

Амеразийская микроплита в структуре и геодинамической эволюции Арктики

Шипилов Э.В.

Полярный геофизический институт КНЦ РАН, shipilov@pgi.ru

Аннотация. На основе интерпретационного анализа геолого-геофизических данных реконструируется структурно-тектоническая обстановка поздне мелового-раннекайнозойского этапа геодинамической эволюции Арктического океана. Акцентируется внимание на выделении двух крупных и протяженных трансрегиональных окраинно-континентальных зон разломов – Хатангско-Ломоносовской и Северогренландско-Канадской, активизация сдвиговых движений по которым связывается с поздне меловым-палеоценовым временем. В результате была обособлена и приведена в движение образовавшаяся новая композитная Амеразийская микроплита, которая объединила в себе блоки Арктической Аляски, Канадской котловины, Чукотского поднятия, поднятия Альфа–Менделеева, котловин Подводников и Макарова и хребта Ломоносова. Перемещение микроплиты по примерно параллельным крупным зонам сдвигов на краях Канадского арктического и Сибирско-Чукотского шельфов было направлено в сторону Тихоокеанской зоны субдукции. Движение Амеразийской микроплиты сопровождалось рифтогенезом и отрывом хребта Ломоносова от Баренцево-Карской окраины, раскрытием Евразийского бассейна в тылу хребта и трансформными смещениями – правосторонними вдоль Хатангско-Ломоносовской зоны и левосторонними вдоль Северогренландско-Канадской зоны. В результате перемещения Амеразийской микроплиты до этого единый ареал меловых платобазальтов (HALIP) был разорван, и Центрально-Арктическая провинция магматизма оказалась отделенной и отодвинутой от Баренцево-морской провинции.

Ключевые слова: Арктический океан, геодинамика, рифтогенез, спрединг, зоны сдвигов, Амеразийская микроплита.

Amerasian microplate in the structure and geodynamic evolution of the Arctic

Shipilov E.V.

Polar Geophysical Institute KSC RAS, shipilov@pgi.ru

Abstract. Structural and tectonic settings of the Late Cretaceous-Early Cenozoic stage of the geodynamic evolution of the Arctic Ocean are reconstructed based on the interpretive analysis of geological and geophysical data. The focus is made on identifying two large and extended trans-regional marginal continental fault zones, i.e. the Khatanga-Lomonosov and the North Greenland-Canadian zones. Activation of strike-slip movements along these zones is associated with the Late Cretaceous-Paleocene time. As a result, the newly formed composite Amerasian microplate was isolated and set in motion, which combined the blocks of the Arctic Alaska, the Canadian Basin, the Chukotka Uplift, the Alpha-Mendelev Uplift, the Submariners and Makarov basins and the Lomonosov Ridge. The movement of the microplate along approximately parallel large strike-slip zones at the edges of the Canadian Arctic and Siberian-Chukotka shelves was directed towards the Pacific subduction zone. The movement of the Amerasian microplate was accompanied by rifting and separation of the Lomonosov Ridge from the Barents-Kara margin, the opening of the Eurasian basin in the rear of the ridge and transform displacements - right-sided along the Khatanga-Lomonosov zone and left-sided along the North Greenland-Canadian zones. As result of the displacement of the Amerasian microplate, the previously unified area of Cretaceous platobasalts (HALIP) was torn apart, and the Central Arctic Province of magmatism was separated and moved away from the Barents Sea province.

Keywords: Arctic Ocean, geodynamics, rifting, spreading, strike-slip fault zones, Amerasian microplate.

