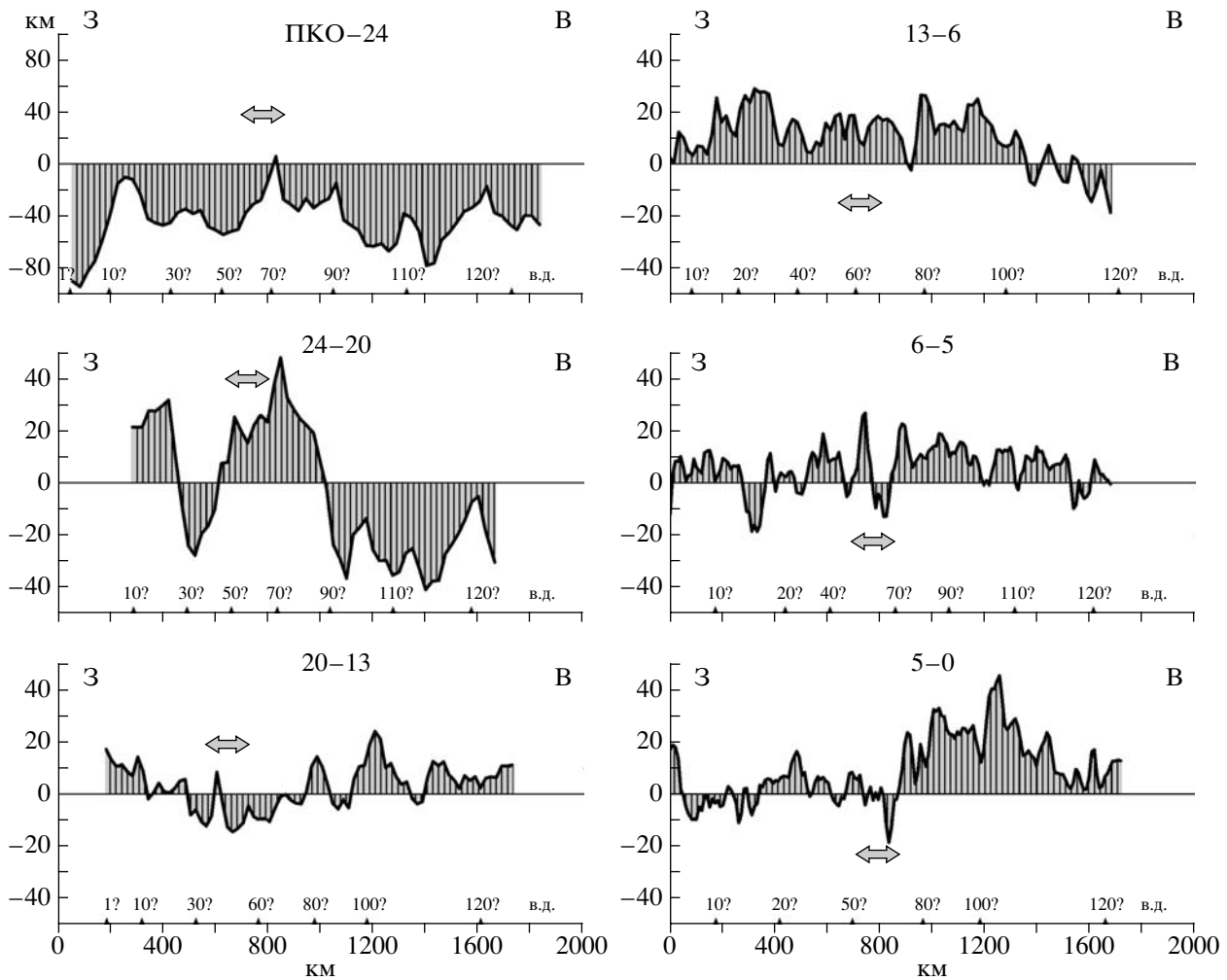


Рис. 7. Асимметрия спрединга вдоль оси раскрытия ЕВ на разных стадиях эволюции в км. Стрелками показана область наиболее значительного изгиба оси спрединга

#### КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАСКРЫТИЯ БАСЕЙНА

**Конечные полюса вращения.** Положение опубликованных и определенных в рамках данного исследования конечных полюсов вращения показано на рис. 4.

Координаты полюса вращения для аномалии 2а с возрастом около 3.5 млн. лет определены с наибольшей погрешностью. Точность определения его Эйлеровой широты существенно ниже, чем более древних полюсов, что связано с чрезвычайно близким расположением изохрон. В то же время, достоверность его оценки косвенно подтверждается сейсмологическими данными [1, 2]. В соответствии с ними современный полюс раскрытия ЕВ расположен на широте 67–68° с.ш. (то есть близко к полюсу, определенному нами, для аномалии 2а).

Полюс вращения для аномалий 5, возникших около 10.83 млн. лет назад, практически точно совпал с полюсом, определенным В. Питманом и М. Тальвани для Северной Атлантики [39]. В то же время, он расположен значительно севернее полюса, рассчитанного А.М. Карасиком по результатам старых съемок, проведенных в ЕВ до 1974 г. [8] и, естественно, не обеспеченного достаточным количеством достоверных аэромагнитных данных.

Положение вычисленных нами полюсов для аномалий 5 и 2а отличается весьма незначительно, что может свидетельствовать об отсутствии перестроек в движениях Северо-Американской и Евразийской плит в период времени между 11 и 3.5 млн. лет назад.

Полюс вращения, определенный по аномалиям 6 (20 млн. лет), точно совпал с одновозрастным, рассчитанным Гейна с коллегами [24], и, подобно полюсу от аномалий 5, расположен к северу

по отношению к определенному ранее Л.А. Савостиным и А.М. Карасиком [41] без учета современных магнитометрических данных.

Оси аномалий 13 (33, 25 млн. лет) в ЕБ прослеживаются и поддаются совмещению лучше других. Несмотря на это, положения конечных полюсов вращения, полученные разными исследователями по этим магнитным аномалиям в Северной Атлантике, Норвежском море, а также в СЛО [8, 24, 42], имеют довольно значительный разброс по широте (см. рис. 4). В то же время все ранее и вновь рассчитанные полюса лежат примерно на одном и том же Эйлеровом меридиане. Выявленные закономерности указывают на то, что период времени 34–33 млн. лет назад был переломным в относительном перемещении плит.

Опубликованных ранее данных по полюсам вращения для аномалий 18 и 20 нами не обнаружено. Их взаимное расположение (в противоположные стороны по отношению к полюсу от аномалий 24) свидетельствует о нестабильности спрединга в период времени 53–40 млн. лет назад.

Полюс конечного вращения, полученный по совмещению аномалий 24 в ЕБ, заметно отличается от полюсов, рассчитанных для Норвежского моря и Северной Атлантики (см. рис. 4). Эти отличия свидетельствуют о том, что геометрия раскрытия ЕБ не может быть объяснена движением только Северо-Американской и Евразийской плит. Необходимо учитывать относительное перемещение Гренландской плиты, происходившее за счет раскрытия хребтов Рейкъянес в Северной Атлантике и Ран в Лабрадорском море, расположенных к северу от разломной зоны Чарли-Гиббс.

Полюс начального раскола плит в ЕБ был определен А.М. Карасиком и Л.А. Савостиным с коллегами [11, 15], путем совмещения батиметрических контуров бровки Евразийского шельфа и хребта Ломоносова. Полученные оценки представляются очень приблизительными. Несомненно, что в ходе эволюции бассейна, длившейся более 53 млн. лет, батиметрические очертания бровки Евразийского шельфа сильно изменились ввиду эрозионных процессов и мощного осадконакопления, в то время как конфигурация хребта Ломоносова изменилась менее значительно. В данной работе этот полюс рассчитывался с использованием предполагаемой границы начального раскола плит, определенной по гравиметрическим данным. Он расположен южнее всех остальных и совпадает с полюсом, рассчитанным Л.А. Савостиным и А.М. Карасиком [41] (см. таблицу к рис. 4) для аномалий 24. Следует отметить, что и наша оценка является приблизительной. Граница ПКО, определенная по гравиметрическим данным, может в деталях не соответствовать реальной гра-

нице раскола плит. Возникновению последней могут предшествовать растяжение и деструкция континентальной коры, образование террас, перескоки первично сформированной рифтовой зоны. На конфигурацию модельной границы влияют также параметры модели для расчета аномалий Буге и т.д.

