

Геодинамическая модель эволюции Арктики в мелу и кайнозое на основе геолого-геофизических данных

Лобковский Л.И., Кононов М.В.

Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН (ИО РАН, Москва, Россия)
llobkovsky@ocean.ru

Анализ существующих в литературе различных моделей геологической эволюции Арктики показывает, что общим недостатком этих моделей является их чисто кинематический характер при отсутствии сколько-нибудь серьезного обсуждения движущих сил, приводящих к описанным в них реконструкциям. Это обстоятельство не позволяет сделать обоснованный выбор в пользу какой-либо модели и, наоборот, способствует выдвиганию все новых кинематических схем, отличающихся друг от друга разной трактовкой фактических данных. Разрешить данный методологический кризис можно, только перейдя к более общей геодинамической постановке задачи, рассматривая движение литосферных плит и блоков Арктического региона как результат развития мантийных подлитосферных течений.

Разрабатываемая в рамках настоящего проекта новая геодинамическая модель эволюции литосферы Арктики основывается на современных данных сейсмической томографии и их гидродинамической интерпретации в виде представления о вынужденной горизонтально протяженной верхнемантийной конвекции под Арктикой и Северо-Восточной Азией, связанной с непрерывным конвейерным погружением Тихоокеанской литосферы в зонах субдукции Алеутского, Курило-Камчатского и Японского глубоководных желобов.

Предложенная модель дает физический механизм мелового растяжения литосферы Американо-Азиатского бассейна с образованием системы хребтов Альфа-Менделеева и сопряженных с ними котловин Макарова и Подводников, а также естественным образом объясняет возникновение крупной магматической провинции в центральной Арктике.

Происхождение и геодинамическая эволюция Американо-Азиатского бассейна Арктики в мезозое является ключевой и наиболее трудноразрешимой задачей. При этом более поздний кайнозойский этап развития хорошо идентифицируется геолого-геофизическими методами исследования, которые уверенно доказывают срединговую природу Евразийского бассейна с разделяющим глубоководные котловины Нансена и Амудсена срединным хребтом Гаккеля, характеризующегося хорошо выраженными линейными магнитными аномалиями. В отличие от простого по форме квазилинейного Евразийского бассейна, Американо-Азиатский имеет более сложное строение, включая целый ряд различных тектонических структур, требующих объяснения своего происхождения. К ним можно отнести хребет Ломоносова, систему поднятий Альфа-Менделеева, расположенные между ними впадины Макарова и Подводников, поднятия Чукотское и Нортвинд, глубоководную Канадскую котловину.

В настоящее время в научном сообществе обсуждается целый ряд гипотез и моделей, затрагивающих различные аспекты происхождения и эволюции тектонических структур Американо-Азиатского бассейна Арктики. Среди них широкое распространение получила предложенная американским геологом А. Гранцем «ротационная модель» [Grantz A. et al, 1998], согласно которой в эпоху поздней юры - раннего мела определяющую роль в геодинамическом развитии литосферы Арктики играл процесс отрыва микроплиты, включающей

Чукотку и Арктическую Аляску, от Канадского Арктического архипелага и ее последующего столкновения с Евразийской окраиной. Этот процесс сопровождался формированием Канадской котловины в тылу вращающейся против часовой стрелки Чукотско-Аляскинской микроплиты и закрытием Южно-Анжуйского палеоокеана с формированием складчато-надвиговых поясов, протянувшихся от Новосибирских островов через Чукотку к хребту Брукса, расположенному на Аляске (рис. 1).