Введение

Среди проблемных вопросов в изучении геологической истории становления океана в Арктике на первый план выступают вопросы разработки мезозойско-кайнозойских палеотектонических реконструкций и геодинамических моделей формирования глубоководных структур. Нерешенные вопросы в основном сводятся к тому, что существующее множество предложенных тек-

тонических реконструкций не в состоянии преодолеть проблемы перекрытия плит или наоборот, зияний между ними, а также объяснить отсутствие или присутствие деформаций литосферы, обусловленных кинематикой перемещения и взаимодействием плит (микроплит). При этом ситуация осложняется тем, что интерпретация одних и тех же геолого-геофизических исходных данных у различных авторов приводит зачастую к совершенно разноплановым и взаимопротиворечащим выводам. По нашему мнению, это свидетельствует об отсутствии базовой геодинамической модели, согласованной с имеющимися сегодня данными геологических наблюдений и геофизических исследований. В представленной работе автором, на основе результатов интерпретационного анализа комплекса геолого-геофизических данных, реконструировано и обосновано существование на позднемезозойско-раннекайнозойском этапе преобразований литосферы Арктики Амеразийской микроплиты, обособленной крупными и протяженными сдвиговыми зонами разломов. Выделенная микроплита и ограничивающие ее системы сдвигов являются основными элементами глубинной геодинамики, отражающими перемещение подлитосферных мантийных масс конвективной ячейкой в сторону Тихоокеанской зоны субдукции (Лобковский и др., 2013).

Материалы и методы

Представленные в статье результаты, освещающие элементы позднемезозойско-раннекайнозойской структуры и геодинамические обстановки на этом этапе в Арктическом регионе, основаны на интерпретационном анализе комплекса геолого-геофизических данных (Шипилов, 2004; Шипилов и др., 2021). Они включают полученные в последние годы профильные разрезы региональных и рекогносцировочных исследований МОВ ОГТ, которые интерпретировались с опорой на магнитометрические и гравиметрические материалы. Вместе с тем, использовались оригинальные данные определения абсолютного возраста пород платобазальтового магматизма рассматриваемого периода активизации геодинамических процессов, позволившие оконтурить области его распространения (Шипилов, 2016; Шипилов, Карякин, 2011).

Основные элементы тектоники Арктического океана

В тектоно-геодинамическом отношении геодепрессия Арктического океана занимает позицию в области взаимодействия Евразийской и Североамериканской литосферных плит. Современный морфоструктурный облик этого океана был предопределен рифтогенными событиями с формированием в течение позднего мезозоя и кайнозоя трех глубоководных бассейнов – Канадского, Макарова-Подводников и Евразийского, разобщенных хребтами Альфа-Менделеева и Ломоносова. Широкомасштабный и растянутый во времени юрско-меловой рифтогенез, сопровождавшийся мощными проявлениями платобазальтового магматизма с пиковым возрастом ~ 130 млн. лет (Шипилов, 2016; Шипилов, Карякин, 2011), привел к гипертрофированному растяжению литосферы в Арктике, которое затем переросло в поступательную последовательность спрединговых событий. В Канадском бассейне инициальная фаза спрединга связывается с ранним мелом, в бассейне Макарова предположительно с поздним мелом – палеоценом(?), а в Евразийском бассейне он стартовал в самом конце палеоцена. В результате в Канадском и Евразийском бассейнах образовались окна океанической спрединговой коры. Что касается впадины Макарова, вопрос о типе коры остается открытым, однако ряд исследователей находят основание для выделения в структуре магнитного поля этого бассейна полосовых аномалий (Шрейдер, 2004 и ссылки в ней). Вместе с тем, в отличие от Канадского и Евразийского бассейнов, формирование которых протекало под воздействием медленного и ультрамедленного спрединга, в бассейне Макарова, расположенного между ними, просматриваются черты свойственные бассейнам развивавшимся по типу pull-apart.

Необходимо заметить, что имеющиеся геолого-геофизические данные не исключают некоторого перекрытия в геохронологической последовательности образования бассейнов. Наряду с этим, несмотря на различную ориентировку осевых зон спрединга и депоцентров в отмеченных бассейнах, очевиден вектор однонаправленного смещения рифтогенно-спрединговых процессов в сторону Баренцево-Карской континентальной окраины, что не находит объяснения в рамках существующих палеотектонических реконструкций.

