Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 8, с. 1108-1125 **www.izdatgeo.ru**

УДК 550.31; 550.34; 551.24

РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛИТ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГРАВИТАЦИОННЫХ, МАГНИТНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

И.Ю. Кулаков, К. Гайна*, Н.Л. Добрецов, А.Н. Василевский, Н.А. Бушенкова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, Россия
** University of Oslo, Norway*

На основании анализа комплекса разнотипных геофизических данных, а именно аномалий гравитационного поля в свободном воздухе, магнитных аномалий, модели сейсмических аномалий в верхней мантии, топографических и батиметрических карт, были уточнены основные структурные элементы Арктического региона и проведена реконструкция их перемещений в течение последних 200 млн лет. Распределение значений магнитного поля позволяет выделить блок изометричной формы в центре Северного Ледовитого океана, который покрывает регион хр. Альфа-Менделеева с прилегающими территориями. Предполагается, что этот блок, по-видимому, континентального происхождения является частью плиты Арктида, которая играла важную роль в тектонической эволюции Арктического региона в мезозойское время. Мы полагаем, что субдукция вкрест Анюйской сутуры в период от 200 до 120 млн лет была причиной вращения плиты Арктида, которое, в свою очередь, привело к одновременному закрытию Южно-Анюйского океана и раскрытию Канадского бассейна. Кроме того, вращение этой плиты может быть ответственно за процессы раздвижения земной коры на севере Западной Сибири и за продвижение Новой Земли на север относительно Урало-Таймырского складчатого пояса. Мы полагаем также, что в периоды до 130 млн лет назад участки литосферы кратонного типа Северо-Американской, Гренландской и Европейской плит представляли собой единое целое. Позднее, сначала Гренландия отделилась от Северной Америки, в результате чего образовалось море Баффина, а затем Гренландия отделилась от Европейской плиты, что привело к раскрытию Северо-Атлантического бассейна. Кайнозойская стадия раскрытия Евразийского и Северо-Атлантического бассейнов однозначно восстанавливается по линейным магнитным аномалиям. Обратное вращение Северной Америки относительно Евразии на угол ~ 15° с правосторонним боковым смещением на 200-250 км обеспечивает почти идеальное совпадение контуров глубоководных бассейнов Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана.

Арктический регион, гравитационное поле, магнитные аномалии, сейсмотомографическая модель, реконструкция плитного движения, Арктида.

PLATE RECONSTRUCTIONS IN THE ARCTIC REGION BASED ON JOINT ANALYSIS OF GRAVITY, MAGNETIC, AND SEISMIC ANOMALIES

I.Yu. Koulakov, C. Gaina, N.L. Dobretsov, A.N. Vasilevsky, and N.A. Bushenkova

Based on the analysis of various geophysical data, namely, free-air gravity anomalies, magnetic anomalies, upper mantle seismic tomography images, and topography/bathymetry maps, we single out the major structural elements in the Circum Arctic and present the reconstruction of their locations during the past 200 Myr. The configuration of the magnetic-field patterns allows revealing an isometric block, which covers the Alfa-Mendeleev Ridges and surrounding areas. This block of presumably continental origin is the remnant part of the Arctida Plate, which was the major tectonic element in the Arctic region in Mesozoic time. We believe that the subduction along the Anyui suture in the period from 200 to 120 Ma caused rotation of the Arctida Plate, which, in turn, led to the simultaneous closure of the South Anyui Ocean and opening of the Canadian Basin. The rotation of this plate is responsible for extension processes in West Siberia and the northward displacement of Novaya Zemlya relative to the Ural-Taimyr orogenic belt. The cratonic-type North American, Greenland, and European Plates were united before 130 Ma. At the later stages, first Greenland was detached from North America, which resulted in the Baffin Sea, and then Greenland was separated from the European Plate, which led to the opening of the northern segment of the Atlantic Ocean. The Cenozoic stage of opening of the Eurasian Basin and North Atlantic Ocean is unambiguously reconstructed based on linear magnetic anomalies. The counter-clockwise rotation of North America by an angle of -15° with respect to Eurasia and the right lateral displacement to 200—250 km ensure an almost perfect fit of the contours of the deep-water basin in the North Atlantic and Arctic Oceans.

Arctic region, gravity field, magnetic anomalies, seismic tomography model, plate reconstruction, Arctida

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, благодаря развитию новых технологий и существенному сокращению ледового покрова, становится возможным активное исследование и освоение Арктики. Большой интерес к потенциальным природным ресурсам привел к интенсификации междисциплинарных и разномасштабных исследований в этом регионе. В частности, проблемы, связанные с происхождением месторождений углеводородов, режимами осадконакопления и магматизма, невозможно оценить без четкого представления об эволюции Арктики. Построение достоверных моделей перемещения литосферных плит в геологическом прошлом требует комплексного анализа различных геологических и геофизических данных. В работе представлен краткий обзор некоторых существующих предположений о геодинамическом развитии Арктики, который показывает, что более или менее однозначно реконструкции перемещения плит в Арктике получены только для кайнозойского времени, тогда как для более ранних периодов, существующие модели во многом противоречат друг другу.

Неоднозначность в реконструкциях перемещений плит связана с нехваткой надежных данных о глубинной структуре Арктического региона. Суровые природные условия в Арктике приводят к существенному удорожанию любых полевых геологических и геофизических работ. Вместе с тем определенный прогресс в этой области в последние десятилетия стал возможным благодаря появлению новых спутниковых гравитационных и магнитометрических данных. Эти данные позволили оценить толщину земной коры на основании метода инверсии поля силы тяжести, а также осуществить реконструкцию плитных движений для Центральной Арктики [*Alvey et al., 2008*]. Кроме того, недавно была построена модель сейсмических аномалий верхней мантии под большей частью Арктического региона на основании данных глобальных сейсмических каталогов, которая позволяет определить структуру литосферы [*Яковлев и др., 2012*]. В настоящей статье мы предлагаем объединить эти и некоторые другие источники информации, чтобы уточнить конфигурацию основных структур Арктики и восстановить характер их перемещений за прошедшие 200 млн лет. Многие тектонические элементы Арктики хорошо различимы на топографических картах. Информация об отдельных скрытых структурах в шельфовых областях и на суше может быть получена при анализе аномалий силы тяжести. Изучение магнитных аномалий позволяет выявить блоки земной коры схожего происхождения и проследить этапы их развития. Наконец, результаты сейсмической томографии дают представление о форме основных литосферных блоков в верхней мантии и позволяют выявлять следы зон субдукции на различных стадиях геологической истории. Кроме того, мы предлагаем вниманию нашу модель реконструкции мезокайнозойских перемещений плит в Арктическом регионе, основываясь на различных геолого-геофизических данных.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Изучение современной структуры Арктического региона ведется с начала двадцатого века. До 1990-х годов информация о его глубинной структуре основывалась главным образом на поверхностных геологических исследованиях и очень редких геофизических данных, полученных в основном на суше. Различные концепции геодинамической эволюции региона представлены во многих исследованиях тех лет [*Шатский, 1963; Карасик, 1968; Pitman, Talwani, 1972; Киселев и др., 1974; Herron, 1974; Виноградов и др., 1975; Погребицкий, 1976; Пущаровский, 1976; Каминский, 1977; Kristoffersen, Talwani, 1977; LePichon et al., 1977; Vogt et al., 1979*]. Развитие новых геофизических технологий и накопление новых данных привели к значительному обновлению этих моделей. В частности, информация о батиметрии, геотермии, сейсмологии, сейсмостратиграфии, гравитационном и магнитном полях стала активно применяться для изучения различных частей Арктического региона [*Карасик, 1980; Киселев, 1984; Forsyth, 1986; Jackson, Johnson, 1986; Нарышкин, 1987; Грамберг и др., 1992, 1993; Верба и др., 1998; Леонов, 2000*]. Весь комплекс данных был использован при построении региональных геодинамических моделей Арктики [*Embry, 1990; Jackson, Gunnarsson, 1990; Зоненшайн и др., 1990; Хаин, 2001; Хуторской, Подгорных, 2001*]. Развитие геофизических систем наблюдения за прошедшие десятилетия позволило разработать более детальные и реалистичные геодинамические модели [*Аветисов, 2002; Lawver et al., 2002; Jokat, 2003; Егоров, 2004; Богданов, 2004; Гуревич, Глебовский, 2004; Пискарев, 2004; Шипилов, Верниковский, 2010*; и др.].

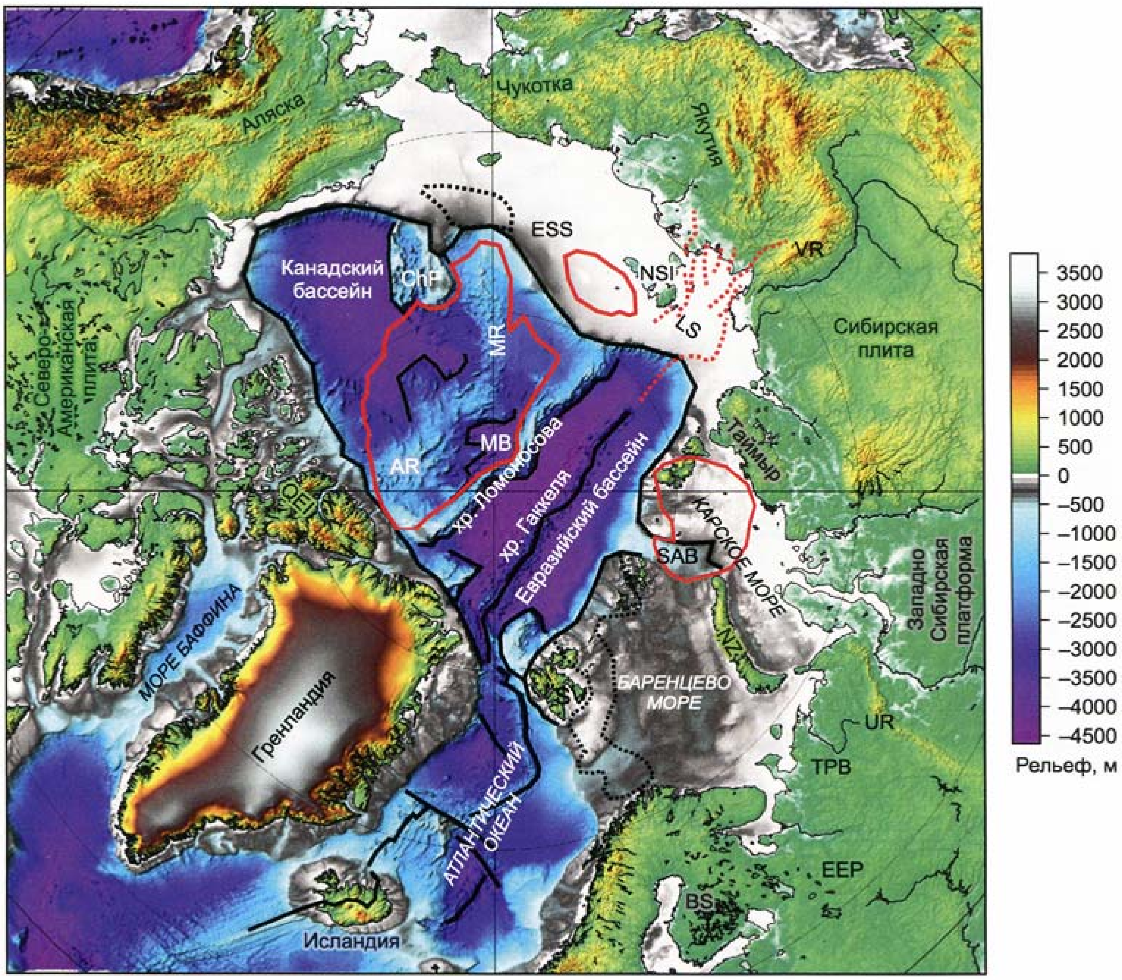


Рис. 1. Арктический регион: карта топографии/батиметрии и расположение основных структурных элементов.