Анализ взаимного расположения всех рассмотренных выше конечных полюсов раскрытия (см. рис. 4) позволяет сделать ряд выводов:

1. Все вновь рассчитанные полюсы расположены примерно вдоль одной линии, совпадающей с генеральным простиранием хребта Гаккеля, что свидетельствует об отсутствии значительных перестроек в латеральном (субширотном) движении плит в исследуемом бассейне;

2. Видимые различия в положении полюсов, рассчитанных по аномалиям с 24 по 13 в ЕБ, Северной Атлантике и Норвежском море, скорее всего связаны с перемещением Гренландии к северу (вдоль простирания современного хребта Гаккеля);

3. Разброс в полюсах вращения для аномалий 24, 20 и 18, а также трудности в прослеживании аномалий 21–23 могут свидетельствовать о нестабильном характере спрединга на начальном этапе раскрытия ЕБ, предположительно связанным с перескоками оси разрастания;

4. Положение полюсов, рассчитанных по аномалиям с 13 по 2А в ЕБ, Северной Атлантике и Норвежском море, подтверждает, что время формирования аномалии 13 стало переломным в движениях плит, ограничивающих ЕБ. Начиная с этого времени, геометрия раскрытия Арктического бассейна определялась движением всего двух плит. При этом полюс вращения постепенно смещался в южном направлении (в глубь Евразийского континента), что, по-видимому, свидетельствует о продвижении оси раскрытия.

**Скорости спрединга.** Характер изменения скорости раскрытия ЕБ, при постоянном уменьшении их абсолютных значений при приближении к полюсу (с запада на восток), в генеральном плане остается одинаковым на всем протяжении хребта Гаккеля (см. рис. 6). На начальном этапе раскрытия бассейна в раннем и среднем эоцене, около 53–44 млн. лет назад (во время аномалий 24–20) полные скорости спрединга были относительно высокими и составляли 2.2–2.7 см/год. В дальнейшем они довольно резко уменьшались и в олигоцене – начале миоцена (во время аномалий 13–6) достигли минимальных значений 0.5–0.9 см/год. И, наконец, в период с 20 млн. лет назад (время аномалии 6) по настоящее время скорости незначительно возросли, достигнув значений 0.7–1.2 см/год.

Следует отметить, что установленные закономерности в стадийности и изменении темпов раскрытия ЕБ хорошо согласуются с аналогичными параметрами спрединга на хребте Рейкьянес и в Лабрадорском море [4, 27].

**Асимметрия спрединга.** Анализ разницы в скоростях раскрытия по разные стороны от хребта Гаккеля на всем его протяжении, от Гренландии вплоть до шельфа моря Лаптевых, позволил выявить области асимметричной аккреции коры и возможных перескоков оси разрастания в ЕБ.

Графики стадийной асимметрии спрединга представлены на рис. 7. Извилистый характер графиков может быть связан не только с реальными особенностями раскрытия ЕБ, но и с погрешностями плановой привязки магнитных аномалий, а также их идентификации, за счет значительного упрощения при моделировании реальных процессов прироста земной коры. Тем не менее, выявляются следующие основные закономерности в изменениях асимметрии спрединга во времени и пространстве:

1. Характер асимметрии на ранних и поздних этапах формирования ЕБ генеральным образом отличается. Асимметрия раскрытия дна бассейна в период, предшествующий формированию аномалии 24, имеет отрицательный знак. Это означает, что ось этой аномалии в котловине Амундсена находится на большем удалении от границы ПКО, чем в котловине Нансена. Исключение составляет область резкого изменения простирания хребта Гаккеля на долготе около  $70^\circ$  в.д., где асимметрия отсутствует. Иными словами, на этапе первичного растяжения континентальной и начала формирования океанической коры, прирост морского дна в котловине Амундсена был больше чем в котловине Нансена, в среднем на 40 км;

2. В последующий период времени около 53–44 млн. лет назад (аномалии 24–20) характер асимметрии спрединга существенно изменился. В восточной половине ЕБ, восточнее  $90^\circ$  в.д. (рис. 7), она сохранила отрицательный знак, но вдвое уменьшилась по амплитуде. В западной половине асимметрия дважды меняет знак;

3. Основной отличительной особенностью асимметрии спрединга на более поздних этапах раскрытия ЕБ является резкое падение ее величины. В период формирования аномалий с 20 по 13 она при движении вдоль оси хребта Гаккеля попеременно меняет знак с положительного на отрицательный. В дальнейшем, вплоть до настоящего времени, она преимущественно положительна.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать ряд выводов о возможных причинах выявленных различий в положении магнитных изохрон по разные стороны от хребта Гаккеля.

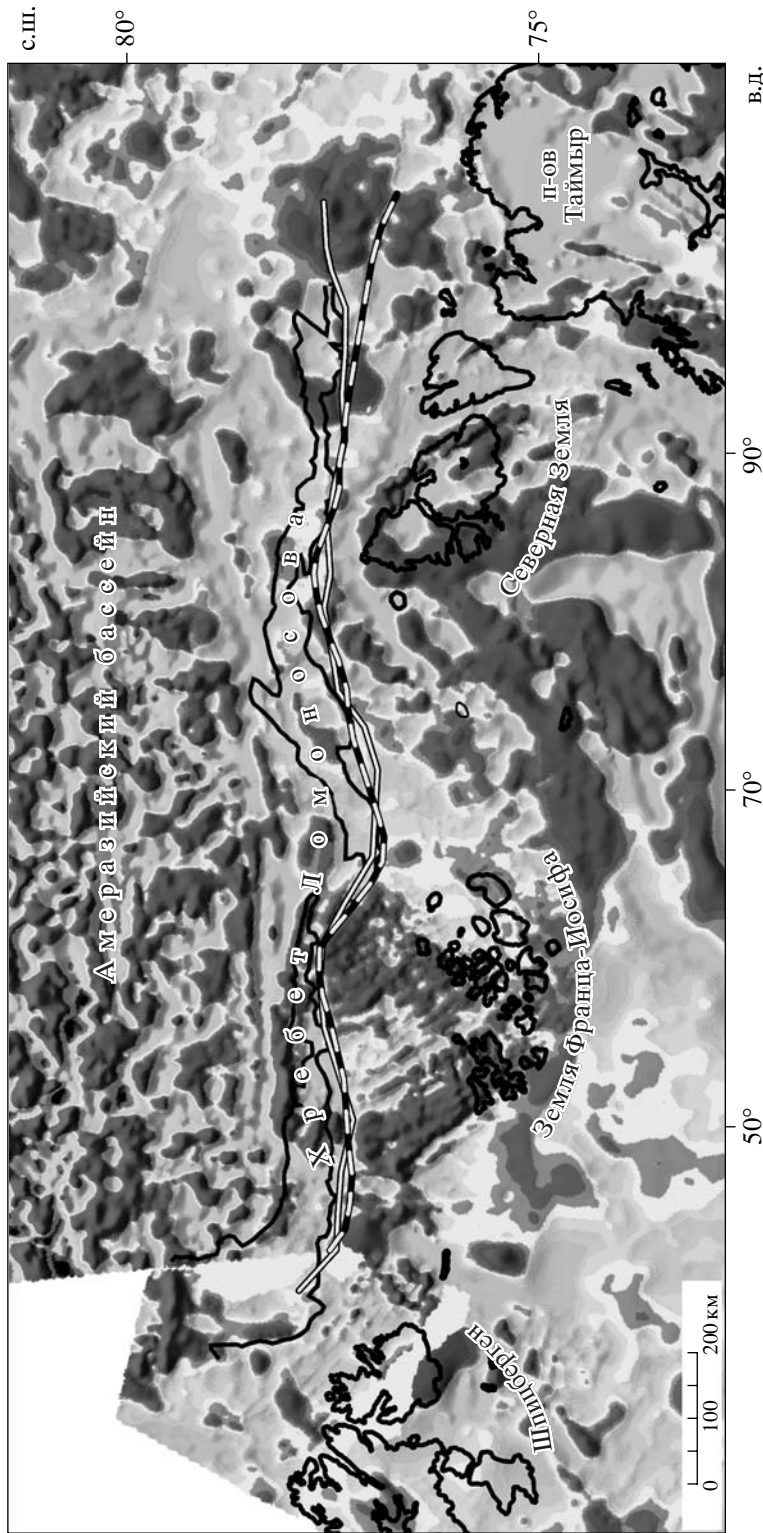
Помимо возможных генеральных различий в скорости перемещения плит, причиной асимметричного расположения ПКО и осей наиболее древних ЛМА по разные стороны от хребта Гаккеля могут являться периодические перескоки оси раскрытия.