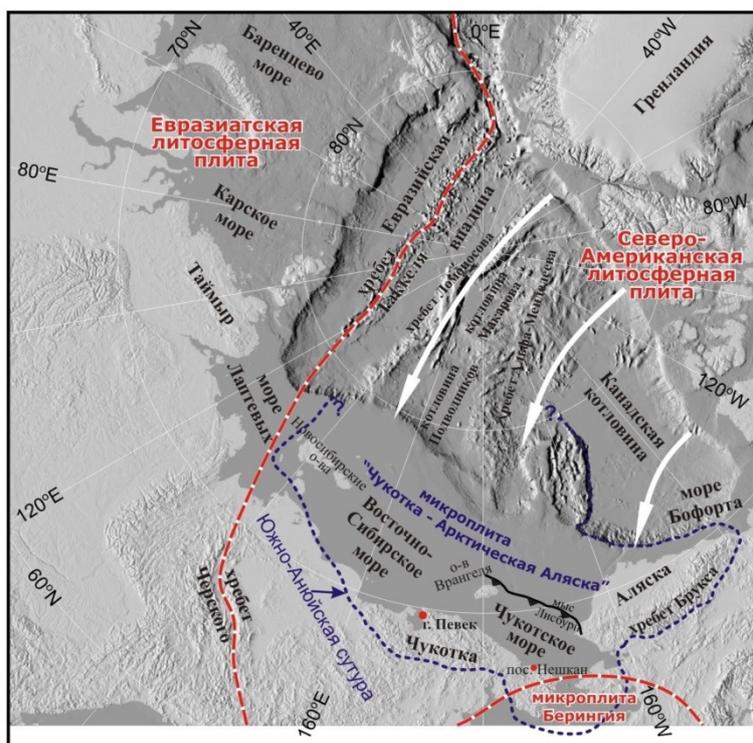


Рис. 1. Ротационная модель образования Арктики, совмещенная с картой основных географических и тектонических элементов (на основе карты [Miller E. L. et al, 2006], с изменениями и дополнениями по [Имаев В. С. и др., 2000; Ландер А.В. и др., 1994; Mackey K.G. et al, 1997]).

1 – положение идеализированных границ современных литосферных плит, 2 – граница микроплиты “Чукотка - Арктическая Аляска”, 3 – идеализированная траектория движения микроплиты “Чукотка - Арктическая Аляска” в процессе раскрытия Канадской котловины. Топографическая основа - ИВСАО [2001, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html>]

Дальнейшая постколлизийная эволюция литосферы Арктики в аптальбский период позднего мела проходила в условиях субширотного (в современных румбах) растяжения. Об этом, в частности, свидетельствуют геологические данные по Центральной Чукотке [Miller E. L. et al, 2009] (рис. 2) и другим участкам суши Арктической зоны, а также существующие сейсмические разрезы осадочной толщи на Арктическом шельфе и в глубоководных частях Северного Ледовитого океана [Kazmin Y. V. et al, 2014a; Kazmin Y. V. Et al, 2014b] (рис. 3).

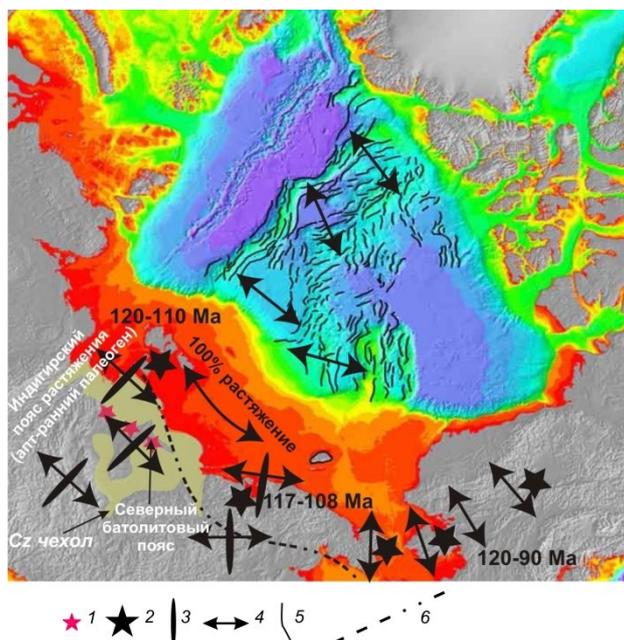


Рис. 2. Модель раскрытия бассейна Макарова в апт-альбское время, основанная на результатах геохронологических и структурных исследований. По [Miller E. L. et al, 2009] с дополнениями по [Парфенов Л.М., Кузьмин М.И., 2001].