Здесь и далее: BS — Балтийский щит, EEP — Восточно-Европейская платформа, TPB — Тимано-Печерский бассейн, Sv — Свальбард, SAB — бассейн Святой Анны, NSI — Новосибирские острова, VR — Верхоянский хребет, ESS — Восточно-Сибирское море, LS — море Лаптевых, ChB — Чукотский блок, AR — хребет Альфа, MR — хребет Менделеева, MB — бассейн Макарова, QEI — острова Королевы Элизабет. Черным пунктиром и красным контуром показаны основные особенности, выделенные по гравитационному и магнитному полям соответственно.

Одной из основных современных тектонических структур Арктики является океанический Евразийский бассейн, который в настоящее время открывается вдоль срединно-океанического хр. Гаккеля. В целом большинство исследователей сходятся во мнении по поводу времени начала раскрытия этого бассейна - около 54 млн лет назад. Как показано многими исследователями, например [*Lawver et al., 2002*], и нашими реконструкциями, границы Северной Атлантики и Евразийского бассейна можно почти идеально состыковать путем вращения Американской и Евразийских плит относительно друг друга.

Другие структуры Северного Ледовитого океана, такие как котловина Макарова и Канадский бассейн, отделенные подводными хребтами Альфа-Менделеева и Ломоносова, также ясно различимы на батиметрической карте, однако происхождение и стадии их развития остаются предметом горячих обсуждений. Большинство специалистов полагают, что Канадский бассейн образовался в результате спрединга океанического дна. Однако отсутствие в Канадском бассейне следов срединно-океанического хребта и линейных магнитных аномалий не позволяет сделать однозначное заключение о времени его образования и направлении его раскрытия. Существует также гипотеза, что Канадский бассейн был первоначально сформирован в Тихом океане, а затем перемещен в свое современное положение [*Churkin, Trexler, 1981*]. Наконец, некоторые авторы предлагают для этого бассейна постепенное преобразование континентальной коры в океаническую [*Погребицкий, 1976*].

Некоторые исследования представляют аргументы в пользу существования в Северном Ледовитом океане древней литосферной плиты, сильно деформированной активными тектоническими процессами в недавнем геологическом прошлом [*Хаин, 2001*]. В частности, существующие морские сейсмические профили [*Филатова, Хаин, 2007*] показывают присутствие континентальной коры под хребтами Ломоносова, Альфа-Менделеева и Чукотским плато. Многие авторы полагают, что эти структуры являются фрагментами одной континентальной плиты, так называемой Арктиды или Гиперборейской плиты [*Зоненшайн, Натапов, 1987*]. Согласно палеомагнитным данным, эта плита могла быть частью суперконтинента Родиния, который распался приблизительно 950-830 млн лет назад [*Metelkin et al., 2011*]. Следует отметить, что при реконструкции движений плит для древних периодов используются достаточно надежные результаты палеомагнитных исследований [*Шипилов, Верниковский, 2010; Metelkin et al., 2011; Верниковский и др., 2013*]. В то же время для более поздних стадий (например, для последних 200 млн лет, рассматриваемых в настоящей статье), этот метод сталкивается с серьезной проблемой сбора данных и их датированием.

ОПИСАНИЕ ДОСТУПНЫХ ДАННЫХ

В нашем исследовании мы особенно подробно рассматриваем четыре группы данных, а именно данные топографии/батиметрии, аномалии силы тяжести в свободном воздухе, магнитные аномалии и сейсмотомографическую модель. Кроме того, для построения геодинамических моделей было также задействовано множество различной геологической и геофизической информации, имеющейся в открытом доступе.

Данные топографии/батиметрии. Мы использовали модель рельефа поверхности Земли ETOPOl (глобальная модель, представленная на сетке 1 минута в географических координатах), которая объединяет топографию суши и батиметрию океанов (рис. 1), полученные путем компиляции многочисленных глобальных и региональных данных [*Amante, Eakins, 2009*]. Можно заметить, что батиметрия океанов четко разделяет шельфовые области с глубинами до 400 м и глубоководные регионы. В евроазиатской части Арктики наблюдаются три крупнейших шельфовых области: Баренцево, Карское и Восточно-Сибирское моря. Эти шельфовые территории активно исследуются в последнее десятилетие как потенциальные нефтепромысловые провинции [см. обзор в работе *Drachev et al., 2010*]. На карте рельефа можно видеть, что Карское и Баренцево моря разделены протяженным участком с повышенным рельефом, включающим территорию Новой Земли и относительно более глубоководного трога Святой Анны к северо-востоку от Земли Франца Иосифа. Существуют некоторые геологические доказательства того, что эта линия представляет собой сутурную зону более древнего океанического бассейна [*Соколов и др., 2010*].

На рис. 1 мы используем специальный цветной масштаб, направленный на выявление тонкой структуры шельфа. В этом представлении дно Баренцева моря кажется более глубоким и неоднородным, чем в других сегментах шельфа Арктики. Причиной этого может быть отсутствие выхода в бассейн Баренцева моря устьев крупных рек. В противоположность этому, Восточно-Сибирское море и море Лаптевых представлены очень плоской и мелководной батиметрией (средняя глубина менее 100 м) на огромной территории. В случае шельфа моря Лаптевых это выглядит парадоксальным, так как в зоне продолжения срединно-океанического хр. Гаккеля, который находится в этом бассейне, наблюдаются проявления активных тектонических процессов, таких как сейсмическая активность и современный вулканизм [*Добрецов и др., 2013*]. В свою очередь, эта тектоническая деятельность может быть связана с активной деформацией коры. Действительно, результаты сейсмического профилирования показали, что фундамент шельфа моря Лаптевых сильно деформирован [*Рекант, Гусев, 2012*], но сложные тектонические структуры скрыты молодыми осадками, принесенными главным образом из устья р. Лена.

Карта батиметрии Северного Ледовитого океана и окружающих территорий (см. рис. 1) демонстрирует четкую сегментацию глубоководных зон. Основную часть океана занимает Евразийский сегмент с ясно различимым срединно-океаническим хр. Гаккеля, который представляет собой активно раскрывающийся в настоящее время океанический бассейн. Другой крупной структурой Северного Ледовитого океана является Канадский бассейн, сравнимый по размеру с Евразийским бассейном, который является пассивным в настоящий момент. На рельефе дна этого бассейна невозможно выявить какой-либо особенности, которую можно было бы связать со следами срединно-океанического хребта. Происхождение этого бассейна активно дискутируется специалистами, и многие аспекты этой проблемы остаются неясными. В центре Северного Ледовитого океана расположен относительно небольшой бассейн Макарова, который отделен от Евразийского бассейна ясно прослеживаемым вытянутым хр. Ломоносова. В отличие от него, хребты Альфа и Менделеева, расположенные между Канадским бассейном и впадиной Макарова, проявляются не так четко и представляют собой цепочку сильно сглаженных возвышенностей, покрывающих достаточно большую площадь. Происхождение бассейна Макарова также остается неясным и активно обсуждается.

Наиболее значимыми глубоководными областями в окружении Арктического региона являются северный сегмент Атлантического океана и относительно небольшое море Баффина, которые отделяют Гренландию от Европейской и Северо-Американской плит.

Топография на суше также является важной информацией для исследования тектонических процессов в литосфере. Например, горные цепи хр. Брукса (Аляска), Верхоянского хребта (Якутия) и Урала совпадают с областями активных мезокайнозойских деформаций. Устойчивые области с прочной недеформированной литосферой обычно характеризуются плоским рельефом.

Гравитационное поле. В этом исследовании мы используем спутниковые данные аномалий силы тяжести в свободном воздухе [*Andersen et al., 2010*], которые представлены на рис. 2, А. В данном исследовании мы не вводим поправки за рельеф (как, например, в работе [*Alvey et al., 2008*]). В этом случае представленные аномалии демонстрируют высокочастотные колебания гравитационного поля относительно поля изостатически компенсированной коры. Эти аномалии, главным образом, отражают структуры в коре, которые могут быть связаны с коллизионными или иными тектоническими процессами в коре. В некоторых случаях гравитационные аномалии имеют явную связь с рельефом. Например, периметр глубоководной области Северного Ледовитого океана четко маркируется положительной линейной аномалией силы тяжести. Также наблюдается четкая корреляция областей повышенной силы тяжести с расположениями хребтов Ломоносова и Гаккеля. С другой стороны, для большинства областей соответствие рельефа и силы тяжести не столь очевидно. В таких случаях гравитационное поле дает важный дополнительный материал для изучения скрытых структур в коре, которые могут отражать региональные тектонические процессы.