Результаты геофизических исследований последних лет свидетельствуют, что океаническая кора в глубоководных бассейнах Арктики – Канадском и Евразийском – занимает значительно меньшую площадь, чем это считалось ранее (Шипилов и др., 2021; Chian et al., 2016; Dossing et al., 2020; Zang et al., 2019).

В Канадском бассейне окно распространения океанической коры имеет размеры в длину 590 км (с севера на юг), а в ширину – 340–400 км (с запада на восток) – с внешней стороны краевых парных магнитных аномалий. Магнитные данные высокого разрешения позволили оценить ее возраст в диапазоне 139.5–128.6 млн. лет по временной шкале геомагнитной полярности (Gradstein et al., 2012) или 142.4–132.8 млн. лет по шкале (Malinverno et al., 2012). В совокупности эти данные позволяют считать, что скорость спрединга составляет ~ 32 (38) мм/год (Zang et al., 2019). На остальной части глубоководного ложа устанавливаются и доминируют сильно растянутые блоки континентального фундамента переходной (транзитной) коры, а по периферии – сооружения отрогов хребта Альфа-Менделеева и периокеанические блоки окраин континентов. Геометрическая конфигурация окна океанической коры, а также асимметричная площадь утоненной переходной коры и сильно растянутого континентального фундамента, не соответствуют ротационной веерообразной модели раскрытия Канадского бассейна. В морфологии рельефа дна и в структуре геофизических полей его северной части просматриваются элементы, ориентированные субпараллельно восточному ограничению хр. Нортвинд, что свидетельствует о косом развитии спрединга в этом бассейне и обшем сдвиге вдоль отмеченного хребта (Шипилов, 2016; Dossing et al., 2020; Hutchinson et al., 2017).

В Евразийском бассейне континентальные блоки растянутого и погруженного континентального фундамента занимают его южный (прилаптевоморский) сегмент (Шипилов и др., 2021), а также располагаются вдоль подножий Баренцево-Карской окраины и хребта Ломоносова (Дараган-Суцова и др., 2020). Считается, что максимальная полная скорость спрединга ультрамедленного хр. Гаккеля в Баренцево-Гренландской части Евразийского бассейна составляет ~ 13 мм/год, уменьшаясь в направлении к Лаптево-морской континентальной окраине до ~ 6–7 мм/год. Оценки скорости ультрамедленного спрединга хр. Гаккеля в его южной половине весьма проблематичны по причине недостаточной точности и детализации данных магнитной съемки, в результате чего одиочная на первый взгляд линейная магнитная аномалия может состоять из нескольких различных магнитных инверсий (Jokat et al., 2019). Очевидно, что ультрамедленный спрединг в Евразийском и Канадском бассейнах не привел к их полному раскрытию.

Сейсмические разрезы в прилаптевоморском сегменте Евразийского бассейна (за 81° с. ш.) отображают непрерывную систему сброшенных блоков континентального фундамента структур обрамления, возникшую под воздействием значительного растяжения земной коры. Эти блоки сильно растянутого фундамента транзитной коры занимают практически весь крайний южный сегмент Евразийского бассейна, где отсутствуют регулярные полосовые магнитные аномалии. Никаких признаков, характерных для океанического фундамента в волновой картине на сейсмических разрезах в этом сегменте Евразийского бассейна, не обнаруживается (Шипилов и др., 2021). Следует заметить, что положение так называемой «Кальдеры Гаккеля» (Piskarev, Elkina, 2017) (или Gakkell Ridge Deep по (Jokat et al., 2019)) с батиметрическими отметками ~ 5310 м на хребте Гаккеля приурочено к границе океанического и сильно растянутого континентального фундамента южного сегмента бассейна. Время магматической активизации этой глубокой структуры в осевой зоне спредингового хребта, как свидетельствует определение абсолютного возраста подушечного базальта с подводной горы, расположенной на краю кальдеры, составляет по $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ $3,65 \pm 0,01$ млн. лет (Jokat et al., 2019). Близкий по возрасту позднекайнозойский магматизм зафиксирован на плато Де Лонга (Silantsev et al., 2004). Следует заметить при этом, что базальтоидный магматизм на континентальных окраинах, который можно связать по времени с раскрытием Евразийского бассейна, проявился очень скудно, в отличие от позднемезозойского этапа, и его позднекайнозойские проявления известны лишь на архипелагах Шпицберген и Де Лонга.