1 – северный батолитовый пояс, 2 – области постколлизии магматической активности, цифры соответствуют ее датировкам, 3 – усредненное простирание даек и других структур растяжения, 4 – направление постколлизии растяжения, 5 – предполагаемые сбросы в пределах хребтов Ломоносова, Альфа-Менделеева и Чукотского бордерленда, 6 – положение Южно-Анхойской сутуры

Первые попытки последовательного описания эволюции Арктики в меловой период были предприняты с позиций теории тектоники плит еще в начале 70-х годов прошлого столетия в работах [Pitman W. C., Talwani M., 1972; Herron E. M. et al, 1974] и в последующие годы получили развитие в исследованиях отечественных и зарубежных геологов [Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М., 1987; Scotese C. R., 2011; Golonka, J., 2011]. Согласно классическому подходу тектоники плит, эволюция Арктики в мезозое и кайнозое определяется взаимодействием двух крупных литосферных плит – Евразийской и Северо-Американской. Уже первые расчеты движения этих плит на основе кинематического принципа теоремы Эйлера показали, что при раскрытии Северной Атлантики в меловой период (с полюсом раскрытия в районе о. Элсмир вблизи Северной оконечности о. Гренландия) в Арктике должно было происходить значительное сближение плит на величину порядка 1000 км [Herron E. M. et al, 1974]. Последующие работы подтвердили этот вывод, причем в качестве структур сжатия, маркирующих условия конвергенции плит, рассматривался складчатый фронт, протягивающийся от хребта Брукса через полуостров Пойнт-Хоп до островов Геральд и Врангеля и далее переходящий в подводные поднятия Менделеева и Альфа Американо-Евразийского бассейна. Однако для обеспечения сближения плит на величину 1000 км такого сжатия коры явно недоставало, поэтому возникло предположение, что меловая конвергенция плит была реализована за счет значительного поглощения океанической коры Канадского бассейна в зоне субдукции, приуроченной к поднятию Альфа-Менделеева, которое рассматривалось как вулканическая дуга с характерным андезитовым вулканизмом [Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М., 1987].

Дополнительным элементом этой модели, придававшим ей логическую завершенность, было предположение, что расположенная к западу от поднятия Альфа-Менделеева котловина Макарова представляет собой задуговой бассейн, образованный в процессе растяжения литосферы по аналогии с образованием краевых бассейнов западной окраины Тихого океана в результате отступления (roll-back) зон субдукции вместе с островными дугами и желобами в сторону Тихоокеанской плиты [Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М., 1987].

Данная модель эволюции Арктики, предложенная около тридцати лет тому назад, до сих пор используется в современных плитотектонических реконструкциях, в частности, в работах известного американского ученого К. Скоттисе [2011], несмотря на появление в последние годы фактических данных, противоречащих основным ее выводам. Прежде всего, это касается ключевого положения модели о субдукционной природе поднятия Альфа-Менделеева. Дело в том, что данные по магматизму поднятия Альфа не подтверждают известково-щелочной состав магматических пород, свойственный островным дугам субдукционной природы [Jackson H.R. et al, 1985; Jokat W. et al, 2013; Shokalsky S.P. et al., 2014]. Отсутствуют также какие-либо следы поглощения океанской коры у подножья хребта Альфа-Менделеева в структуре осадочной толщи [Hutchinson D.R. et al, 2011; Mosher D. C. et al, 2011]. В целом, геолого-геофизические данные, полученные в последние годы в ходе морских и сухопутных исследований Арктического региона, включая шельф, острова, глубоководные участки Северного Ледовитого океана, а также примыкающие области суши, свидетельствуют о том, что вся литосфера Арктики в меловой период испытывала региональное субширотное растяжение рифтогенного типа [Kazmin Y. B. et al, 2014a; Kazmin Y. B. et al, 2014b] (рис.3) и, следовательно, не могла в то же самое время значительно сокращать свою площадь, как этого требует кинематика плитотектонического анализа.