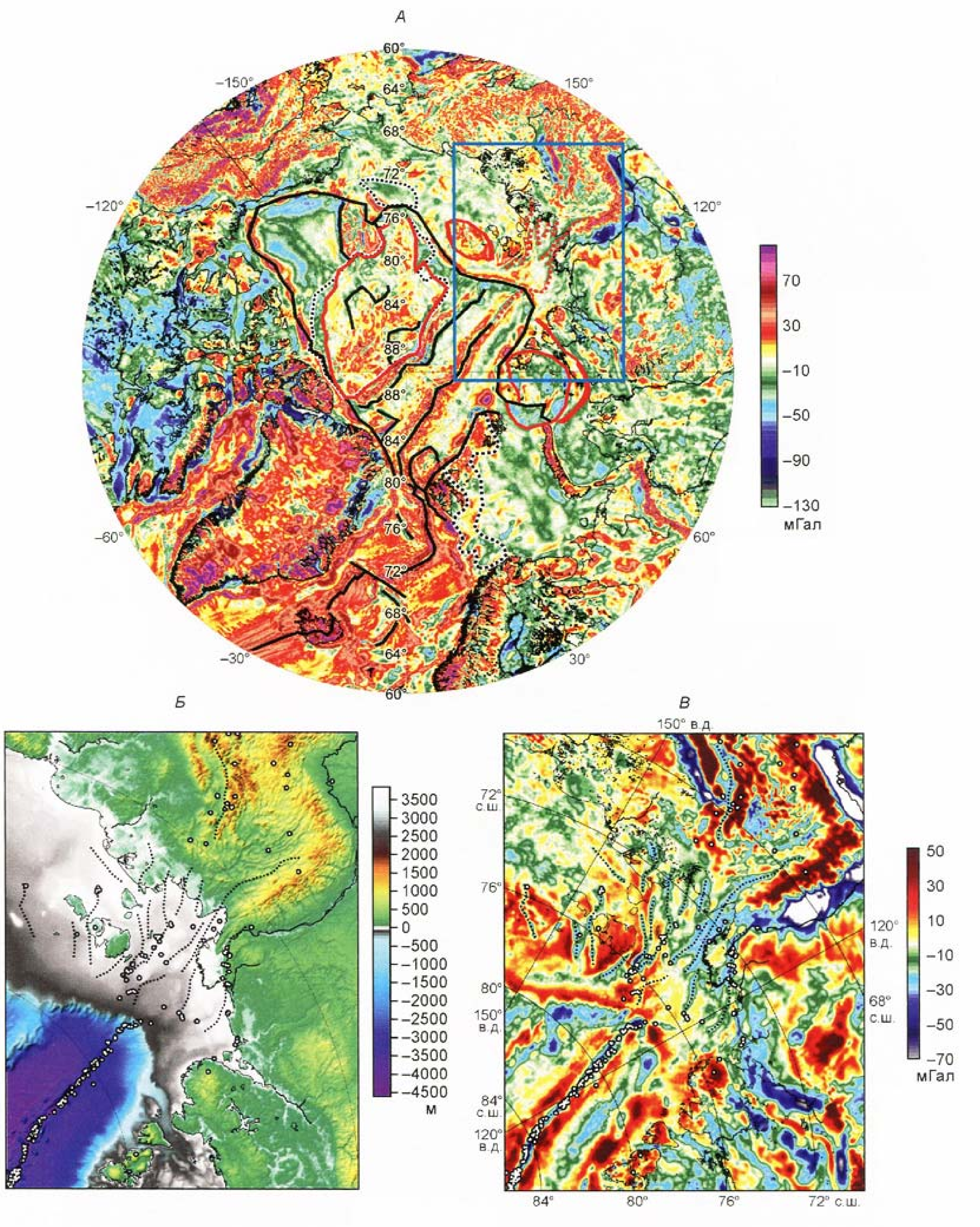


Рис. 2. Гравитационные аномалии в свободном воздухе для Арктического региона [Andersen et al., 2010].

Черным контуром (на части *А*) отмечены основные структурные элементы, выделенные по рельефу. Черным пунктиром и красным контуром показаны основные гравитационные и магнитные аномалии соответственно. Более крупно для территории вокруг моря Лаптевых показаны топография/батиметрия (*Б*) и гравитационные аномалии с более узкой цветовой шкалой (*В*). Белые точки — распределение сейсмичности из уточненного каталога ISC. Пунктирные линии — положение скрытых рифтовых долин, выделенных по гравитационным данным.

Пример получения важной геологической информации при анализе гравиметрических данных продемонстрирован на рис. 2, В для области моря Лаптевых, где предполагается наличие продолжения хр. Гаккеля. Детальный анализ гравитационных и магнитных данных и результаты численного моделирования геологических процессов в коре этого региона приведены в работе [*Piskarev et al., 1999*]. Как отмечено в предыдущем разделе, батиметрия шельфа моря Лаптевых чрезвычайно гладкая и не позволяет выявить какие-либо контрастные структуры на дне, которые можно было бы соотнести с активными тектоническими процессами. С другой стороны, гравитационные аномалии в свободном воздухе для этой области чрезвычайно неоднородные и отчетливо показывают линейные отрицательные аномалии, которые можно интерпретировать как скрытые рифтовые долины, заполненные осадками с пониженной плотностью. Эти параллельно ориентированные аномалии совпадают с распределением сейсмичности, что, в свою очередь, показывает, что процесс спрединга, сконцентрированный вдоль узкой линии хр. Гаккеля в Евразийском бассейне, в шельфовой части сильно рассеян и покрывает большую территорию моря Лаптевых. Эта зона может быть продлена в континентальные области, где наблюдаются активные складчатые системы, такие как Верхоянская зона. Заметим, что области рассеянного спрединга в некоторых участках совпадают с проявлениями кайнозойского базальтового вулканизма [*Добрецов и др., 2013*].

Мы полагаем, что конфигурация высокочастотных гармоник гравитационного поля может быть индикатором для выделения блоков коры с различными особенностями тектонической эволюции. На основании геометрического анализа аномалий (см. рис. 2, А) мы выделили красными линиями некоторые структурные блоки, которые кажутся нам наиболее важными для дальнейших реконструкций.

Магнитные аномалии. На рис. 3 представлена карта магнитных аномалий Земли, скомпилированная на сетке в 2 угловые минуты по данным спутниковых, воздушных и морских магнитных измерений [*Maus et al., 2009*]. Аномалии магнитного поля могут нести важную информацию о происхождении некоторых блоков земной коры. В большинстве случаев эта информация оказывается независимой от особенностей топографии и гравитационного поля.

Одной из наиболее ярких особенностей магнитного поля в изучаемом регионе является четкое прослеживание линейных магнитных аномалий в северной части Атлантического океана и Евразийском бассейне, которые представляют собой изохроны постепенного раскрытия океанического дна. Эти линейные магнитные аномалии могут быть использованы для реконструкции процессов спрединга в кайнозое, что и будет показано далее. Отметим, что в Канадском бассейне никаких линейных магнитных аномалий, которые можно было бы связать с процессом спрединга, не обнаружено.

Другая значительная особенность - высококонтрастная неоднородная зона (см. рис. 3, (1)), обнаруженная в срединной части Северного Ледовитого океана, которая распространяется на бассейн Макарова, хр. Альфа-Менделеева и смежные области Канадского бассейна. Характерная структура магнитных аномалий выглядит морфологически единообразной по всему этому блоку, и явно отличается от окружающих океанических областей. На основании этого можно предположить, что эта аномальная зона существовала как единый блок, возможно, неокеанической природы. Заметим, что схожую по форме область можно выделить и по специфической структуре гравитационных аномалий (оконтурена красным, см. рис. 2). Вместе с тем на карте рельефа морского дна эта зона представлена абсолютно различными морфологическими структурами (глубоководные впадины, морские плато и хребты) и не выглядит как единый тектонический блок. Можно предположить, что на определенном этапе этот блок откололся от какой-то континентальной окраины. Далее, в течение достаточно длительной геологической истории, морфология коры этой области была сильно изменена и раздроблена под воздействием различных геологических процессов (например, растяжения и сжатия). Однако «записи» магнитного поля в коре сохранили изначальный характер аномалий, несмотря на существенные изменения в структуре коры. Возможно, структурные изменения коснулись в основном нижней коры, а магнитные аномалии лучше сохранились в верхней коре.

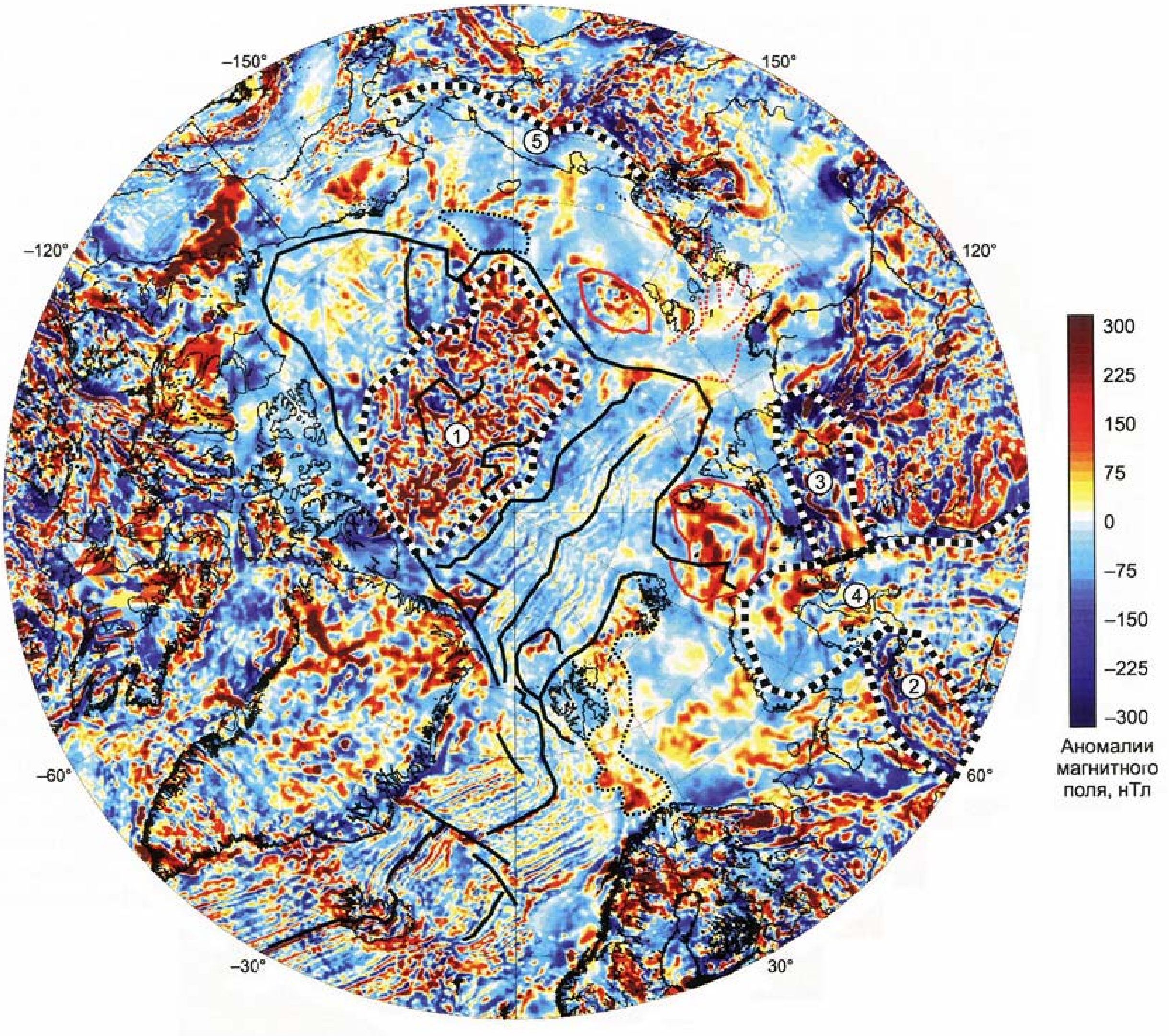


Рис. 3. Магнитные аномалии в Арктике.

Черным контуром отмечены главные структурные элементы, выделенные по топографии (см. рис. 1, *А*). Черным пунктиром и красным контуром показаны структуры, выделенные по гравитационным и магнитным данным соответственно. Цифрами отмечены структуры, которые обсуждаются в тексте.