Один из наиболее древних перескоков центра спрединга в период времени, предшествующий формированию аномалии 24 в сторону Евразийской окраины, по-видимому, произошел в западной половине котловины Амундсена. Зарубежные исследователи зафиксировали здесь сдвоенную аномалию 25 с возрастом около 56 млн. лет, расположенную между хребтом Ломоносова и аномалией 24 и, в то же время, отсутствующую в котловине Нансена [16]. Нам эту аномалию выделить не удалось из-за недостатка собственных аэромагнитных данных, но, тем не менее, полученные результаты учтены при интерпретации.

Резкие колебания кривой асимметрии относительно нулевой линии в период формирования аномалий 24–20 (см. рис. 7) также, по-видимому, связаны с перескоками сегментов оси раскрытия, но уже в сторону хребта Ломоносова. Именно эти перескоки привели к сложностям в идентификации аномалий 23–21. При использовании симметричной модели разрастания океанического дна количество аномалий, обнаруживаемых здесь в котловине Нансена, больше, чем в котловине Амундсена.

Идентификация мелких перескоков в восточной половине ЕБ и, особенно в котловине Нансена, оказалась затрудненной по двум причинам. Первая из них связана с тем, что при медленных и ультрамедленных скоростях раскрытия океанического дна, происходящего на фоне частых инверсий магнитного поля, аномалии от противоположно намагниченных даек сливаются воедино и становятся нераспознаваемыми. Вторая причина связана с экранирующим влиянием осадочного чехла. Средняя мощность осадков в восточной половине котловины Нансена составляет около 2–3 км, а в некоторых областях (к северу от прогиба Святой Анны) достигает 6–8 км [28]. Эти осадки поступают с шельфа Баренцева моря и с прилегающих островов. Они могут содержать в своем составе магнитные минералы и обломки горных пород, которые не только экранируют магнитные аномалии от фундамента, но и приводят к кардинальному изменению формы этих аномалий по сравнению с аномалиями, рассчитанными при моделировании.

**Палеорекострукции Евразийского бассейна.** Последовательное закрытие бассейна осуществлялось путем совмещения парных изохрон (см. рис. 3), расположенных по разные стороны от



**Рис. 8.** Сопоставление современных магнитометрических данных по разные стороны от первичной линии раскола ЕБ. Показаны границы зоны ПКО, выявленные по гравиметрическим данным соответственно вдоль бровки Евразийского шельфа (сплошная белая линия) и западного склона хребта Ломоносова (пунктирная линия)

хребта Гаккеля с использованием полюсов и углов вращения Евразийской и Северо-Американской плит (рис. 4). Сопоставление магнитных и гравитационных аномалий, а также рельефа дна по разные стороны от дивергентной границы этих плит на разных этапах раскрытия ЕБ позволило выявить ряд интересных закономерностей.

Применительно к магнитному полю наиболее интересны результаты его сопоставления на границе ПКО (рис. 8). В западной части границы раскола плит, к северу и северо-западу от Земли Франца Иосифа (ЗФИ), структура аномального магнитного поля кардинально отличается. На остальном протяжении этой границы магнитные аномалии Евразийского шельфа переходят на хребет Ломоносова без каких-либо смещений и искажений. Причины выявленных различий в магнитном поле к северу от ЗФИ требуют дальнейшего детального анализа. Наиболее вероятной из них, по-видимому, является изначально различное строение коры по разные стороны от ПКО. Если это так, то логично предположить, что линия первичного раскола плит в ЕБ унаследовала древнюю ослабленную или шовную зону, расположенную на стыке современного шельфа ЗФИ и хребта Ломоносова, и в дальнейшем продвинулась к востоку, разорвав однородную по строению континентальную кору. Первоначальная структура АМП к северу от ЗФИ могла также измениться за счет более поздних тектонических и магматических процессов, в том числе, связанных с северным дрейфом Гренландии и вздыманием (априфтом) Баренцевоморского шельфа.

Постепенное расхождение границ ПКО в разные стороны при приближении к современному морю Лаптевых, по-видимому, связано с тем, что в период формирования ЕБ земная кора этого региона испытала существенное растяжение [20].

На рис. 9А и 9Б приведены результаты сопоставления современных гравиметрических [<http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/agp/index.html>] и батиметрических [30] данных на дивергентных границах Северо-Американской и Евразийской плит с возрастными 33 и 53 млн. лет (ЛМА 13 и 24). Изобата 1600 м дает представление о конфигурации внешних границ современного Евразийского шельфа, шельфа Гренландии и западного склона хребта Ломоносова.

Обращают на себя внимание следующие особенности гравитационного поля, рельефа дна, а также взаимного расположения хребта Ломоносова и бровки Евразийского шельфа при последовательном закрытии ЕБ:

1. Наиболее значительные отличия в структуре гравитационного поля по обе стороны от оси раскрытия наблюдаются в период аномалии 24

(см. рис. 9А), т.е. в момент наиболее близкий к начальному раскрытию бассейна. Отличия наиболее заметны в центральной части бассейна в районе изгиба оси раскрытия (вблизи современного желоба Святой Анны) и прослеживаются далее, вплоть до континентального шельфа моря Лаптевых. В этом же районе, в восточной части ЕБ, как уже отмечалось, существенно затруднена идентификация ЛМА;