Следует отметить, что автор упомянутой выше работы [Scotese C. R., 2011], описывая принятую им схему образования поднятий Альфа и Менделеева и примыкающих к ним котловин Макарова и Подводников, использовал в качестве прямой аналогии хорошо известные примеры образования котловины Тирренского моря и Паннонского бассейна за счет механизма задугового растяжения литосферы в результате отступления зоны субдукции. Однако такое сравнение не является корректным. Оно лишь подчеркивает уязвимость предлагаемого субдукционно-задугового механизма образования тектонических структур Амеразийского бассейна, поскольку выбранные для сравнения регионы, в отличие от Центральной Арктики, как раз характеризуются известково-щелочным островодужным магматизмом (Эоловая дуга в Тирренском море и Карпатская краевая дуга Паннонского бассейна - Вигорлат-Гута), маркирующим зоны субдукции. Кроме того, в рассматриваемых примерах образования Тирренского моря и Паннонской депрессии мы имеем целый набор геологических признаков, свидетельствующих об общей геодинамической обстановке конвергенции плит в ходе закрытия палеоокеана Тетис в миоцен-четвертичное время.

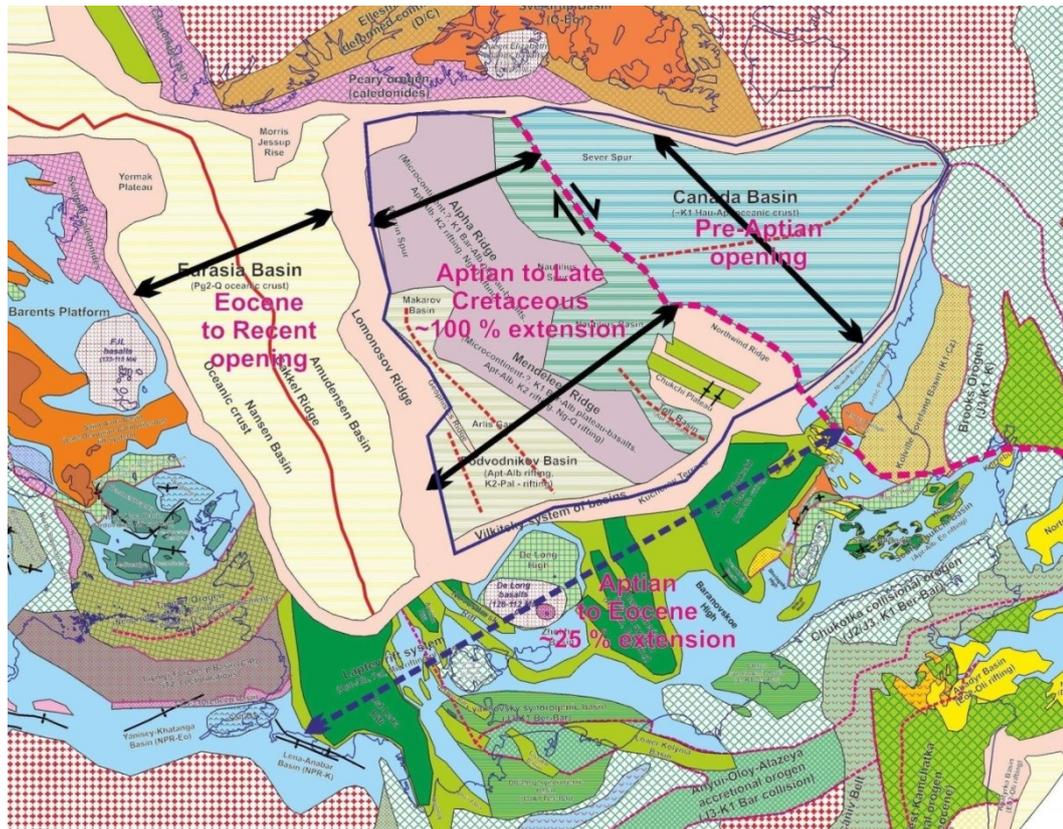


Рис.3. Схема структур растяжения Северного Ледовитого океана [Kazmin Y. B. et al, 2014a; Kazmin Y. B. et al, 2014b] (составлена А.М. Никушиным). Демонстрирует распространение апт-альбского растяжения на обширном российском шельфе (показано темно-зеленым цветом). Подобная картина противоречит модели К. Скотиза [2011], в которой ожидается только узкая полоса растяжения в Амеразийском бассейне, но хорошо объясняется нашей моделью

Подводя итог краткой истории развития плитотектонических представлений об эволюции Арктики в мезозое, можно констатировать, что известная модель меловой субдукции, сопровождаемой задуговым растяжением литосферы, предложенная для объяснения особенностей тектонического строения Амеразийского бассейна [Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М., 1987; Scotese C. R., 2011; Golonka, J., 2003], оказалась в явном противоречии с имеющимися геолого-геофизическими данными. Что касается других моделей происхождения структур Амеразийского бассейна [Alvey A. et al, 2008; Churkin Jr. M., Trexler Jr. J. H., 1980; 1981; Golonka J. et al, 2003; Grantz A. et al, 1998; 1979; Herron E. M. et al, 1974; Jackson H. R., Gunnarsson K., 1990; Jones, P. B., 