Еще одна интересная особенность связана с кажущимся продолжением линейных магнитных аномалий на Урале (2) и Таймыре (3), имеющих схожую конфигурацию «магнитного орнамента», которые срезаются с обеих сторон субмеридиональными линиями. На основании этого можно предположить, что эти складчатые пояса были изначально единой линейной структурой, а затем были разделены вследствие выдвижения на север блока Карского моря и прилегающей части Западно-Сибирской платформы (4). В этом контексте Новая Земля представляет собой сегмент Урало-Таймырской цепи, который был перемещен на север.

Карта аномалий магнитного поля позволяет выявить положение Анюйской сутуры на Чукотке и в Якутии (5), которая прослеживается в виде границы между относительно гладкими аномалиями на севере и чрезвычайно контрастными на юге. Вдоль этого шва, как будет показано ниже, располагалась зона субдукции и шло закрытие Анюйского океанического бассейна в позднем триасе. Эта граница проявляется также в тектонических реконструкциях других авторов, например [*Соколов и др., 2010*].

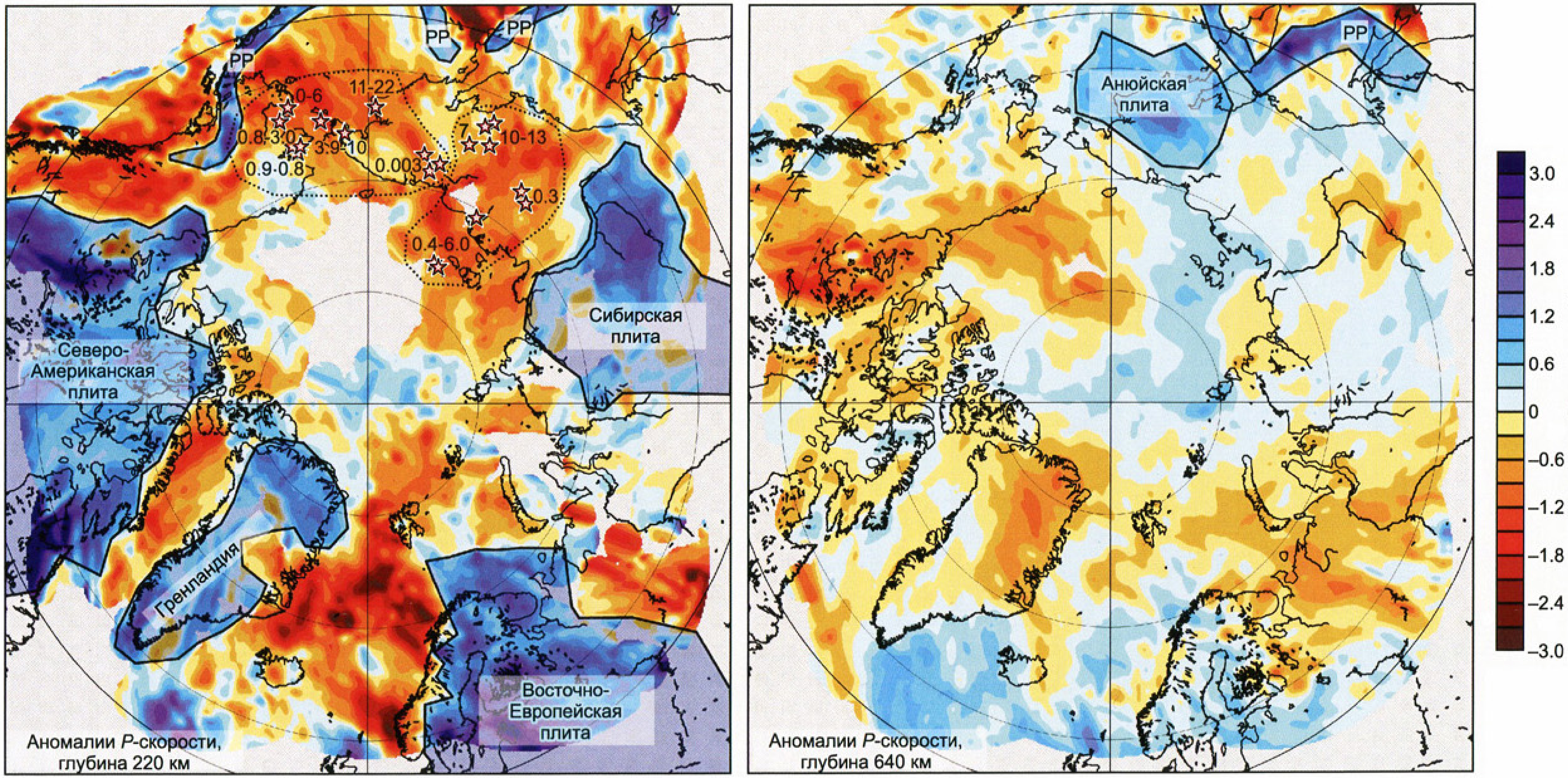
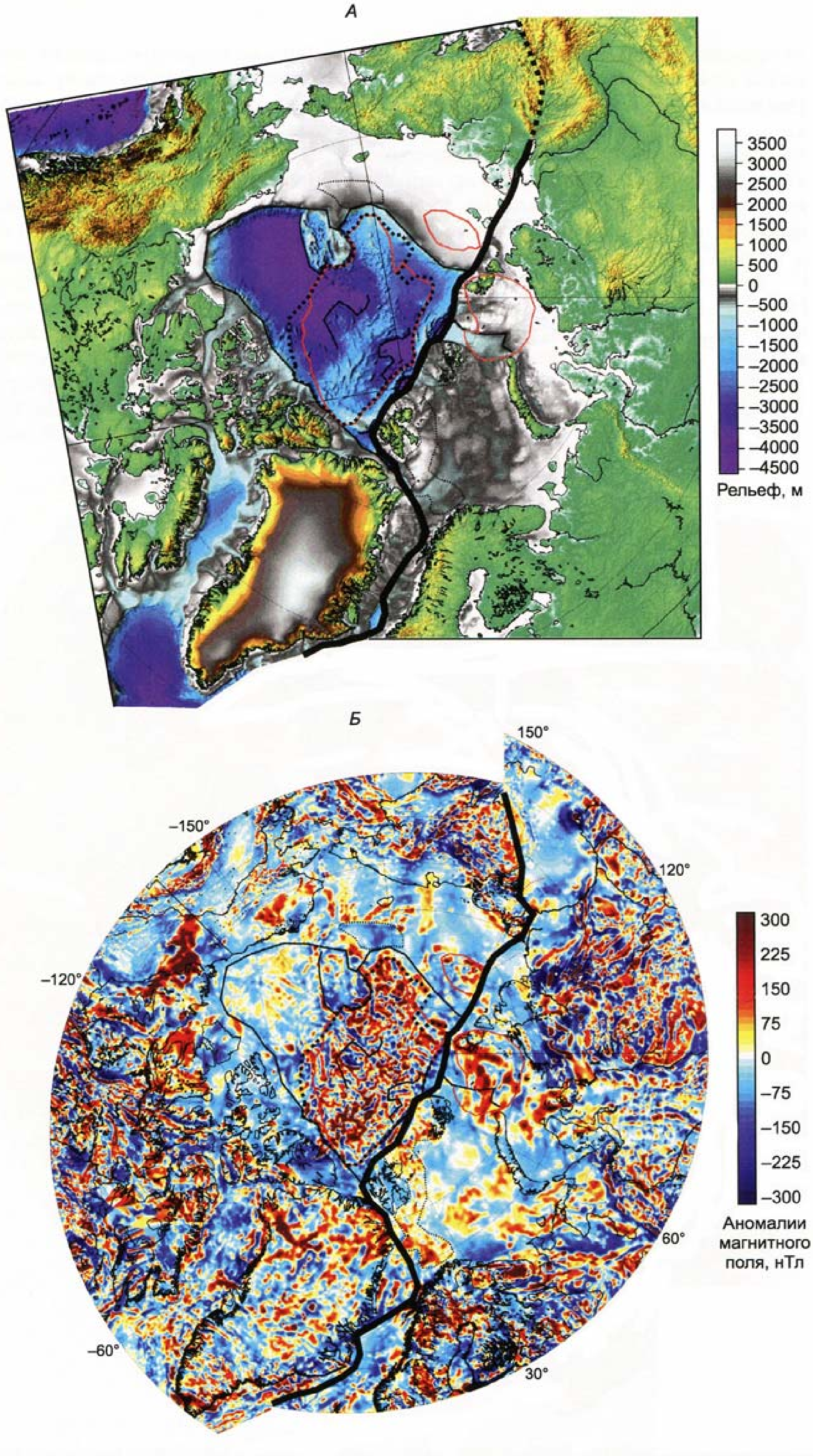


Рис. 4. Аномалии скорости *P*-волн на глубинах 220 и 640 км согласно результатам региональной сейсмической томографии [Яковлев и др., 2012].

Звездочками показаны очаги кайнозойского вулканизма с указанием возраста (млн лет). На глубине 220 км синим выделены высокоскоростные аномалии, которые ассоциируются с утолщенной литосферой кратонного типа.

А



Б

Рис. 5. Реконструкция плитных перемещений на момент начала раскрытия Евразийского и Северо-Атлантического бассейнов (54 млн лет), путем поворота Северо-Американской плиты на картах топографии (*А*) и магнитного поля (*Б*).

Сейсмические аномалии в верхней мантии. На рис. 4 представлены два горизонтальных сечения сейсмической модели верхней мантии Арктического региона, опубликованной в работе [*Яковлев и др., 2012*]. Эта модель базируется на данных о временах пробега сейсмических волн для периода с 1964 по 2004 г. из глобальных каталогов Международного сейсмологического центра [*ISC, 2001*]. Для построения модели использованы как данные о региональных землетрясениях, зарегистрированные международными станциями, так и об удаленных землетрясениях, которые были записаны станциями, расположенными внутри региона. Алгоритм томографической инверсии был разработан ранее в работе [*Koulakov et al., 2002*] и неоднократно применялся для изучения структур мантии под различными территориями мира [*Koulakov, 2011; Кулаков и др., 2011*]. Малое количество станций и землетрясений в платформенных областях и океанах приводит к существованию неосвещенных областей, где данные по сейсмической модели отсутствуют. Вместе с тем, насколько можно судить из синтетического моделирования, выполненного в работе [*Яковлев и др., 2012*], для областей, где сейсмические аномалии показаны, они восстанавливаются достаточно надежно.