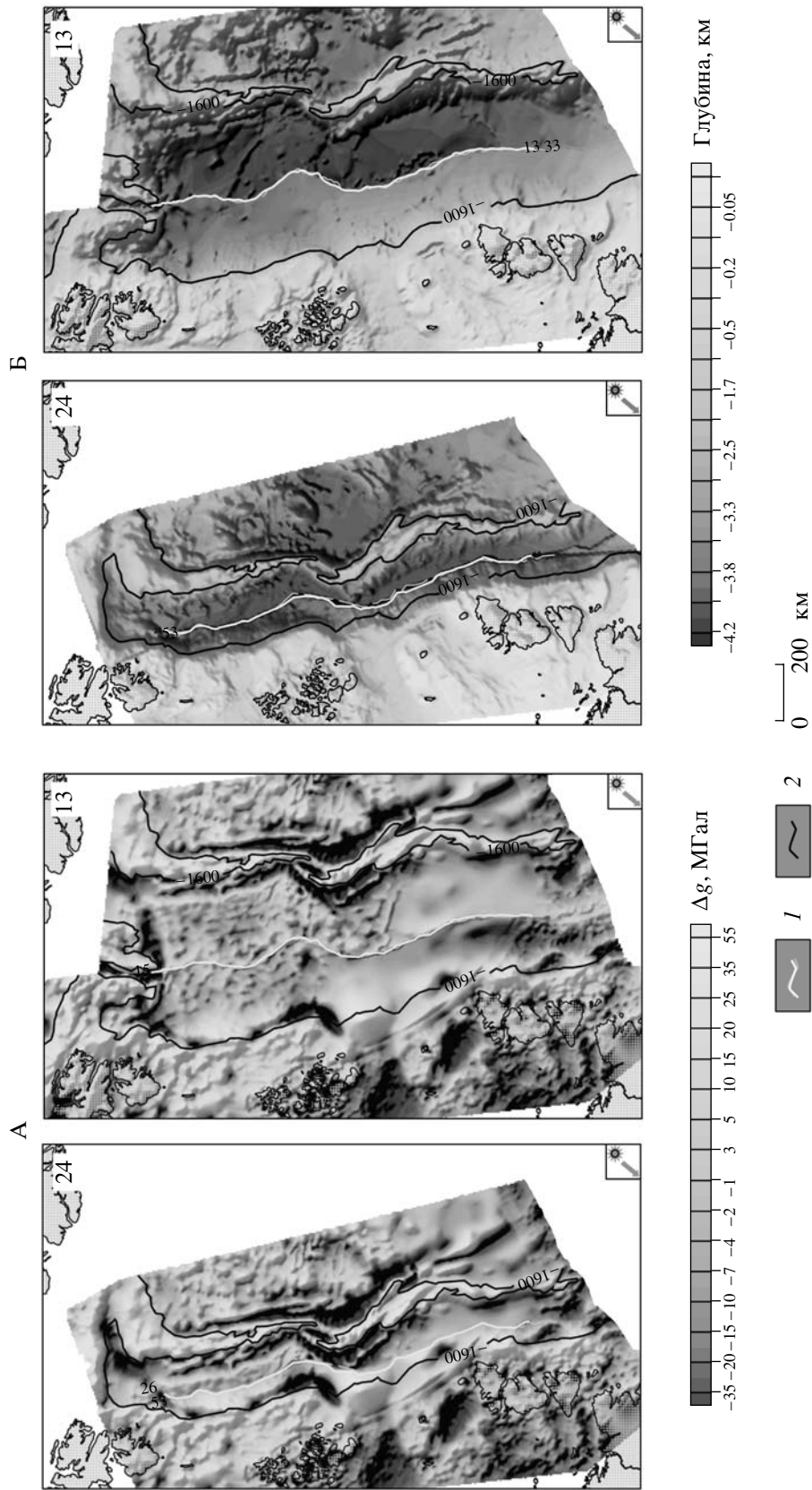
2. Глубины дна в котловине Нансена значительно меньше, чем в котловине Амундсена (см. рис. 9Б). Величина перепада глубин увеличивается при движении с запада на восток – от поднятий Моррис Джесуп и Ермак до шельфа моря Лаптевых. Особенно резко она нарастает, начиная с желоба Святой Анны. Причем тем больше, чем древнее ось раскрытия;

3. Батиметрические контуры хребта Ломоносова и Евразийского шельфа, а также древней оси раскрытия (аномалия 24) в генеральном плане соответствуют друг другу (см. рис. 9А, 9Б). Отличия наблюдаются на участке ЗФИ – море Лаптевых, где осадконакопление наиболее интенсивно.

Перечисленные выше закономерности свидетельствуют о значительно большей роли эрозивных процессов и осадконакопления в формировании современной структуры потенциальных полей и рельефа дна в котловине Нансена по сравнению с котловиной Амундсена. Именно эти процессы существенно изменили конфигурацию бровки Евразийского шельфа в восточной половине ЕБ, которая первоначально соответствовала очертаниям хребта Ломоносова. Мощные толщ осадков, накопившиеся у окраины котловины Нансена, явились причиной поднятия морского дна и изменений в структуре поля силы тяжести. Присутствие в осадках обломков магнитных пород – продуктов размыва траппового комплекса на ЗФИ, по-видимому, изменило и структуру АМП;

4. Появление в центральной части ЕБ батиметрических поднятий, окаймляющих современный хребет Гаккеля, отмечается со времени чуть ранее аномалии 13 (см. рис. 9Б). Как уже отмечалось, этот временной рубеж является пограничным между двумя основными этапами раскрытия бассейна, характеризующихся существенными изменениями в движениях плит, а, возможно, и в режимах аккреции коры;

5. Совмещение батиметрических контуров, ограничивающих поднятия Ермак и Моррис Джесуп относительно оси аномалии 13, показывает, что они смыкаются, образуя единое плато (см. рис. 9А, 9Б). При этом ось раскрытия упирается приблизительно в середину этого плато. При дальнейшем закрытии бассейна поднятие Моррис Джесуп полностью перекрывает плато Ермак, а



**Рис. 9.** Сопоставление современных гравиметрических (А) и батиметрических (Б) данных по разные стороны от хребта Гаккеля, путем совмещения однообразных ЛМА 13 и 24 в котловинах Нансена и Амундсена  
 1 – положение совмещенных магнитных изохрон; 2 – батиметрические очертания Евразийского шельфа и хребта Ломоносова (изобата 1600 м)



восточный (канадский) конец хребта Ломоносова также перекрывает эти структуры на ширину около 150–200 км. Этот вывод представляется чрезвычайно важным, он был учтен при построении схемы раскрытия бассейна;

6. Характерных для других типично океанических бассейнов протяженных гравитационных и магнитных аномалий, а также протяженных желобов ортогональных оси раскрытия на соответствующих картах не обнаруживается. Исключения составляют согласованные по местоположению интенсивные отрицательные аномалии  $\Delta g$  и ( $\Delta T$ )а, ограничивающие плато Ермак и поднятие Моррис-Джесуп;

7. Естественным продолжением котловины Амундсена в сторону острова Элсмир является долина, которая огибает батиметрическое поднятие, соответствующее западному окончанию хребта Ломоносова, и оканчивается седловиной, отделяющей ее от Амеразийского бассейна. Наиболее древние из прослеженных нами магнитных изохрон с 24-ой по 18-ю, вблизи поднятия Моррис Джесуп, изгибаются и также огибают окончание хребта Ломоносова (см. рис. 3).

Перечисленные в последних четырех пунктах особенности будут далее рассмотрены в сопоставлении с новейшими из опубликованных зарубежных данных, посвященных той же проблеме – истории формирования ЕБ.