1980; Koulakov I. Y. et al, 2013; Lane L. S., 1997; Lawver L. A. et al, 2002; 1990; Miller E. L. et al, 2006; 2009; Rowley D. B., Lottes A. L., 1988; Savostin L. A., 1984; Vogt P. R., 1981; Zonenshain L. P., Nataпов L. M., 1989], то, не вдаваясь в обсуждение их отдельных положений и выводов, укажем на присущий им общий недостаток: все эти модели в лучшем случае являются чисто кинематическими без серьезного геодинамического анализа движущих сил, приводящих к описанным в них реконструкциям. Это обстоятельство не дает возможности сделать обоснованный выбор в пользу какой-то одной, наиболее реалистичной модели и создает почву для постоянной генерации новых кинематических схем, отличающихся друг от друга различной трактовкой геолого-геофизических данных. Возникший методологический кризис, очевидно, может быть разрешен только в рамках более общей геодинамической

постановки задачи эволюции Арктики, учитывающей механизм движения литосферных плит и блоков коры Арктического региона в результате развития мантийных подлитосферных течений.

Таким образом, мы приходим к необходимости рассмотрения мантийной конвекции, порождающей движение и деформации литосферы Арктики, которые определили ее строение и геологическую эволюцию в интересующий нас мезозойский и кайнозойский период времени. При выборе модели мантийных течений основное значение имеют данные сейсмической томографии, которые позволяют «увидеть» структуру мантийной конвекции, что является совершенно необходимым для правильной постановки задачи моделирования региональных геодинамических процессов. В последние годы в исследованиях по сейсмической томографии мантии были получены важнейшие результаты для области Северо-Восточной и Восточной Азии с прилегающими окраинными морями северо-западной части Тихого океана (рис. 4), которые фактически привели к прорыву в понимании реальной гидродинамики мантийных течений в данном регионе Земли. Это новое понимание основано на полученных сейсмотомографических разрезах верхней мантии, из которых видно, как погружающееся в зону субдукции холодное вещество, достигая переходной зоны между верхней и нижней мантией, меняет направление своего движения и далее переходит в протяженный горизонтальный слой холодного мантийного вещества, который распространяется достаточно далеко (на расстояния в первые тысячи километров) под Евразийский континент.