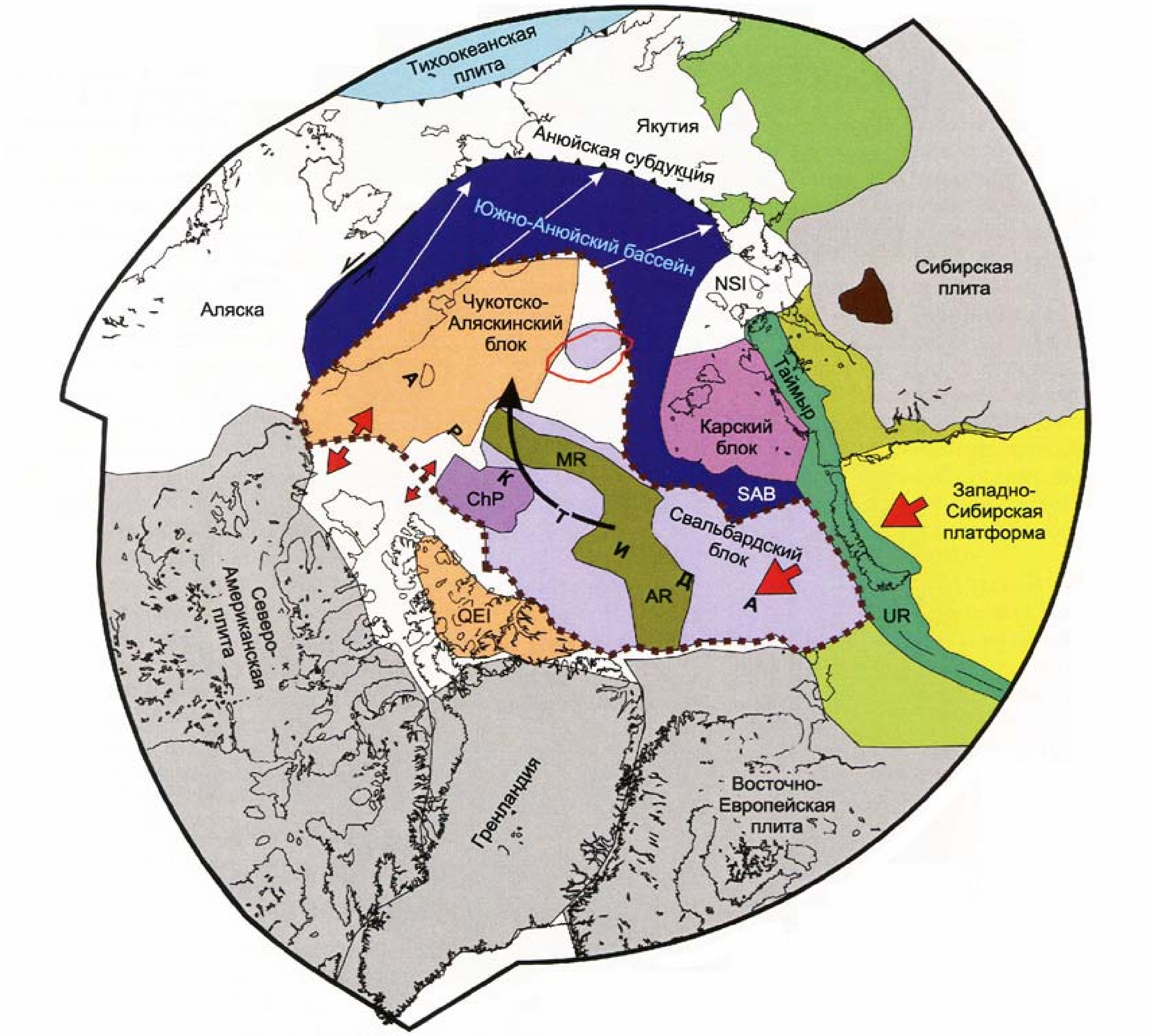


Рис. 6. Конфигурация основных структурных элементов в Арктическом регионе на первом рассмотренном этапе реконструкции, соответствующем 200—220 млн лет.

Коричневым пунктиром изображена континентальная часть плиты Арктида. UR — Урал.

Аномалии скорости на верхних сечениях модели (220 км, см. рис. 4, А) в целом отражают структуру литосферы Арктики. На качественном уровне наблюдается соответствие с ранее опубликованными моделями литосферы в данном регионе [*Artemieva, 2011*], основанными на мультидисциплинарном анализе данных. Можно видеть, что крупные кратонные блоки, такие как Северо-Американская, Сибирская, Восточно-Европейская плиты и Гренландия, проявляются в томографической модели как высокоскоростные аномалии. В областях активного орогенеза в Якутии, на Чукотке и Аляске, где литосфера, как предполагается, более слабая и тонкая, сейсмическая модель демонстрирует низкоскоростные аномалии. Информация о сейсмических аномалиях на глубине 220 км, представленная на рис. 4, А, использована нами для уточнения границ основных литосферных блоков в геодинамических схемах, которые обсуждаются в следующем разделе статьи.

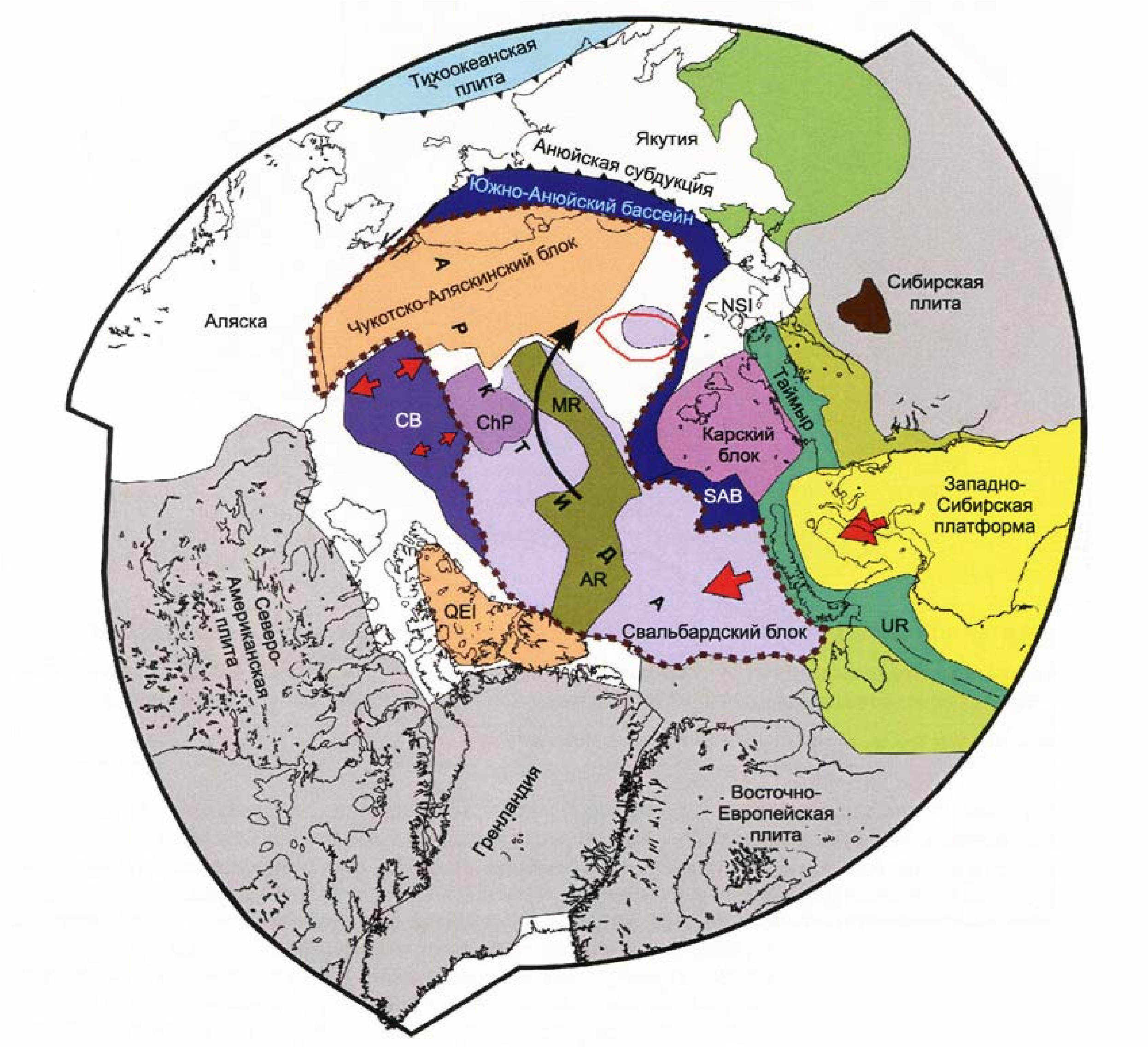


Рис. 7. Конфигурация основных структурных элементов в Арктическом регионе на втором этапе реконструкции, соответствующем 150—160 млн лет.

Коричневым пунктиром изображена континентальная часть плиты Арктида. CB — Канадский бассейн.

Для океанических областей плотность сейсмических данных в большей части изучаемой области невысокая. Под такими районами томографическая модель не может обеспечить достаточное разрешение. В областях, где устойчивый результат все же получен, отчетливой корреляции с рельефом дна океана практически не наблюдается. Под территорией Северной Атлантики в модели обнаруживаются значительные низкоскоростные аномалии, которые, вероятно, являются следами Исландского плюма и восходящих (горячих) мантийных потоков, которые вызывают активный спрединг в этом сегменте океана. В Арктическом бассейне вдоль хр. Гаккеля явно выраженной единой тенденции в распределении аномалий не наблюдается. Там низкоскоростные аномалии чередуются с высокоскоростными, что, возможно, свидетельствует о пассивном характере раздвижения океанического дна в Евразийском бассейне. Косвенным подтверждением этого предположения может служить малое количество магматического материала и нерегулярное его распределение вдоль оси спрединга, по оценкам [*Cochran et al., 2003*].

Важной структурной особенностью сейсмотомографической модели изучаемого региона является наличие следов погружающейся Тихоокеанской плиты под Аляской, Алеутской дугой и Камчаткой на глубине 220 км. Эти результаты уже были описаны в отдельной работе, посвященной Курило-Камчатской и Алеутской зонам субдукции [*Кулаков и др., 2011*]. Следует заметить, что зона субдукции с высококонтрастным слэбом, положение которого можно также оценить по распределению глубинной сейсмичности, является хорошим тестом для проверки работоспособности алгоритмов сейсмической томографии и надежности полученных сейсмических моделей.

В нижней части модели (глубина 640 км, см. рис. 4), распределение лучей в изучаемой области становится более равномерным и почти не имеет пробелов. На этом срезе можно проследить нижнюю часть слэба Тихоокеанской плиты под Камчаткой и Курильскими островами. Вместе с тем самая контрастная высокоскоростная аномалия расположена под Чукоткой и Якутией и кажется не связанной с аномалиями Тихоокеанского слэба. В работе [*Яковлев и др., 2012*] выдвинуто предположение, что эта контрастная аномалия отражает след зоны субдукции, имевшей место в Арктике в мезозое. Этот результат подтверждает гипотезу о закрытии Анюйского бассейна посредством субдукции вдоль Анюйского шва. Наблюдаемая высокоскоростная аномалия на глубине 640 км, которая обозначена на рис. 4 как «Анюйская аномалия», вероятно, отражает местоположение материала слэба в переходной зоне, оставшейся с позднего триаса.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЭТАПОВ НА ПРОТЯЖЕНИИ ПРОШЕДШИХ 200 МЛН ЛЕТ

Для реконструкции эволюции плит изучаемого региона начиная с позднего триаса (около 200 млн лет) была использована вся описанная выше доступная информация. Кайнозойская стадия раскрытия северной части Атлантического океана и Евразийского бассейна однозначно восстанавливается по батиметрическим и магнитным картам (рис. 5). В этом случае вращение Американской плиты относительно Евразийской приводит к почти идеальному совпадению контуров глубоководных Атлантического и Евразийского бассейнов. Стадию и начальное время раскрытия для этого события можно оценить с достаточно высокой точностью, используя линейные магнитные аномалии в Евразийском бассейне и Северной Атлантике.