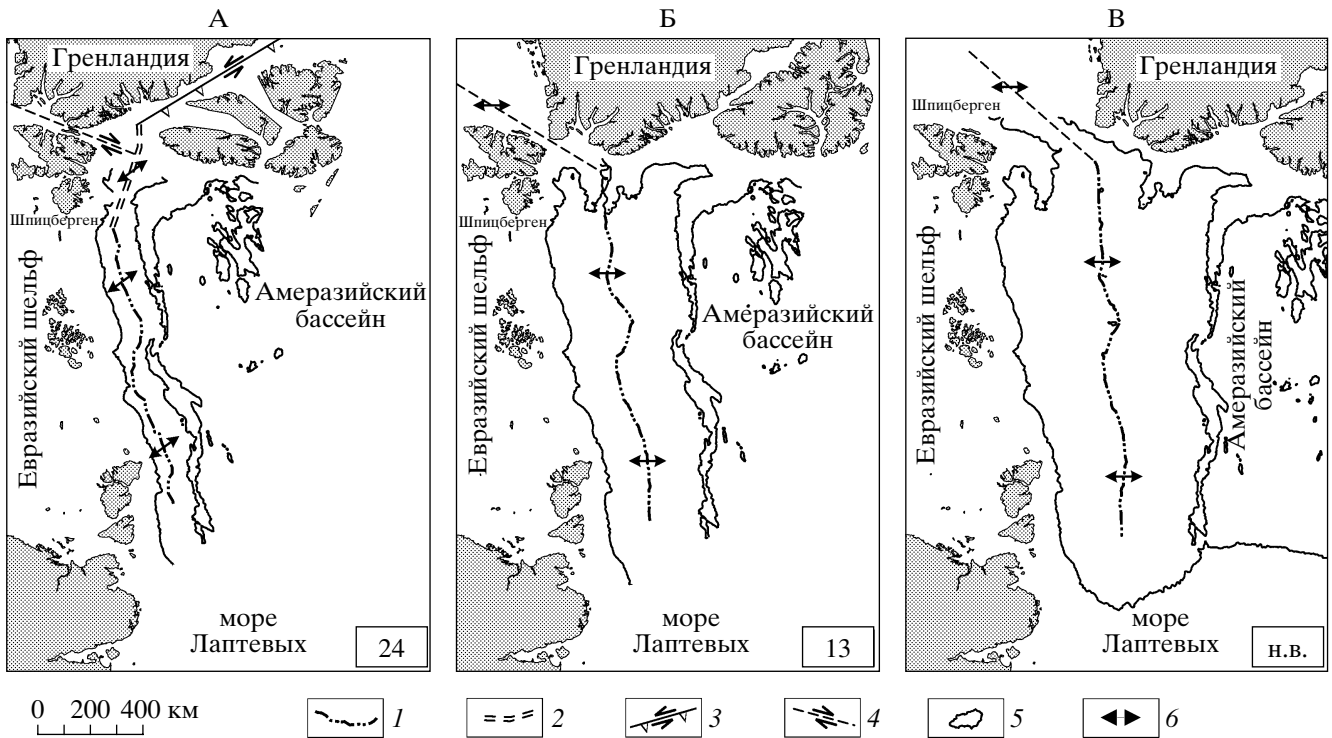
В прежних работах (как, например, [33, 34]) хребет Ломоносова в начальный период раскрытия бассейна присоединялся к Евразийской окраине таким образом, что его западное окончание, а также плато Ермак и поднятие Моррис Джесуп перекрывались друг с другом. Факт существования этого перекрытия либо не учитывался, либо считался не принципиальным, поскольку главенствовала точка зрения, что упомянутые поднятия имеют океаническую природу и сформированы под воздействием горячей точки [23].

Новые сейсмические данные и результаты сейсмогравитационного моделирования [22] показали, что плато Ермак и предположительно поднятие Моррис Джесуп, которые схожи по всем известным геофизическим и геоморфологическим характеристикам, являются континентальными структурами. С учетом этого, а также результатов идентификации магнитных аномалий, опубликованных Дж. Брозина с соавторами [16] и полученными в рамках данного исследования, возраст океанического дна между рассматриваемыми поднятиями не превышает 34–35 млн. лет. Аномалии 13 являются наиболее древними в этом регионе. В то же время, в остальной части ЕБ повсеместно прослеживаются аномалии 24.

Вблизи западной половины хребта Ломоносова, как уже отмечалось, отмечены дополнительные магнитные аномалии 25 (с возрастом в 56 млн. лет) [16, 17]. Они прослежены в абиссальной равнине вблизи хребта и, подобно изохронам 24–20 (см. рис. 3), огибают его западный конец, уходя в направлении пролива Нейрес. Полученные результаты показали, что хребет Ломоносова начал отделяться от Баренцевской континентальной окраины чуть ранее 56 млн. лет назад. Если это так, то открытие ЕБ предшествовало открытию Норвежско-Гренландского бассейна (где аномалий с возрастом старше 24-ых не обнаружено) и на начальном этапе спрединга должно было быть связанным с открытием Лабрадорского моря. Связь могла осуществляться через залив Баффина и пролив Нейрес.

Наличие этой первичной связи, по мнению Дж. Брозина с коллегами [16], подтверждается двумя обстоятельствами. Во-первых, тем, что к моменту формирования аномалии 24 (53 млн. лет назад) между западным окончанием хребта Ломоносова и Евразийской окраиной уже сформировалась полоса морского дна шириной около 150 км, что на 60 км меньше, чем сформировалось между плато Воринг и Гренландией [21]. И, во-вторых, тем, что в целом в ЕБ сформировалось морское дно больше, чем должно было бы образоваться в том случае, если бы спрединг осуществлялся только через Норвежско-Гренландский бассейн. Добавим к этому, что сама конфигурация древних магнитных изохрон с 25-ой по 18-ю, изгибающихся в направлении пролива Нейрес, а также особенности рельефа дна и потенциальных полей подтверждают возможность древней связи между заливом Баффина и СЛО.

Суммируя вышесказанное, можно предположить, что первичный раскол континентальной коры в ЕБ произошел во время, предшествующее формированию аномалии 25, т.е. около или ранее 58 млн. лет назад (рис. 10). До начала рифтинга хребет Ломоносова был присоединен к Баренцевоморскому шельфу. Западное окончание хребта располагалось восточнее крупного континентального плато, включающего поднятия Ермак и Моррис Джесуп. К востоку от плато проходила трансформная зона, которая была связана с проливом Нейрес. Эта зона, по-видимому, соответствовала интенсивным отрицательным магнитным аномалиям, ограничивающим ныне плато Ермак, поднятие Моррис Джесуп. Обе эти структуры существовали в качестве единого поднятия вплоть до времени около 35 млн. лет назад, предшествующему образованию аномалии 13 (см. рис. 9Б). В море Линкольна (см. рис. 10А) при этом предположительно находилась древняя ось раскрытия, связывавшая хребет Гаккеля с проливом



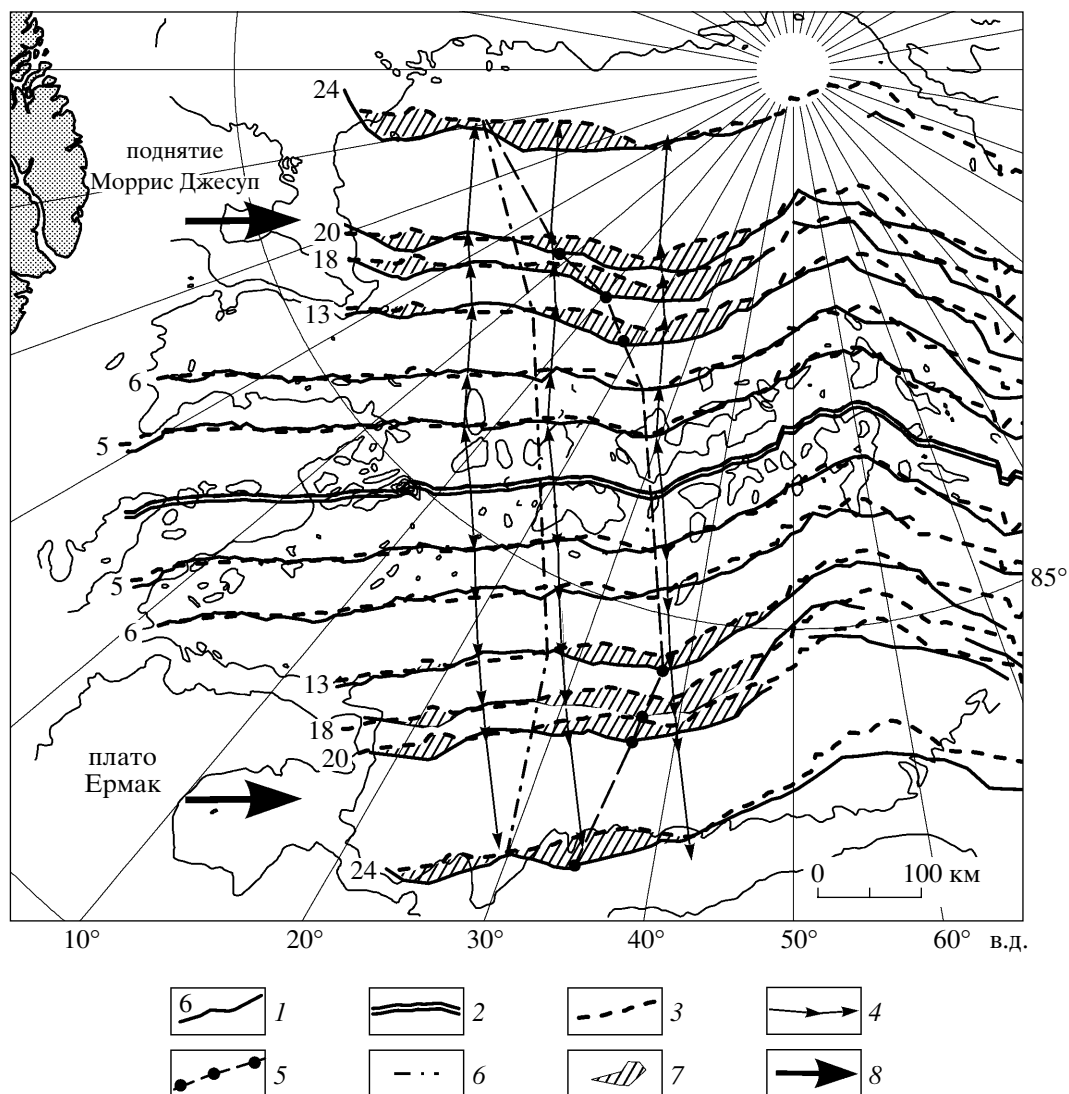
**Рис. 10.** Схемы раскрытия Евразийского бассейна в ключевые периоды его эволюции: А – около 53 млн. лет назад, аномалия 24; Б – около 32 млн. лет назад, аномалия 13; В – настоящее время