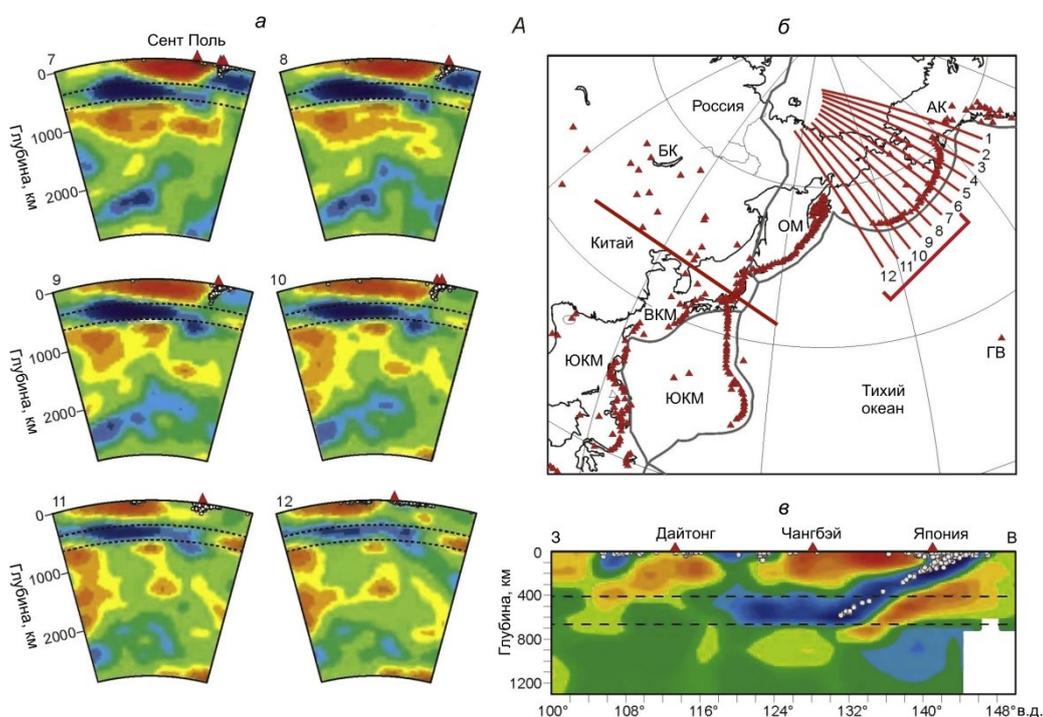


Рис. 4. Вертикальные разрезы мантии в виде сейсмотомограмм в продольных волнах вдоль профилей (а), показанных на карте-врезке (б),

вертикальный разрез мантии под Восточной Азией в направлении восток—запад в виде регионального томографического изображения в продольных волнах (v) по [Жао Д. и др., 2010] с изменениями.

a, в — красный и синий цвета — соответственно низкие и высокие скорости распространения сейсмических волн, максимальная амплитуда аномалий скоростей составляет: a — 1 %, в — 2 %. Белые кружки — землетрясения, которые произошли в пределах 100 км от профиля, красные треугольники — активные вулканы. Штриховыми линиями показаны границы скачкообразного изменения сейсмических свойств на глубинах 410 и 670 км. б — жирные линии на карте-врезке показывают границы плит.

Буквенные обозначения: АК — Аляска, БК — Байкал, ВМК — Восточно-Китайское море, ГВ — Гавайские острова, ОМ — Охотское море, ФЛМ — Филиппинское море, ЮКМ — Южно-Китайское море