Для более ранних эпизодов развития Арктики, к сожалению, не существует прямых данных, которые позволили бы однозначно проследить эволюцию плит. В настоящей работе мы предлагаем сценарий развития региона на мезокайнозойских стадиях, который несколько отличается от моделей, предложенных другими авторами. Согласно нашей модели, в эволюции Арктики от позднего триаса до настоящего времени можно выделить пять этапов (рис. 6-10).

На рис. 6 показано расположение главных структур на первом этапе, который соответствует возрасту приблизительно 200-220 млн лет. Мы предполагаем, что в этот период Северо-Американская плита, Гренландия и Восточно-Европейская плита были в составе единого континента, что не противоречит большинству реконструкций других авторов [*Ziegler, 1988; Lawver et al., 2002; Верниковский и др., 2013*]. Мы определяем геометрию этих кратонных блоков, основываясь на результатах томографии (см. рис. 4, А из работы [*Яковлев и др., 2012*]).

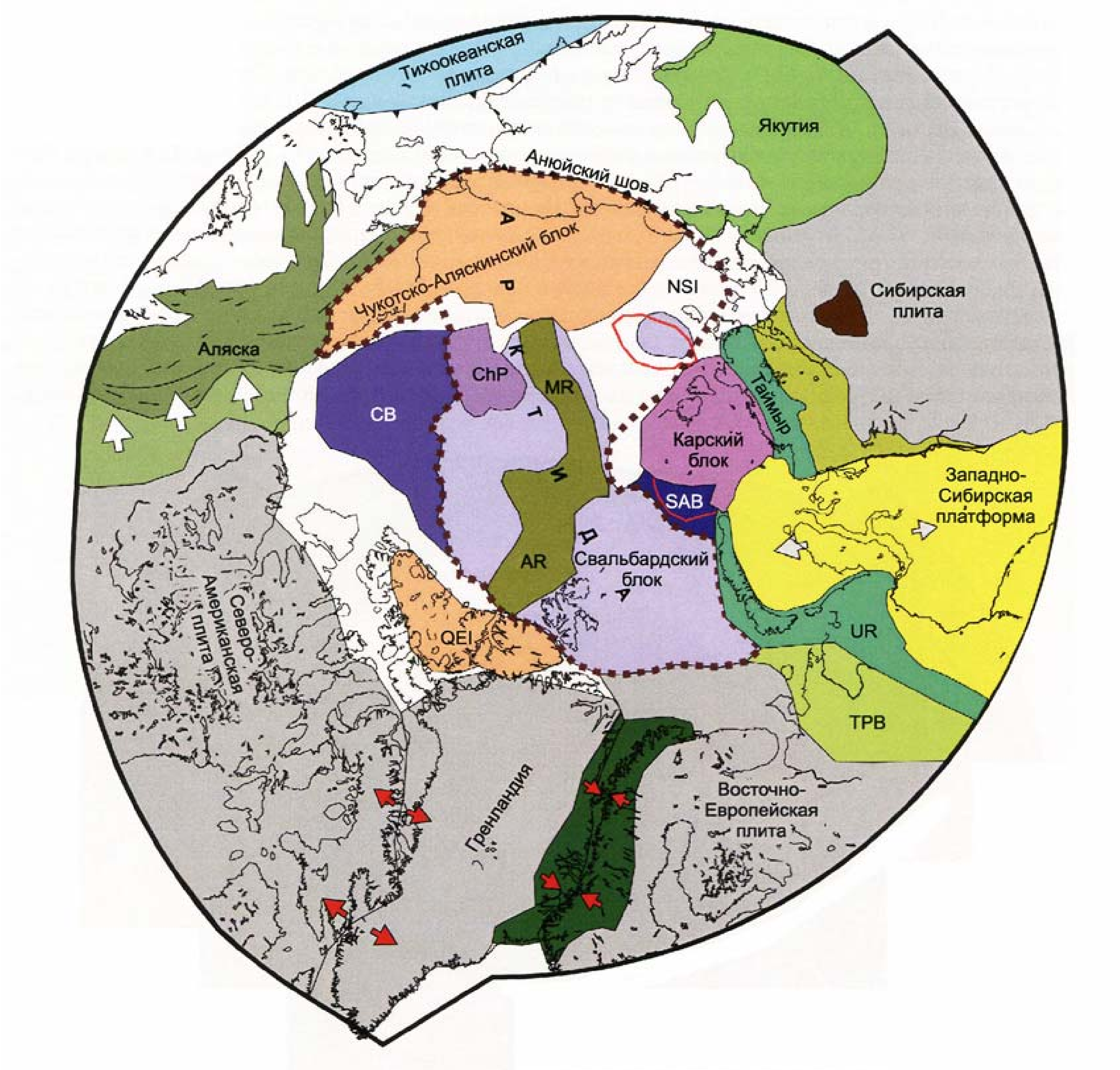


Рис. 8. Конфигурация основных структурных элементов в Арктическом регионе на третьем этапе реконструкции, соответствующем 120—130 млн лет.

Коричневым пунктиром изображена континентальная часть плиты Арктида.

Согласно нашей реконструкции, основанной на вышеприведенных геофизических данных, а также геологической информации из литературы, в центральной части Арктического региона располагалась крупная плита Арктида (см. рис. 6). Возможность существования такой плиты в Арктическом бассейне подтверждается некоторыми другими исследователями [*Филатова, Хаин, 2010; Верниковский и др., 2013*]. Мы полагаем, что в мезозойское время эта плита состояла из океанической части (Южно-Анюйский бассейн) и сложно построенной континентальной части, составленной из блоков различного типа, таких как Чукотско-Аляскинский блок, соответствующий шельфовой области Восточно-Сибирского моря, Чукотское плато (ChP), блок хр. Альфа-Менделеева, а также блок Свальбард. Детали этой структуры показаны на тектонической карте в статье [*Верниковский и др., 2013*]. Мы предполагаем, что на нынешнем месте хр.

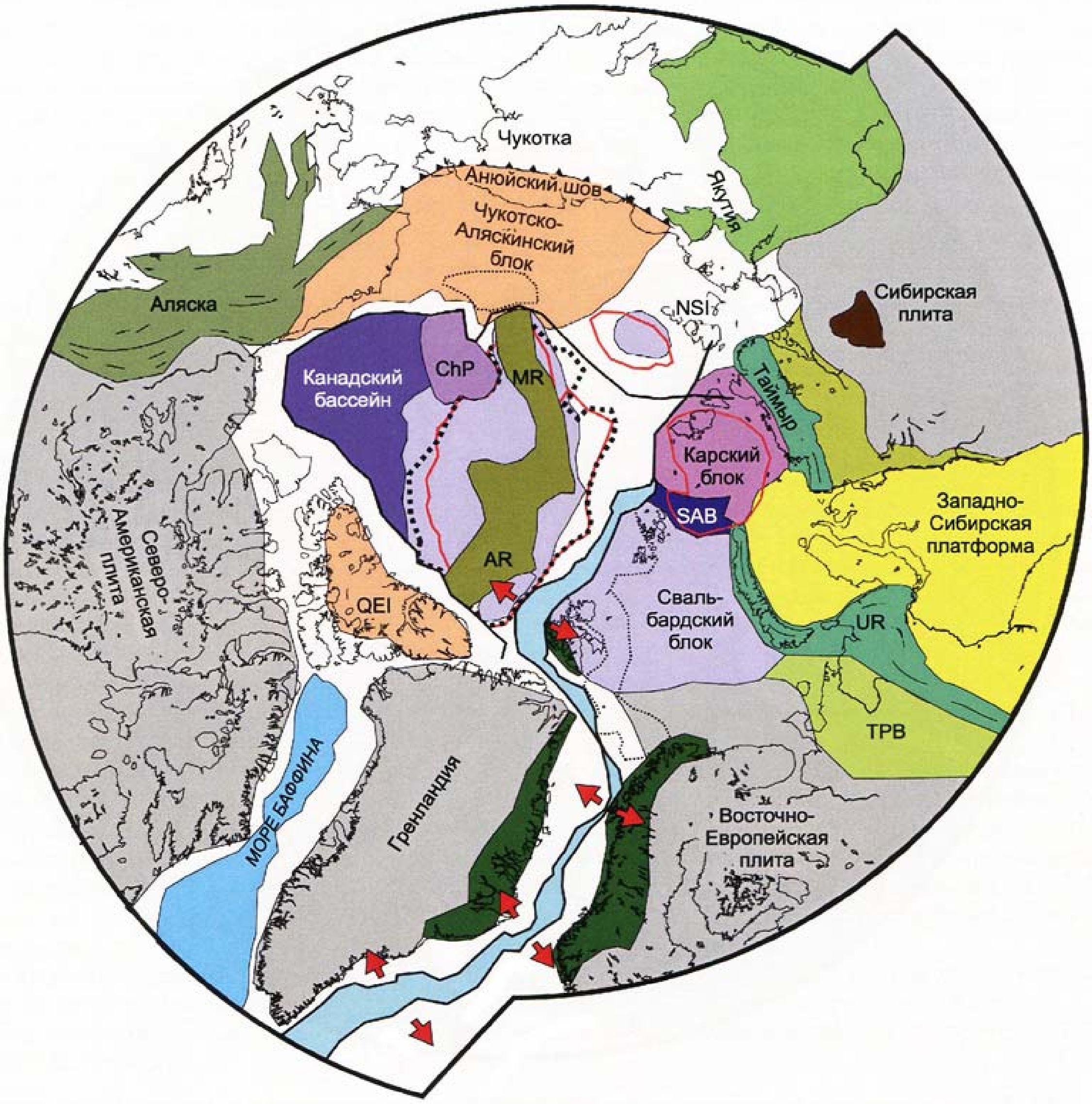


Рис. 9. Конфигурация основных структурных элементов в Арктическом регионе на четвертом этапе реконструкции, соответствующем 50—60 млн лет.

Черным и красным пунктиром показаны структуры, выделенные по магнитным и гравитационным данным соответственно.