1 – выделенная по магнитным данным ось спрединга; 2 – предполагаемая ось спрединга; 3 – сдвиговая зона сжатия, соединяющая Евразийский бассейн с Баффиновым заливом и Лабрадорским морем; 4 – сдвиговая зона, соединяющая Евразийский бассейн с Норвежско-Гренландским бассейном; 5 – изобата 1600 м; 6 – направление спрединга. В западной части бассейна использованы схемы, приведенные в [16]

Нейрес и далее с заливом Баффина и Лабрадорским морем. Эта связь просуществовала вплоть до окончания спрединга в заливе Баффина.

Около 35 млн. лет назад между плато Ермак и поднятием Моррис Джесуп образовалась новая дивергентная граница плит, соединившая ЕБ с Норвежско-Гренландским бассейном (см. рис. 10Б и 10В). Эта граница стала основной по мере замедления и окончания разрастания дна Лабрадорского моря. По сейсмическим данным [22], а также данным В.И. Устрицкого [Тектоническая карта СЛО, не опубликована] появлению этой границы могло предшествовать значительное растяжение континентальной коры между Шпицбергом и плато Ермак. Наличие существенных изменений в характере разрастания в указанное время (соответствующее формированию аномалии 13) имеет многочисленные подтверждения. Именно в это время изменились геометрия и скорость раскрытия бассейна. Скорость спрединга резко упала, полюс вращения прилегающих плит испытал заметное перемещение. Все последующие полюса начали перемещаться в глубь континента, что может свидетельствовать о начале продвижения оси хребта Гаккеля.

Наиболее существенное влияние на начальном этапе процесса формирования дна ЕБ и историю возникновения новой границы плит оказывало перемещение Гренландии к северу по отношению к Северной Америке. Как показывают реконструкции, Гренландия в процессе перемещения к северу, выступала в роли тупого клина, внедряющегося в пространство, подготовленное широтным растяжением в ЕБ. Сила сжатия, действующая на окружающие регионы (включая хребет Гаккеля), определялась скоростью продвижения этого клина, скоростями растяжения и геометрией плит в Северной Атлантике и в Лабрадорском море. Это перемещение оценивается в 200 км [16]. Оценка проведена по ширине зоны перекрытия плато Ермак хребтом Ломоносова при последовательном закрытии бассейна. Результаты проведенного выше анализа местоположения полюсов раскрытия также говорят о передвижении Гренландии. Положение полюсов вращения, определенных предшественниками [24, 39, 41, 42] по изохронам в Северной Атлантике в период с 56 до 35 млн. лет назад, существенно отличается от найденных нами при совмещении осей магнитных аномалий в ЕБ, затем начинают совпадать. Воз-



**Рис. 11.** Изменения конфигурации оси раскрытия западной части ЕБ во времени

1 – магнитные изохроны и их номера; 2 – современная ось спрединга; 3 – положения современной оси, спрединга, развернутой относительно соответствующего полюса раскрытия ЕБ, до наилучшего совпадения с магнитными изохронами; 4 – линии дрейфа Евразийской и Северо-Американской плит; 5 – линии, соответствующие точкам максимальной кривизны древней оси спрединга; 6 – линия, соответствующая началу области изменения конфигурации оси спрединга на начальном этапе раскрытия ЕБ по сравнению с современным; 7 – области расхождения конфигурации современной и древней оси спрединга; 8 – направление перемещения Гренландской плиты в период формирования ЛМА 24–13

можным следствием давления Гренландии на ось раскрытия бассейна явилась значительная скорость разрастания океанического дна на начальной стадии спрединга.

По мнению Дж. Брозина с коллегами [16] внедрение Гренландии в ЕБ могло иметь важные последствия. Столкновение с хребтом Гаккеля могло стимулировать предполагаемый вулканизм, который сформировал высокоамплитудные магнитные аномалии на современных поднятиях Моррис Джесуп и плато Ермак. “Наползание” на дно бассейна должно было привести к его

сокращению (или поглощению). Упомянутые выше отрицательные аномалии магнитного поля и поля силы тяжести субширотного простирания, расположенные к юго-востоку от поднятий и ограничивающие область распространения спрединговых аномалий хребта Гаккеля, возможно, отмечают зону сокращения (или субдукции). Для проверки этих предположений нами был проведен анализ изменения конфигурации оси раскрытия ЕБ во времени. Современная ось хребта Гаккеля разворачивалась вокруг конечных полюсов вращения Северо-Американской и Евразийской

плит в обе стороны до наилучшего совмещения с парными изохронами. Были выявлены следующие закономерности (рис. 11). Установлено, что на первом этапе раскрытия ЕБ в период формирования аномалий с 24-ой по 13-ю, искривление оси спрединга было максимально и существенно менялось во времени. При этом точки максимальной кривизны, находящиеся на незначительном удалении от плато Ермак и поднятия Моррис Джесуп, постепенно продвигались к востоку, вдоль генерального простирания хребта Гаккеля на расстояние более 100 км. Аналогично, но на чуть меньшее расстояние, продвигаются и точки, соответствующие началу области заметного изменения конфигурации оси спрединга на начальном этапе раскрытия ЕБ (время формирования аномалий 24–13) по сравнению с современным. Отмечено также, что области расхождения конфигурации современной и древней оси спрединга (изохрон) располагаются все дальше на восток с уменьшением возраста изохрон. Позднее, в начале второго этапа (после времени формирования аномалии 13), искривление оси раскрытия резко уменьшилось и оставалось неизменным до настоящего времени. Точки максимальной кривизны в этот период времени стали совпадать с линиями дрейфа плит. Выявленные закономерности в изменении конфигурации древней оси раскрытия ЕБ, по-видимому, свидетельствуют о том, что в период времени между 53–33 млн. лет назад эта ось испытывала продольное сжатие, вызванное дрейфом Гренландии в северном направлении.

Итак, перемещение Гренландии закончилось около 35–33 млн. лет назад, ось раскрытия ЕБ оказалась связанной с Норвежско-Гренландским бассейном. При этом поднятие Моррис Джесуп и плато Ермак разделились (см. рис. 10). С этого момента Гренландия стала частью Северо-Американской плиты. Формирование дна ЕБ начало осуществляться вдоль всей его длины до шельфа моря Лаптевых относительно единой оси, расположенной ныне в рифтовой зоне хребта Гаккеля. Последний вывод однозначно подтверждается результатами анализа сейсмологических данных [2].