Развитие редуцированной континентальной коры прогнозируется также в котловинах Подводников, Наутилус и Стеффенсона.

Сдвиговые зоны разломов и Амеразийская микроплита

Полученные в последние годы материалы геолого-геофизических исследований и их интерпретация позволили автору уточнить ранее высказанные соображения о временных рамках реорганизации структуры и изменения в геодинамической направленности эволюции океана Арктике (Шипилов, 2004; Шипилов, Лобковский, 2012). Принципиально важный аспект заключается в том, что на позднемезозойско – раннекайнозойском этапе геодинамической эволюции определилась но-

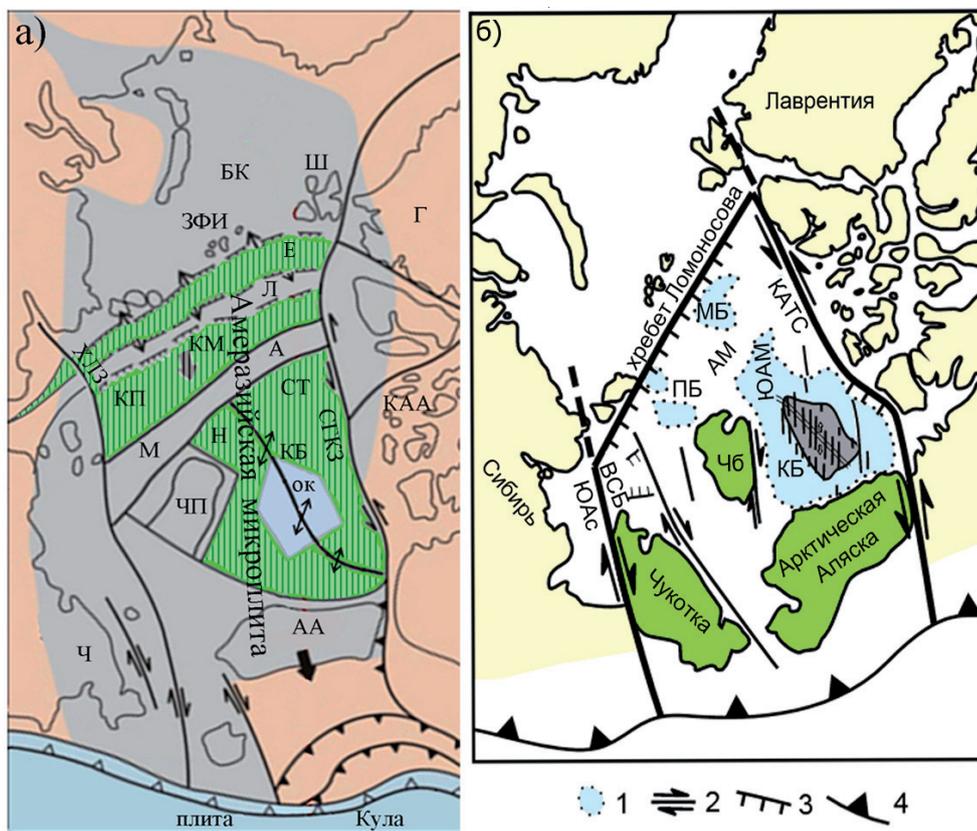


Рис. 1. Палеотектонические реконструкции Арктического океана.

а) Позиция Амеразийской микроплиты в позднемеловое время; зеленый цвет – меловая рифтованная кора. БК – Баренцево-Карская окраина, ЗФИ и Ш – Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, Е – формирующийся Евразийский бассейн, Л – блок хребта Ломоносова; трансформно-сдвиговые зоны: ХЛЗ – Хатангско-Ломоносовская, СГКЗ – Северогренландско-Канадская; бассейны: КП – Подводников, КМ – Макарова, КБ – Канадский (ок – океаническая кора), Н – Наутилус, СТ – Стефансона; поднятия: М и А – Альфа-Менделеева, ЧП – Чукотское; Г – Гренландия, Чукотка, АА – Арктическая Аляска.