Альфа-Менделеева находился изометрический континентальный блок, форму которого можно выделить по конфигурации магнитных аномалий (область (1), см. рис. 3), который был частично разрушен на поздних этапах. Согласно нижеприведенной реконструкции, в юрское и меловое время плита Арктида вращалась как единое целое по часовой стрелке относительно центра, расположенного в районе Карского моря. Главной движущей силой этого вращения была субдукция вкрест Анюйского шва с погружением океанической плиты Южно-Анюйского бассейна, обладавшей отрицательной плавучестью. Следы субдукции, двигавшейся на юг вкрест Анюйского шва, были обнаружены по данным сейсмических исследований на отраженных волнах [*Franke et al., 2008*]. Вращение плиты Арктида породило процессы рифтогенеза на участке между Чукотским плато и Северо-Американской плитой, что на последующих этапах привело к раскрытию Канадского бассейна (CB). Такая кинематика предполагает чистый правосторонний сдвиг вдоль границы между Арктидой и Аляской, что означает отсутствие сжатия или растяжения в этом сегменте границы Арктиды. Заметим, что к подобному заключению привел и анализ базальтов Анюйского шва [*Кузмичев, Лебедев, 2008*], показавший, что в мезозое Южно-Анюйский океан не распространялся западнее Чукотки. Согласно нашей модели, Южно-

Анюйский бассейн был отделен от Тихого океана, и процессы субдукции в Арктическом и Тихоокеанском бассейнах протекали независимо. Такая точка зрения отличается от некоторых предыдущих реконструкций [*Scotese, 2001*], которые отдают главную роль в формировании структур Анюя и Чукотки Тихоокеанской субдукции. Нет прямых фактов, которые разрешили бы это противоречие, однако косвенная информация, такая как присутствие высокоскоростного материала под Чукоткой на глубине 600 км [*Яковлев и др., 2012*], особенности структуры коры по данным интерпретации сейсмических профилей [*Franke et al., 2008*] и палеомагнитные реконструкции [*Верниковский и др., 2013*] могут свидетельствовать в пользу нашей концепции.

Мы предполагаем, что на этом этапе Урал, Новая Земля и Таймыр составляли единую линейную складчатую систему, которая отделяла Арктиду от Сибирского кратона и Западно-Сибирской платформы. Сходство структурных особенностей систем Таймыра и Урала, которые могут подтвердить их единство в геологической истории, прослеживается на карте магнитных аномалий (см. структуры, обозначенные 2 и 3 на рис. 3).

Реконструкция плит для следующей стадии, соответствующей верхней юре (150-160 млн лет), показана на рис. 7. В течение этого периода мы предполагаем одновременное закрытие Южно-Анюйского бассейна вследствие продолжающейся субдукции и раскрытие Канадского бассейна. Заметим, что вращение Арктиды должно было привести к активному растяжению относительно ослабленной мезозойской литосферы Западно-Сибирской платформы в тылу Свальбардской плиты. В результате, сегмент Новой Земли из Урало-Таймырского складчатого пояса переместился к северу, сформировав петлю.

Третья стадия нашей реконструкции (рис. 8) соответствует раннемеловому этапу (120-130 млн лет). На данном этапе вращение Арктиды закончилось, а Южно-Анюйский бассейн полностью закрыт. Мы считаем, что с этого времени конфигурация Канадского бассейна и форма линии Урал - Новая Земля - Таймыр изменялась незначительно. Приблизительно в это время началось отделение Гренландии от Северо-Американской плиты. Возможно, растяжение на месте нынешнего моря Баффина стало причиной сжатия литосферы Аляски, что, в свою очередь, вызвало активное горообразование. С другой стороны, сжатие между Гренландией и Восточно-Европейской плитой привело к горообразованию в Скандинавии. На более поздних стадиях (ранний кайнозой, рис. 9) этот процесс перешел в растяжение и привел к отделению Гренландии от Европы и началу раскрытия Северо-Атлантического бассейна.

Процессы, происходившие в кайнозое, можно оценить путем сравнения между стадиями 4 (см. рис. 9) и 5 (рис. 10). За этот период произошло вращение Северо-Американской плиты по часовой стрелке приблизительно на 15° относительно центра, расположенного у северной оконечности Верхоянского хребта, с одновременным правосторонним латеральным смещением на ~ 250-300 км. Аналогичные параметры смещений приводятся другими авторами в более ранних работах [*Lawver et al., 2002*]. Это движение привело к раскрытию Северной Атлантики и Евразийского бассейна. Как уже говорилось, при реконструкции этой стадии использован факт почти идеального соответствия конфигурации краев бассейнов по батиметрическим и магнитным данным (см. рис. 5). Ось вращения плиты располагалась вблизи береговой линии. В связи с этим раздвижение морского дна вкрест оси спрединга с одной стороны от оси привело к сжатию с континентальной стороны.

Важно заметить, что основные стадии, описанные в этом разделе, соответствуют семи стадиям постмезозойского вулканизма [*Добрецов и др., 2013*]. В частности, ближайшая к современности стадия коррелирует с продлением хр. Гаккеля в береговую область, где происходят самые активные деформации, вызванные относительным вращением Северо-Американской и Евразийской плит. Кроме того, эта область совпадает с отчетливой низкоскоростной сейсмической аномалией в верхах мантии, как показано на рис. 4, которую можно объяснить наличием астеносферного поднятия или мантийных плюмов. Более древние стадии вулканизма, относящиеся к позднему мезозою, укладываются в нашу концепцию субдукции в районе Анюйского шва, которая предполагается в то время.

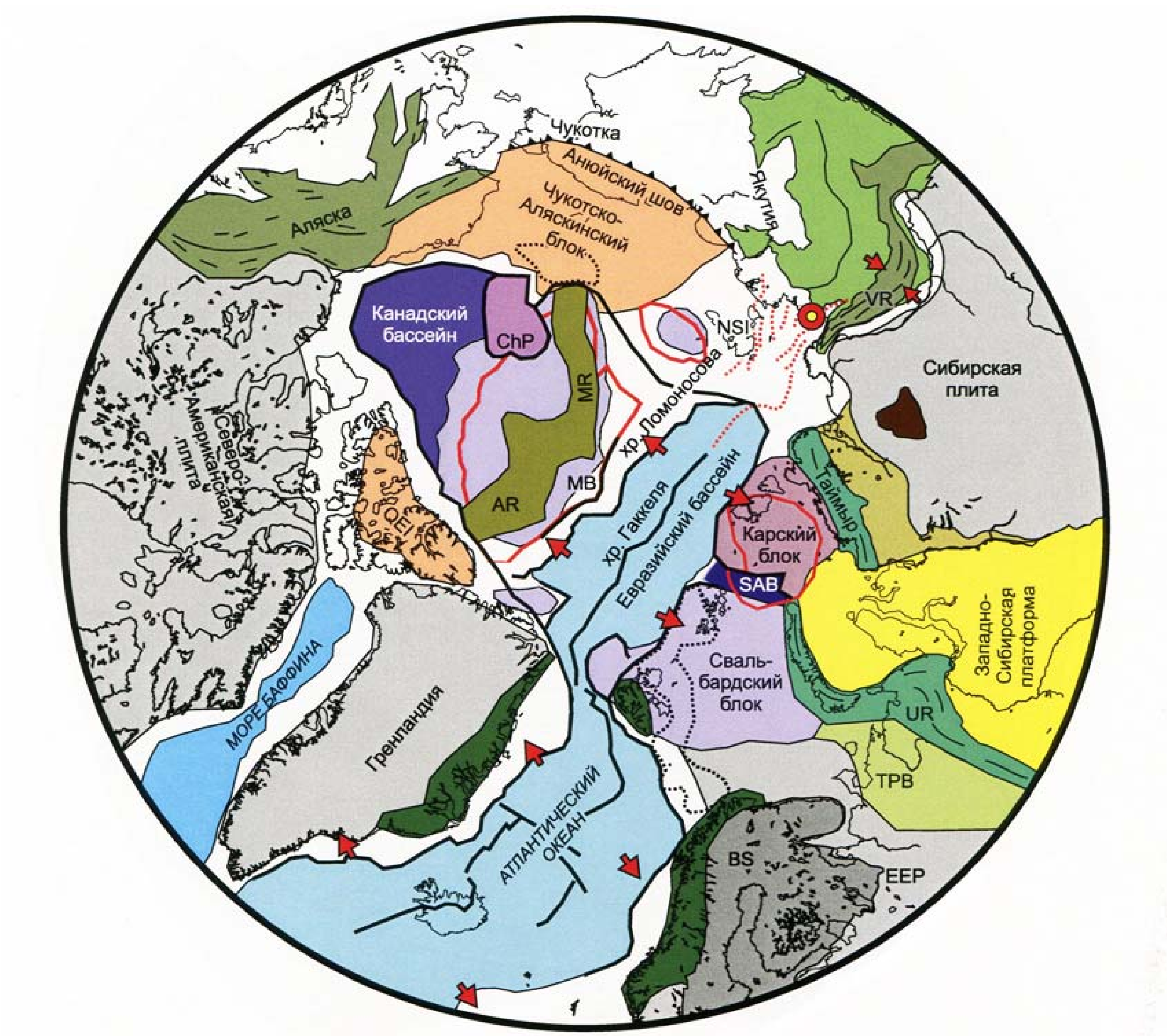


Рис. 10. Упрощенная конфигурация основных структурных элементов в Арктическом регионе на современном (пятом) этапе.

Сплошными контурами обозначены основные топографические структуры. Черным и красным пунктиром показаны структуры, выделенные по магнитным и гравитационным данным соответственно.

ВЫВОДЫ

На основании комплексного анализа различных геофизических данных мы построили новую геодинамическую модель Арктического региона и представили реконструкцию эволюции плит на протяжении прошедших 200 млн лет. В частности, распределение магнитных аномалий позволило выявить блоки схожего происхождения, которые в настоящее время на картах топографии/батиметрии морфологически не прослеживаются. Высокочастотные гравитационные аномалии в свободном воздухе могут быть использованы для обнаружения следов тектонической деформации, проявленной в рельефе фундамента скрытого осадками. Границы кратонных блоков были определены, исходя из результатов регионального томографического моделирования, которые отчетливо показывают корни континентальной литосферы на глубине ~ 200 км.

Мы утверждаем, что в период времени между 220 и 120 млн лет главными событиями в тектоническом развитии Арктики были субдукция Анюйского океанического бассейна и вращение Арктиды - плиты, сформированной из блоков различной природы. Смещение этой плиты вызвало одновременное закрытие Южно-Анюйского океана и раскрытие Канадского бассейна. Кроме того, этот процесс мог вызвать растяжение земной коры между Баренцевым морем и Западно-Сибирской платформой, что привело к формированию петлеобразной структуры, включающей северный Урал, Новую Землю и Таймырскую складчатую систему.

В то же самое время необходимо признать, что в некоторых аспектах наша модель все еще неоднозначна и не всегда полностью обоснованна, что связано с недостатком достоверной и надежной информации. По некоторым пунктам этой реконструкции даже соавторы данной статьи не достигли абсолютного согласия. Вместе с тем надо учесть, что это исследование представляет собой начало сотрудничества между российским и норвежским коллективами в рамках совместного международного проекта. Мы надеемся, что тесное сотрудничество позволит объединять больше данных и получать более достоверные реконструкции.