С гидродинамической точки зрения такая картина однозначно указывает на развитие ячейки верхнемантийной конвекции, нижняя горизонтальная ветвь которой течет под континент вдоль переходной зоны между нижней и верхней мантией, а верхняя ветвь образует возвратный поток вещества под литосферой в сторону Тихоокеанской зоны субдукции, приводя к растяжению континентальной литосферы, рифтогенезу и связанному с ним магматизму (рис.5). Заметим, что возникающая под литосферой Северо-Восточной и Восточной Азии верхнемантийная конвекция носит вынужденный характер, поскольку она обусловлена непрерывным конвейерным погружением Тихоокеанской литосферы в зонах субдукции. Погружающееся холодное вещество не проникает в нижнюю мантию из-за эффекта положительной плавучести, создаваемого эндотермическим фазовым переходом вещества на границе между верхней и нижней мантией, что заставляет погружающиеся массы растекаться вдоль этой границы. Такая вынужденная верхнемантийная конвекция является существенно нестационарной, поскольку в континентальную область ячейки поступает все время новый материал, расширяя эту область как за счет продвижения фронта ячейки вглубь материка, так и благодаря горизонтальному расширению ячейки в направлении Тихого океана, приводя к хорошо известному явлению отодвигания (отката) зон субдукции вместе с островными дугами от края материка и образованию в их тылу окраинных бассейнов (рис. 5).

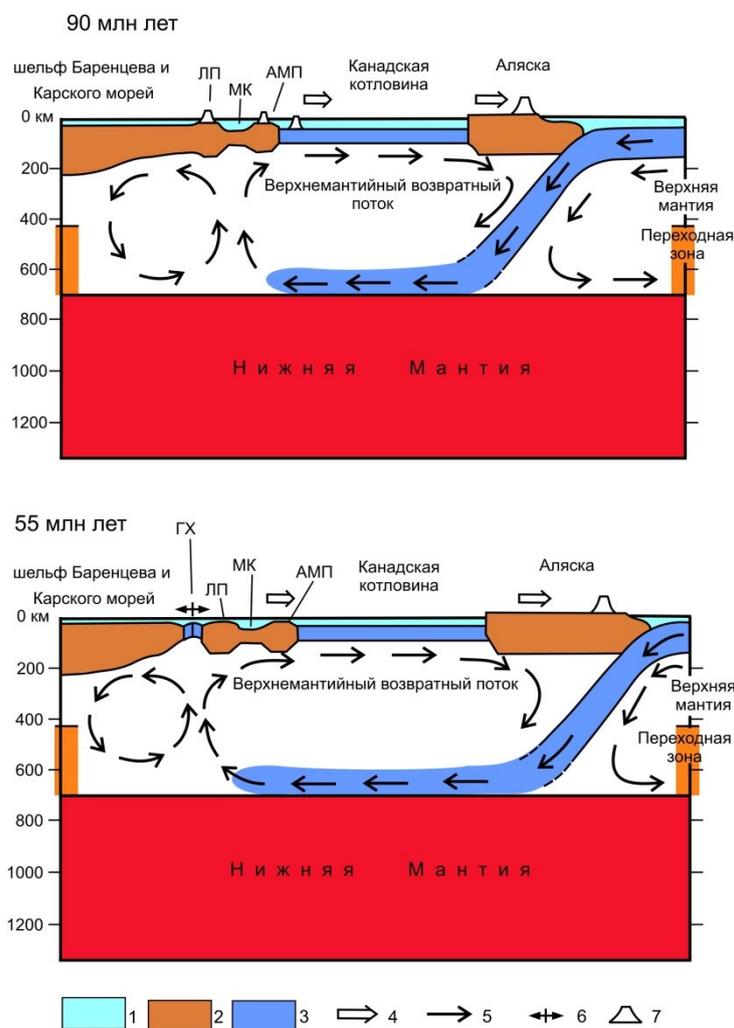


Рис.5. Модель верхнемантийной ячейки под континентом, вызванной процессом субдукции Тихоокеанской литосферы [Лобковский Л.И. и др., 2011; Лаверов Н.П. и др., 2013].