б) Схематическое положение и роль Канадской Арктической трансформной системы (КАТС) в формировании структуры Арктического океана в мезозойское время (McClelland et al., 2021 с изменениями). 1 – утоненная кора, 2 – сдвиги/трансформы, 3 – разломно-сбросовые зоны, 4 – зона субдукции. ЮАс – Южно-Ануйская сутура, ВСБ – Восточно-Сибирские бассейны; бассейны: ПБ – Подводников, МБ – Макарова, КБ – Канадский; АМ – поднятие Альфа-Менделеева, ЧБ – Чукотский бордерленд, ЮАМ – южные отроги поднятия Альфа-Менделеева.

Fig. 1. Late Mesozoic Palaeotectonic reconstructions of the Arctic Ocean in the Late Mesozoic.

а) Position of the Amerasian microplate in the Late Cretaceous; green color – Late Cretaceous rifted crust. БК – Barents-Kara margin, ЗФИ and Ш – Franz Josef Land and Svalbard, Е – emerging Eurasian basin, Л – Lomonosov Ridge block; strike-slip/transform fault: ХЛЗ – Khatanga-Lomonosov, СГКЗ – North Greenland-Canadian; basins: КП – Podvodnikov, КМ – Makarov, КБ – Canadian (ok – oceanic crust), Н – Nautilus, СТ – Stephansson; uplifts : М and А – Alpha-Mendeleev, Ч – Chukotka; Г – Greenland, ЧП – Chukotka borderland, АА – Arctic Alaska.

б) Schematic position and role of the Canadian Arctic Transform System (CATS) in the formation of the structure of the Arctic Ocean in the Mesozoic (McClelland et al., 2021 with changes). 1 – thinned crust, 2 – strike-slip/transform fault, 3 – normal fault-discharge zones, 4 – subduction zone. ЮАс – South Anyu sutura, ВСБ – East Siberian basins; basins: ПБ – Podvodnikov, МБ – Makarov, КБ – Canadian; АМ – Alpha-Mendeleev Uplift, ЧБ – Chukotka borderland, ЮАМ – southern spurs of Alpha-Mendeleev Uplift.

вая блоковая делимость литосферы в Арктическом регионе с обособлением Американо-Евразийской микроплиты в его океанической геодепрессии (Шипилов и др., 2021). Фундаментальную роль в этой дифференциации структуры Арктики играли две крупные зоны разломов со сдвиговой компонентой смещения – Шпицбергенско-Северогренландская (и ее продолжение в виде Северогренландско-Канадского звена) и Хатангско-Ломоносовская (рис. 1 а). Нами было показано, что они отчетливо выделяются в рельефе дна, в структуре геофизических полей, по сейсмической информации и других показателях (Шипилов, 2004; 2016; Шипилов и др., 2021).

Хатангско-Ломоносовская зона разломов по всем характеристикам, как и Северогренландско-Канадская, является трансрегиональной, т.е. участвующей в строении ряда разнородных структур литосферы. Время проявления правосдвиговых перемещений по Хатангско-Ломоносовской зоне присибирского окончания хребта Ломоносова относительно Сибирской палеоокраины началось в первой фазе рифтинга – в процессе значительного по масштабам общерегионального растяжения континентальной коры в апте–альбе. Смещение было продолжено в течение второй фазы рифтинга в позднем мелу – раннем кайнозое в связи с заложением и развитием Евразийского бассейна.