## ВЫВОДЫ

На основании геосторического анализа аномального магнитного поля, а также особенностей гравитационного поля и рельефа морского дна подтверждено, что формирование ЕБ происходило в результате медленного и ультрамедленного разрастания океанического дна в три основные этапа, отличающиеся по своим кинематическим характеристикам. Началу спрединга предшествовал период растяжения и рифтогенеза, связанно-

го с непрекращающимся раскрытием Северной Атлантики и Лабрадорского моря.

Подтверждено также, что до начала рифтогенеза хребет Ломоносова был присоединен к Баренцевоморскому шельфу. В дальнейшем он откололся от Евразии и начал отодвигаться от нее, пока не занял современного положения.

Разрастание дна Евразийского бассейна происходило на фоне инверсий геомагнитного поля, начиная примерно с 58 млн. лет тому назад. Его открытие предшествовало началу спрединга в Норвежско-Гренландском бассейне и, на начальном этапе, было связано с раскрытием Лабрадорского моря. Связь осуществлялась через пролив Нейрес и просуществовала до окончания спрединга в заливе Баффина.

История формирования обоих бассейнов была осложнена перемещением Гренландии к северу по отношению к Северной Америке, начавшемся около или чуть ранее 53 млн. лет назад. Это перемещение было вызвано началом раскрытия Северной Атлантики к северу от разломной зоны Чарли-Гиббс, происходившим одновременно с раскрытием Лабрадорского моря.

Гренландия, в процессе движения к северу, выступала в роли тупого клина, внедряющегося в пространство, подготовленное растяжением в Евразийском бассейне. При этом дно последнего, судя по изменению конфигурации магнитных изохрон во времени, подверглось сокращению (продольному сжатию) как минимум на 100 км. С момента начала спрединга в Евразийском бассейне крупное плато, объединяющее современные плато Ермак и поднятие Моррис Джесуп, являлось частью Евразийской окраины.

Перемещение Гренландии к северу вдоль простирания современного хребта Гаккеля закончилось около 35–33 млн. лет назад. Связь между осями раскрытия Лабрадорского моря и Евразийского бассейна прервалась. С этого момента Гренландия стала частью Северо-Американской плиты, а к северу от Норвежско-Гренландского бассейна образовалась дивергентная граница плит, расколовшая ранее единое плато на современные плато Ермак и поднятие Моррис Джесуп. В дальнейшем раскрытие Евразийского бассейна было связано с Северной Атлантикой и осуществлялось вдоль всей его длины до шельфа моря Лаптевых относительно единой оси, расположенной ныне в рифтовой зоне хребта Гаккеля.

Подтверждено, что основные этапы раскрытия отличались по кинематическим характеристикам. Анализ изменения линейных скоростей вдоль хребта Гаккеля позволил выявить асимметрию в скорости спрединга на разных его флангах,

особенно заметную на первом этапе эволюции (54–44 млн. лет назад), что может свидетельствовать о перескоке/перескоках оси разрастания (нестационарности спрединга). Отмечено также, что величина асимметрии возрастает при приближении к полюсу раскрытия. Основные этапы эволюции Евразийского бассейна по времени и кинематическим параметрам в генеральном плане достаточно хорошо согласуются с этапами раскрытия Северной Атлантики и прилегающих арктических акваторий.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (проект 0762).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим своих коллег из отдела системных геолого-геофизических исследований ВНИИОкеангеология М.С. Корневу и А.А. Лихачева за помощь в увязке и идентификации магнитных аномалий, а также С.В. Степанова, М.В. Аверину, Л.В. Аплонову, А.А. Абельскую, Л.С. Рыбину за компьютерный дизайн. Мы выражаем искреннюю благодарность Г.П. Аветисову за конструктивные замечания по сути работы и редактирование текста.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветисов Г.П. Геодинамика сейсмоактивных зон Арктического региона // Отечественная геология. 1993. № 10. С. 52–62.
2. Аветисов Г.П. Сейсмоактивные зоны Арктики. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1996. 183 с.
3. Глебовский В.Ю., Зайончек А.В., Каминский В.Д., Маценков С.П. Цифровые базы данных и карты потенциальных полей Северного Ледовитого океана // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 134–141.
4. Глебовский В.Ю., Карасик А.М., Меркурьев С.А., Процаенко С.В., Сочеванова Н.А. Особенности процесса разрастания Северной Атлантики по данным площадных гидромагнитных съемок на хребте Рейкьянес и в Исландской котловине // Электромагнитная индукция в Мировом океане. Часть 1. М.: Наука, 1990. С. 22–34.
5. Глебовский В.Ю., Маценков С.П. Повышение эффективности геологической интерпретации аномального магнитного поля океана путем автоматизации процесса составления сводных карт // Тезисы докладов IV межвед. конф. объектовой подсистемы “Океангеоресурсы”. Проблемы развития морских геотехнологий информатики и геоэкологии. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1991. С. 35.
6. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. 192 с.
7. Карасик А.М. Магнитные аномалии хребта Гаккеля и происхождение Евразийского суббассейна Северного Ледовитого океана // Геофиз. методы разведки в Арктике. Вып. 5. Л.: НИИГА, 1968. С. 9–19.
8. Карасик А.М. Евразийский бассейн Северного Ледовитого океана с позиций тектоники плит // Проблемы геологии полярных областей Земли. Л.: НИИГА, 1974. С. 23–31.
9. Карасик А.М. Основные особенности истории развития и структуры дна Арктического бассейна по аэромагнитным данным // Морская геология, седиментология, осадочная петрография и геология океана. Л.: Недра, 1980. С. 178–193.
10. Карасик А.М. Некоторые особенности геоисторического анализа аномального магнитного поля в условиях медленного разрастания океанического дна (на примере Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана) // Магнитные аномалии океанов и глобальная тектоника. М.: Наука, 1981. С. 162–174.
11. Карасик А.М., Савостин Л.А., Зоненшайн Л.П. Параметры движения литосферной плиты в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана // ДАН СССР. 1983. Т. 273. № 5. С. 1191–1196.
12. Маценков С.П., Глебовский В.Ю., Даниэль Е.Д., Зайончек А.В., Каминский В.Д. Новая согласованная цифровая база данных по потенциальным полям и рельефу дна Арктической акватории. Теория и практика морских геолого-геофизических исследований // Материалы к юбилейной конференции “Российской морской геофизике 50 лет”. Геленджик: НИИОкеангеофизика, 1999. С. 160–161.
13. Меркурьев С.А. Программа расчета магнитного поля инверсионно-спрединговой модели (SPREAD) // Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб.: ИЗМИРАН. ЭЛПО, 1991. 47 с.
14. Рельеф дна Северного Ледовитого океана. Карта масштаба 1 : 5000000. Главное управление навигации и океанографии МО РФ и Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана. (ВНИИОкеангеология). СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999.
15. Савостин Л.А., Пучков П.А. К расчету положения полюсов относительного движения литосферных плит // Строение литосферных плит. М.: ИОАН им. П.П. Ширшова, 1979. С. 227–247.
16. Brozena J.M., Childers V.A., Lawver L.A., Gahagan L.M., Forsberg R., Faleide J.I., Eldholm O. New aerogeophysical study of the Eurasian Basin and Lomonosov Ridge: implications for basin development // Geology. 2003. Vol. 31. № 9. P. 825–828.
17. Brozena J.M., Childers V.A., Lawver L.A., Forsberg R., Faleide J., Eldholm O. et al. New aerogeophysical study of the Eurasia Basin and Lomonosov Ridge: implications for basin development // Eos. Trans. AGU. Fall Meet. Suppl. 2002. Vol. 83. № 47. P. F-1266.