Авторы благодарны академику РАН М.И. Кузьмину и чл.-кор. РАН В.А. Верниковскому за плодотворные критические замечания, которые позволили внести существенные изменения в статью.

Это исследование выполнено при поддержке совместного российско-норвежского проекта РФФИ (12-05-93085 Норв_а).

ЛИТЕРАТУРА

Аветисов Г.П. О границе литосферных плит на шельфе моря Лаптевых // ДАН, 2002, т. 385, № 6, с. 793-796.

Богданов Н.А. Тектоника Арктического океана // Геотектоника, 2004, № 3, с. 13-30.

Верба В.В., Ким Б.И., Волк В.Э. Строение земной коры Арктического региона по геофизическим данным // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 2. СПб., ВНИИОкеангеология, 1998, с. 12-28.

Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю. Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1083-1107.

Виноградов В.А., Каменева Г.И., Явшиц Г.П. О Гиперборейской платформе в свете новых данных по геологическому строению острова Генриетты // Тектоника Арктики. Вып. 1. Л., НИИГА, 1975, с. 21-25.

Грамберг И.С., Волк В.Э., Губернов А.П., Киселев Ю.Г. Глубинное строение земной коры Северного Ледовитого океана // Сов. геология, 1992, № 6, с. 47-55.

Грамберг И.С., Верба В.В., Кудрявцев Г.А., Сорокин М.Ю., Харитонова Л.Я. Структура земной коры Северного Ледовитого океана по геотраверсу острова Де-Лонга - котловина Макарова // ДАН, 1993, т. 328, № 4, с. 484-486.

Гуревич Н.И., Глебовский В.Ю. Краткий обзор тектонических концепций образования Амеразийского суббассейна (Северный Ледовитый океан) // Российский геофизический журнал, 2004, № 33-34, с. 38-51.

Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В., Кораго Е.А., Симонов В.А. Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1126-1144.

Егоров А.С. Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотраверсов России). СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2004, 199 с.

Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М. Тектоническая история Арктики // Актуальные проблемы тектоники океанов и континентов. М., Наука, 1987, с. 31-57.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М., Недра, 1990, кн. 1 - 327 с., кн. 2 - 336 с.

Каминский В.Д. Анализ аномального магнитного поля трех подводных гор хребта Гаккеля // Проблемы геофизических исследований полярных областей Земли. Вып. 12. Л., НИИГА, 1977, с. 127-133.

Карасик А.М. Магнитные аномалии хребта Гаккеля и происхождение Евразийского суббассейна Северного Ледовитого океана // Геофизические методы разведки в Арктике. Вып. 5. Л., НИИГА, 1968, с. 8-19.

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.

Киселев Ю.Г. Земная кора Северного Ледовитого океана (особенности строения и стадии развития) // Структура земной коры Мирового океана. Л., ПГО «Севморгеология», 1984, с. 19-37.

Киселев Ю.Г., Деменицкая Р.М. Хребет Менделеева - погруженная структура Канадско-Гренландской литосферной плиты // Геофизические методы разведки в Арктике, 1974, вып. 9, с. 102-104.

Кузьмичев А.Б., Лебедев В.А. О возрасте океанических базальтов на о. Большой Ляховский (Новосибирские острова): к вопросу о западной границе Южно-Анюйского океана в юрское время // ДАН, 2008, т. 421, № 5, с. 653-657.

Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (6), с. 830-851.

Леонов В.О. Тип земной коры хребтов Альфа и Менделеева в свете корреляционного анализа магнитометрических и батиметрических данных // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 3. СПб., ВНИИОкеангеология, 2000, с. 33-38.

Нарышкин Г.Д. Срединный хребет Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана. М., Наука, 1987, 72 с.

Пискарев А.Л. Строение фундамента Евразийского бассейна и центральных хребтов Северного Ледовитого океана // Геотектоника, 2004, № 6, с. 49-66.

Погребицкий Ю.Е. Геодинамическая система Северного Ледовитого океана и ее структурная эволюция // Советская геология, 1976, № 12, с. 3-22.

Пущаровский Ю.М. Тектоника Северного Ледовитого океана // Геотектоника, 1976, № 2, с. 3-14.

Рекант П.В., Гусев Е.А. Сейсмогеологическая модель строения осадочного чехла прилаптевоморской части хр. Ломоносова и прилегающих частей глубоководных котловин Амундсена и Подводников // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (11), с. 1497-1512.

Соколов С.Д., Тучкова М.И., Бондаренко Г.Е. Тектоническая модель Южно-Анюйской сутуры и ее роль в формировании структур Восточной Арктики // Строение и история развития литосферы. М., Paulsen, 2010, с. 204-227.

Филатова Н.И., Хаин В.Е. Кратон Арктида и неопротерозойские-мезозойские орогенные пояса Циркумполярного региона // Геотектоника, 2010, № 3, с. 3-29.

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М., Научный мир, 2001, 606 с.

Хуторской М.Д., Подгорных Л.В., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. Термотомография Западно-Арктического бассейна// Геотектоника, 2003, № 3, с. 79-96.

Шатский Н.С. О тектонике Арктики // Избранные труды. Т. 1. М., АН СССР, 1963, с. 426-444.

Шипилов Э.В., Верниковский В.А. Строение области сочленения Свальбардской и Карской плит и геодинамические обстановки ее формирования // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (1), с. 75-92.

Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (10), с. 1261-1272.

Alvey A., Gaina C., Kusznir N.J., Torsvik T.H. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic // Earth Planet. Sci. Lett., v. 274 (2008), p. 310-321.

Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 p., March 2009.

Andersen O.B., Knudsen P., Berry P. The DNSC08GRA global marine gravity field from double re-tracked satellite altimetry // J. Geodesy, 2010, v. 84, № 3, DOI: 10.1007/s00190-009-0355-9.

Artemieva I. The lithosphere: an interdisciplinary approach. Cambridge University Press, 2011, 794 p.

Churkin M., Trexler J.H. Continental plates and accreted ocean terranes in the Arctic // The Arctic Ocean, 1981, p. 1-20.

Cochran J.R., Kurras G.J., Edwards M.H., Coakley B.J. The Gakkel Ridge: bathymetry, gravity anomalies, and crustal accretion at extremely slow spreading rates // J. Geophys. Res., 2003, v. 108, 2116, doi: 10.1029/2002JB001830, B2.

Drachev S.S., Malyshev N.A., Nikishin A.M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic shelves: an overview. Petroleum Geology Conference series // Geol. Soc. London, 2010, v. 7, p. 591-619, doi: 10.1144/0070591.

Embry A.F. Geological and geophysical evidence in support of the hypothesis of anticlockwise rotation of Northern Alaska // Marine Geol., 1990, v. 93, p. 317-329.

Forsyth D.A., Asudeh I., Green A.G., Jackson H.R. Crustal structure of the northern Alpha Ridge beneath the Arctic Ocean // Nature, 1986, v. 322, p. 349-352.

Franke D., Reichert C., Damm V., Piepjohn K. The South Anyui suture, Northeast Arctic Russia, revealed by offshore seismic data // Norwegian J. Geol., v. 88, p. 189-200. Trondheim 2008. ISSN 029-196X

Herron E.M., Dewey J.F., Pitman W.C. Plate tectonics model for the evolution of the Arctic // Geology, 1974, v. 2, p. 377-380.

ISC, International Seismological Centre. Bulletin Disks 1-9 [CD-ROM], Inter. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2001.

Jackson H.R., Johnson G.L. Summary of Arctic geophysics // J. Geodyn., 1986, № 6, p. 245-262.

Jackson H.R., Gunnarsson K. Reconstructions of the Arctic: Mesozoic to Present // Tectonophysics, 1990, v. 172, p. 303-322.

Jokat W. Seismic investigations along the western sector of Alpha Ridge, Central Arctic Ocean // Geophys. J. Int., 2003, № 152, p. 185-201.

Koulakov I. High-frequency P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide traveltime data // J. Geophys. Res., 2011, v. 116, B04301 doi:10.1029/2010JB007938.

Koulakov I., Tychkov S., Bushenkova N., Vasilevskiy A. Structure and dynamics of the upper mantle beneath the Alpine-Himalayan orogenic belt from teleseismic tomography // Tectonophysics, 2002, v. 358, p. 77-96.

Kristoffersen Y., Talwani M. Extinct triple junction south of Greenland and the Tertiary motion of Greenland relative to North America // Geol. Sot. Amer. Bull., 1977, v. 88, p. 1037-1049.

Lawver L.A., Grantz A., Gahagan L.M. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician // Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 360, 2002, p. 333-358.

LePichon X., Sibuet J., Franchateau J. The fit of the continents around the North Atlantic Ocean // Tectonophysics, 1977, v. 38, p. 169-209.

Maus S., Barckhausen U., Berkenbosh H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fair-head J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., *Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebault E., Tontini F.C.* EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst., 2009, v. 10, Q08005, doi:10.1029/2009GC002471.

Metelkin D.V., Vernikovsky V.A., Kazansky A.Y. Siberia - from Rodinia to Eurasia / Ed. D. Closson. Tectonics, InTech, Rijeka, Croatia. 2011, p. 103-136.

Piskarev A.L., Roeser H.A., Hinz K., Kos'ko M.K. Potential field studies on the crustal structure of the Laptev Sea and the western part of the East Siberian Sea // Polarforschung, 1999, v. 69, p. 41-50.

Pitman W.C., Talwani M. Sea-floor spreading in the North Atlantic // Geol. Sot. Amer. Bull., 1972, v. 83, p. 619-649.

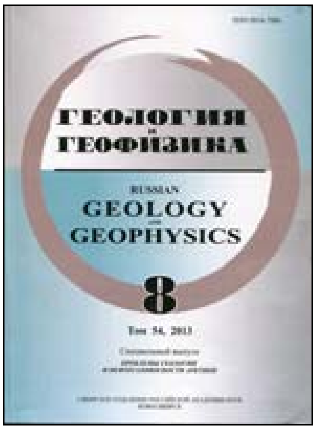
Scotese C.R. Atlas of Earth history, PALEOMAP Project, Arlington, Texas, 2001, 52 p.

Vogt P.R., Taylor P.T., Kovacs L.C., Johnson G.L. Detailed aeromagnetic investigation of the Arctic Basin // J. Geoph. Res., 1979, v. 84, № B3, p. 1071-1089.

Ziegler P.A. Evolution of the Arctic-north Atlantic and the western Tethys - a visual presentation of a series of paleogeographic-paleotectonic maps. AAPG Memoir, 1988, 43, 196 c.

Поступила в редакцию
25 февраля 2013 г.

Ссылка на статью:



Кулаков И.Ю., Гайна К., Добрецов Н.Л., Василевский А.Н., Бушенкова Н.А.
Реконструкции перемещений плит в Арктическом регионе на основе комплексного анализа гравитационных, магнитных и сейсмических аномалий // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1108-1125.