Следует отметить, что напряжения сдвиго-сжатия, возникшие при движении хребта Ломоносова вдоль Хатангско-Ломоносовской зоны, в геодинамическом плане, несмотря на структурные и некоторые временные различия, были подобны условиям формирования Западно-Шпицбергенского и Эуреканского складчато-надвиговых поясов, обусловленным режимом транспрессивных взаимоотношений между Гренландией и Свальбардской плитой в первой половине кайнозоя (Шипилов, 2004). Как следствие, были сформированы пликативные и дизъюнктивные дислокации осадочно-чехла, коррелируемые по времени образования с фазами раннего этапа развития Норвежско-Гренландского и Евразийского бассейнов и отчетливо запечатленные в обнажениях Западного Шпицбергена.

Геолого-геофизические данные свидетельствуют о том, что аналогичные смещения Американо-Евразийской микроплиты в сторону зоны Тихоокеанской зоны субдукции устанавливаются для звеньев зоны разломов на гренландско-канадском окраинно-континентальном обрамлении глубоководных бассейнов. Сейсморазведкой в этой зоне установлено чередование и комбинирование структур, обусловленных процессами сбросо- и сдвигообразования (Dinkelman et al., 2008; Helwig et al., 2010). При этом характерной особенностью является то, что возникшие дислокации затрагивают как континентальную (внутреннюю), так и «океаническую» (внешнюю) части зоны разломов. Наши представления о сдвиговых процессах в геодинамической эволюции арктического региона, изложенные в публикациях (Шипилов, 2004; 2016; Шипилов, Лобковский, 2012; Шипилов и др., 2021), находят подтверждения в исследованиях зарубежных геологов и геофизиков (рис. 1б). В этом плане следует привести работу (McClelland et al., 2021), в которой авторы на основе исследования структурно-деформационных признаков окраинно-континентальных комплексов пород Канадского Арктического архипелага, приходят к выводу о длительной и унаследованной истории сдвиговых перемещений вдоль Северогренландско-Канадской трансформной системы (в их статье - CATS - Canadian Arctic transform system) и в мезозойско-кайнозойское время включительно.

Обсуждение и заключение

Таким образом, реализация движений по отмеченным зонам сдвига в позднем мелу – раннем кайнозое привела на данном этапе реорганизации литосферы к обособлению в Арктике новой композитной Американо-Евразийской микроплиты, которая объединила в себе блоки Арктической Аляски, Канадской котловины, Чукотского поднятия, поднятия Альфа–Менделеева, котловин Подводников и Макарова, и хребта Ломоносова.

Указанные сдвиговые зоны, в контексте разрабатываемой в последние годы коллективом ученых (ИО РАН, ГИН РАН, ИНГиГ СО РАН и ПГИ КНЦ РАН) геодинамической модели позднемезозойско-кайнозойской эволюции Арктики, являются основными элементами литосферных преобразований, сопровождающих действие верхнемантийной конвективной ячейки (Лаверов и др., 2013; Лобковский и др., 2013; Шипилов и др., 2021).

Причина формирования таких крупных протяженных сдвиговых зон и соответствующих трансформаций литосферы, по нашему мнению, лежит в глубинной геодинамике, обусловленной процессами перемещения подлитосферных мантийных масс конвективной ячейкой в сторону Тихоокеанской зоны субдукции. Это вызывает соответствующий тянущий момент и ползучесть самой литосферы с сопровождающими ее эффектами растяжения в одних местах и деформациями сжатия в других, в пределах одной и той же плиты. В данном случае ею является новообразованная композитная Амеразийская микроплита, которая перемещалась по примерно параллельным крупным зонам сдвигов на краях Канадского арктического и Сибирско-Чукотского шельфов в сторону Пацифики (Лобковский и др., 2013; Шипилов, Лобковский, 2012; Шипилов и др., 2021) (рис. 1 а). Движение Амеразийской микроплиты сопровождалось рифтогенезом и отрывом хребта Ломоносова от Баренцево-Карской окраины, раскрытием Евразийского бассейна в тылу хребта и трансформными смещениями – правосторонними вдоль Хатангско-Ломоносовской и левосторонними вдоль Северогренландско-Канадской разломных зон (рис. 1). Вместе с тем, в результате перемещения Амеразийской микроплиты до этого единый ареал меловых платобазальтов был разорван, и Центрально-Арктическая провинция магматизма оказалась отделенной и отодвинутой от Баренцевоморской магматической провинции (Шипилов, 2016; Шипилов, Карякин, 2011; Døssing et al., 2017).