18. Bullard E.C., Everett J.E., Smith A.G. The fit of the continents around the Atlantic // A symposium on continental drift. Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1965. Vol. 1088. P. 41–51.
19. Cande S.C., Kent D.V. Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. № B4. P. 6093–6095.
20. Chernyh A., Zayonchek A. New view on the evolution of the Laptev Sea area // NGF Abstracts and Proceedings N 2. Arctic geology, hydrocarbon resources and environmental challenges. Polar environmental centre. Tromso, 23–26 May, 2004. P. 17–18.
21. Eldholm O., Grue K. North Atlantic volcanic margins: dimensions and production rates // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. № B2. P. 2955–2968.
22. Engen O., Faleide J.I., Tsikalas F., Myhre A.M., Eldholm O. Structure of the west and north Svalbard margins in a plate tectonic setting // ICAM-IV. Canada, Dartmouth. 2003. P. 40.
23. Feden R.H., Vogt P.R., Fleming H.S. Magnetic and bathymetric evidence for the “Yermak hot spot” northwest of Svalbard in the Arctic Basin // Earth Planet. Sci. Lett. 1979. Vol. 44. № 1. P. 18–38.
24. Gaina C., Roest W.R., Muller R.D. Late Cretaceous – Cenozoic deformation of northeast Asia // Earth Planet. Sci. Lett. 2002. № 197. P. 273–286.
25. Glebovsky V., Gurevich N., Likhachev A., Minakov A., Brozena J., Childers V., Merkuriev S. Geochronology and kinematics of spreading in the Western Eurasia Basin // 4<sup>th</sup> International Conference on Arctic Margins. Sept. 30–Oct. 3. 2003. Dartmouth, Nova Scotia, Canada. 2003. P. 59–60.
26. Glebovsky V.Yu., Kovacs L.C., Maschenkov S.P., Brozena J. Joint compilation of Russian and US navy aeromagnetic data in the Central Arctic Seas // Polarforschung. ICAM III (International Conference on Arctic margins). Celle, Germany. 12–16. October, 1998. Vol. 1. 2000. P. 35–40.
27. Glebovsky V.Yu. Magnetic anomalies and the history of the Reykjanes Ridge seafloor spreading // IUGG. Abstracts Week A. XXI General Assembly. Boulder, Colorado. July 2–14 1995, P. A180.
28. Gramberg I.S., Verba V.V., Verba M.L., Kos'ko M.K. Sedimentary cover thickness map – sedimentary basins in the Arctic // Polarforschung, Jahrgang. ICAM III. Celle, Germany. 12–16 October 1998. Vol. II. 1999. P. 243–250.
29. Hayes D.E. Nature and implications of asymmetric seafloor spreading – different rates for different plates // Geol. Soc. Am. Bull. 1976. Vol. 87. P. 994–1002.
30. Jakobsson M., Cherkis N., Woodward J., Macnab R., Coakley B. New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers // Eos. Trans. AGU. 2000. Vol. 81. P. 89–96.
31. King E.R., Zietz I., Alldredge L.R. Magnetic data on the structure of the central Arctic region // Geol. Soc. Amer. Bull. 1966. Vol. 77. P. 619–646.
32. Kovacs L.C., Glebovsky V.Yu., Maschenkov S.P., Brozena J. New map and grid of complicated magnetic anomalies from the Arctic Ocean // Eos. Trans. AGU. Fall Meet. Suppl. 2002. Vol. 83(47). P. F-1330.
33. Lawver L.A., Grantz A., Gahagan L.M. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician // Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. 2002. Vol. 360. P. 333–358.
34. Lawver L.A., Müller R.D., Srivastava S.P., Roest W.R. / Eds. The opening of the Arctic. Bleil U., Thiede J. Arctic versus Antarctic geology. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1990. P. 29–62.
35. Le Pichon X. Sea-floor spreading and continental drift // J. Geophys. Res. 1968. Vol. 73. № 12. P. 3661–3697.
36. McKenzie D.P., Davies D., Molnar P. Plate tectonics of the Red Sea and East Africa // Nature. 1970. V. 226. P. 243–248.
37. Müller R.D., Roest W.R., Royer J.-Y., Gahagan L.M., Sclater J.G. Digital isochrons of the world's ocean floor // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. № B2. P. 3211–3214.
38. Patriat Ph. Reconstitution de l'évolution du système de dorsales de l'océan Indien par les méthodes de la cinématique des plaques. Paris: Inst. de Physique du Globe de Paris. Reproduct par Instaprint S.A., 1987. 308 p.
39. Pitman W.C., Talwani M. Sea-floor spreading in the North Atlantic // Geol. Soc. Amer. Bull. 1972. Vol. 83. P. 619–649.
40. Riddihough R.P., Haines G.V., Hannaford W. Regional magnetic anomalies of the Canadian Arctic // Can. J. Earth Sci. 1973. Vol. 10. № 2. P. 157–163.
41. Savostin L.A., Karasik A.M. Recent plate tectonics of the Arctic basin and of northeastern Asia // Tectonophysics. 1981. № 74. P. 111–145.
42. Talwani M., Eldholm O. Evolution of the Norwegian-Greenland Sea // Geol. Soc. Amer. Bull. 1977. Vol. 88. P. 969–999.
43. Taylor P.T., Kovacs L.C., Vogt P.R., Johnson G.L. Detailed aeromagnetic investigation of the Arctic Basin // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. № B7. P. 6323–6333.
44. Verhoef J., Roest W.R., Macnab R., Arkani-Hamed J. et al. Magnetic anomalies of the Arctic and North Atlantic Oceans and adjacent land areas. Geol. Surv. Canada. Open File 3125a. 1996.
45. Vogt P.R., Taylor P.T., Kovacs L.C., Johnson G.L. Detailed aeromagnetic investigation of the Arctic Basin // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. P. 1071–1089.

Рецензенты: Э.В. Шупилов, С.С. Драчев

## Formation of the Eurasia Basin in the Arctic Ocean as Inferred from Geohistorical Analysis of the Anomalous Magnetic Field

V. Yu. Glebovsky<sup>a</sup>, V. D. Kaminsky<sup>a</sup>, A. N. Minakov<sup>a</sup>, S. A. Merkur'ev<sup>b</sup>,  
V. A. Childers<sup>c</sup>, and J. M. Brozena<sup>c</sup>

<sup>a</sup>All-Russia Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean,  
Angliiskii pr. 1, St. Petersburg, 190121 Russia  
e-mail: gleb@vniio.niv.ru

<sup>b</sup>Institute of Terrestrial Magnetism, the Ionosphere, and Radiowave Propagation (St. Petersburg Branch),  
Russian Academy of Sciences, Muchnoi per. 2, St. Petersburg, 191023 Russia

<sup>c</sup>Naval Research Laboratory, Code 7421, 4555 Overlook Ave. SW, Washington, DC 20375 USA

**Abstract**—A new combined magnetic database and a magnetic-profile map are developed for the Eurasia Basin as a result of adjusting all available historical and recent Russian and American magnetic data sets. The geohistorical analysis of magnetic data includes several steps: identification of linear magnetic anomalies along each trackline, calculation of the Euler rotation pole positions for the relative motion of the North American and Eurasian plates, analysis of temporal and spatial variations in the spreading rate, and plate reconstructions. The pattern of key Cenozoic magnetic isochrons (24, 20, 18, 13, 6, 5, 2a) is constructed for the entire Eurasia Basin. In the western half of the basin, this pattern is consistent with a recently published scheme [16]. In its eastern half, magnetic isochrons are determined in detail for the first time and traced up to the Laptev Sea shelf. The main stages in the seafloor spreading are established for the Eurasia Basin. Each stage is characterized by a specific spreading rate and the degree of asymmetry of the basin opening. The revealed differences are traced along the Gakkel Ridge. Systematic patterns in wandering of the Eurasia Basin opening pole are established for particular stages. The continent–ocean transition zone corresponding to the primary rupture between plates is outlined in the region under consideration on the basis of gravimetric data. The nature of different potential fields and bottom topography on opposite sides of the Gakkel Ridge is discussed. The characteristic features of the basin-bottom formation at main stages of its evolution are specified on the basis of new and recently published data. The results obtained are in good agreement with plate geodynamics of the North Atlantic and the adjacent Arctic basins.