В сравнительном плане следует отметить, что в сценариях развития Евразийского и Канадского бассейнов наблюдается определенное сходство: заложение на рифтованной меловой континентальной коре, участие в развитии трансрегиональных зон сдвига с обособлением микроплит, медленный/ультрамедленный спрединг и значительно меньшая площадь развития океанической коры, чем это считалось ранее.

В связи с изложенным представляется, что одной из наиболее вероятных причин проявления поздних фаз складчатости в Арктической Аляске (Moore, Stephen, 2016) и в южном сегменте Канадской котловины является движение Амеразийской микроплиты в сторону Тихоокеанских зон субдукции. Это привело к напряженно-деформированному состоянию литосферы краевой фронтальной части микроплиты с формированием здесь позднемеловых-кайнозойских зон деформаций и их фрагментов.

В недавно опубликованных работах (Richter et al., 2020; Yang et al, 2021) предложенная субдукционно-конвективная модель эволюции Арктики получила независимое подтверждение по результатам геохимических исследований состава базальтов хребта Гаккеля, которые, как и предсказывалось нашей моделью, имеют четкий след Тихоокеанской субдукции.

Реконструкция обособления Амеразийской микроплиты и ее участия в позднемезозойско-раннекайнозойской структуре и геодинамической эволюции Арктики, в контексте субдукционно-конвективной модели, значительно расширяет возможности интерпретационного анализа геолого-геофизических данных и, кроме того, при палеотектонических построениях позволяет устранить ряд указанных в начале статьи проблем.

Литература

1. Дараган-Суцова Л.А., Петров О.В., Дараган-Суцов Ю.И., Леонтьев Д.И., Савельев И.Н. История формирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана по сейсмическим данным // Региональная геология и металлогения. 2020. № 84. С. 25–44.
2. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и прилегающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–30. DOI: 10.7868/S0016853X13010050.
3. Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В. Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли. 2013. № 6. С. 20–38. DOI: 10.7868/S0002333713060100.
4. Шипилов Э.В. К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин Арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника. 2004. № 5. С. 26052. https://studylib.ru/doc/2069740/k-tektono-geodinamicheskoy-e-volyucii-kontinental._nyh-okrain.

5. Шипилов Э.В. Базальтоидный магматизм и сдвиговая тектоника арктической континентальной окраины Евразии в приложении к начальному этапу геодинамической эволюции Амеразийского бассейна // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 12. С. 2115–2142. DOI: 10.15372/GiG20161202.
6. Шипилов Э.В., Карякин Ю.В. Баренцевоморская магматическая провинция: геолого-геофизические свидетельства и новые результаты определения $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраста // ДАН. 2011. Т. 439. № 3. С. 376–382. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16526078>.
7. Шипилов Э.В., Лобковский Л.И. Тектоно-геодинамические трансформации литосферы Амеразийского бассейна в кайнозой // ДАН. 2012. Т. 445. № 6. С. 663–669. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17876036>.
8. Шипилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И., Кириллова Т.А. Геодинамические обстановки в зоне сопряжения хребта Ломоносова и Евразийского бассейна с континентальной окраиной Евразии // Геотектоника. 2021. № 5. С. 3–26. DOI 10.31857/S0016853X21050076.
9. Шрейдер А. Линейные магнитные аномалии Северного Ледовитого океана // Океанология, 2004. Т. 44. № 5. С. 768–777.
10. Chian D., Jackson H.R., Hutchinson D.R., Shimeld J.W., Oakey G.N., Lebedeva-Ivanova N., Li Q., Saltus R.W., Mosher D.C. Distribution of crustal types in Canada Basin, Arctic Ocean // Tectonophysics. 2016. V. 691. P. 8–30. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.038>.
11. Dinkelman M. G., Kumar N., Helwig J., Emmet P., Granath J. Highlights of Petroleum and Crustal Framework of the Beaufort-Mackenzie Basin: Key Results from BeaufortSPAN East Phases I and II Surveys // Canadian Society of Exploration Geophysicists (CSEG). Recorder. 2008. V. 33. № 9. P. 22–25.
12. Døssing A., Gaina C., Brozena J. M. Building and breaking a large igneous province: An example from the High Arctic // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. doi:10.1002/2016GL072420.
13. Døssing A., Gaina C., Jackson H.R., Andersen O.B. Cretaceous ocean formation in The High Arctic // Earth and Planetary Science Letters. 2020. V. 551. 116552. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116552>.
14. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D. / G.M. Ogg (Eds.). The Geologic Time Scale, Elsevier, Oxford, UK. 2012. P. 85–113. DOI: 10.1016/B978-0-444-59425-9.00005-6.
15. Helwig J., Kumar N., Dinkelman M. G., Emmet P. Three segments of the Arctic Continental Margin, Beaufort Sea, Canada: Deep Seismic Profiles of Crustal Architecture: Abstract // GeoCanada. 2010. May 10–14. Calgary, Canada. 4 p. <https://doi.org/10.1144/M35.35>.
16. Jokat W., O'Connor J., Hauff F., Koppers A. A. P., Miggins D. P. Ultraslow spreading and volcanism at the eastern end of Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20, P. 6033–6050. <https://doi.org/10.1029/2019GC008297>.
17. Malinverno A., J. Hildebrandt J., M. Tominaga M., Channell J.E. M-sequence geomagnetic polarity time scale (MHTC12) that steadies global spreading rates and incorporates astrochronology constraints // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. Article B06104. DOI: 10.1029/2012JB009260.
18. McClelland W.C., Strauss J.V., Colpron M., Gilotti J.A., Faehrich K., Malone S.J., Gehrels G.E., Macdonald F.A., Oldow J.S. Taters versus sliders: Evidence for a long lived history of strike-slip displacement along the Canadian arctic transform system (CATS) // GSA Today. 2021. V. 31(7). P. 4–11. DOI: 10.1130/GSATG500A.1. <https://doi.org/10.1130/GSATG500A.1>. CC-BY-NC
19. Moore T.E., Box S.E. Age, distribution and style of deformation in Alaska north of 60°N: Implications for assembly of Alaska // Tectonophysics. 2016. V. 691. P. 133–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2016.06.025>.
20. Piskarev A., Elkina D. Giant caldera in the Arctic Ocean: Evidence of the catastrophic eruptive event // Scientific Reports. 2017. V. 7. 46248. <https://doi.org/10.1038/srep46248>.
21. Richter M., Nebel O., Maas R., Mather B., Nebel-Jacobsen Y., Capitano Y., Dick H. J.B., Cawood P.A. An Early Cretaceous subduction-modified mantle underneath the ultraslow spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Sci. Adv. 2020. V. 6. eabb4340. DOI: 10.1126/sciadv.abb4340.
22. Silantyev S.A., Bogdanovskii O.G., Fedorov P.I., Karpenko S.F., Kostitsyn Yu.A. Intraplate magmatism of the De Long Islands: A response to the propagation of the ultraslow-spreading Gakkel Ridge into the passive continental margin in the Laptev Sea // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. V. 6. № 3. P. 1–31. <http://rjes.wdcb.ru/v06/tje04150/tje04150.htm>.
23. Yang A.Y., Langmuir C.H., Cai Y., Michael P., Goldstein S.L., Chen Z. A subduction influence on ocean ridge basalts outside the Pacific subduction shield // Nature Communications. 2021. V. 12. 4757. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25027-2>.
24. Zhang T., Dyment J., Gao J.Y. Age of the Canada Basin, Arctic Ocean: indications from high-resolution magnetic data // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46(23). P. 13712–13721. <https://doi.org/10.1029/2019GL085736>.