1 – водная толща океана, 2 – континентальная литосфера, 3 – океаническая литосфера; 4 – вектор движения континентальных блоков в направлении Тихоокеанской зоны субдукции благодаря возвратной ячейке верхнемантийной конвекции, 5 – направление потоков в верхней мантии и переходной зоне, 6 – спрединг в Евразийской котловине, 7 – проявления магматизма

Буквенные обозначения: АМП – поднятие Альфа-Менделеева, ГХ – хребет Гаккеля, ЛП – поднятие Ломоносова, МК – котловина Макарова

На основе предложенной модели верхнемантийной ячейки, примыкающей к зоне субдукции, естественным образом объясняется целый комплекс тектонических проблем, связанных с явлением растяжения областей континентальной литосферы, расположенных достаточно далеко за фронтом субдукции Тихоокеанской литосферы. В частности, возникновение рифтовых зон на востоке и юге Северной Азии, включая Байкальскую рифтовую зону и рифты Китая, хорошо объясняется развитием расширяющейся верхнемантийной ячейки под Евразийским континентом за счет подтекания под него субдукционного вещества Тихоокеанской плиты. Возвратный подлитосферный поток вызывает растяжение и рифтогенез литосферы, сопровождаемый внутриплитным магматизмом (Лобковский Л.И. , 2013).

Описанная модель верхнемантийной конвекции, действующей в переходной области между Тихим океаном и Евразийским континентом, носит универсальный характер и может быть положена в основу геодинамического механизма, управляющего движением и деформациями литосферы Арктического региона. Это вытекает из аналогии между современной геодинамической обстановкой взаимодействия Тихоокеанской литосферы с окраинами Евразии и палеогеодинамикой взаимодействия литосферы Пацифики (палео-Тихого океана) и Арктики в мезозое.

Рассмотрим теперь основные следствия модели верхнемантийной конвекции в Арктическом регионе, сопряженной с субдукцией литосферы палео-Тихого океана, применительно к анализу фактических данных о строении и эволюции структур Американо-Евразийского бассейна в апт-альбский и более поздние периоды эволюции Арктики. Первый и основной вывод из данной модели состоит в том, что получает естественное объяснение общее состояние регионального субширотного растяжения литосферы Арктики в апт-альбский период, о котором свидетельствуют многочисленные геолого-геофизические данные [Kazmin Y. B. et al, 2014a; Kazmin Y. B. et al, 2014b]. Это растяжение возникает в результате возвратного течения вещества верхнемантийной ячейки, направленного в сторону зоны субдукции палео-Тихого океана, которое, благодаря вязкому сцеплению с подошвой литосферы Арктики, смещает ее в том же направлении (рис.5). Второе важное следствие модели заключается в объяснении феномена так называемого Арктического плюма. Дело в том, что восходящая ветвь рассматриваемой верхнемантийной ячейки приходится на фронтальную зону ее взаимодействия с литосферой Баренцево-Карской окраины. Поднимающееся вещество ячейки верхней мантии, содержащее гидратированные породы, на небольших глубинах вследствие эффекта декомпрессии будет плавиться, приводя к интенсивным магматическим проявлениям на поверхности литосферы, которые хорошо известны в литературе под общим названием феномена Арктического плюма. Следует отметить, что под термином «Арктический плюм» большинство исследователей понимает популярную схему вертикального потока вещества из нижней мантии, зарождающегося на границе с ядром Земли [Добрецов Н.Л. и др., 2001; Пучков В.Н., 2009]. Однако в последнее время становится все более очевидным, что схема нижнемантийного плюма в Арктике является умозрительной и не имеет никаких реальных подтверждений по данным сейсмической томографии в отличие от обсуждаемой здесь модели верхнемантийной конвекции, связанной с субдукционным процессом. Поэтому ее целесообразно заменить на более реалистичную модель восходящего потока вещества верхней мантии, являющегося частью конвективной системы верхнемантийной ячейки. Учитывая, что нижний горизонтальный поток конвективной ячейки, текущий от зоны субдукции к Баренцево-Карской окраине, несет гидратированное вещество погружающейся океанской литосферы, которое в результате циркуляции попадает в зону восходящего потока, в нем возникают наиболее благоприятные условия для интенсивного плавления и магмообразования (рис.5).

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что так называемая провинция HALIP (т.е. большая арктическая провинция изверженных пород), характеризующаяся интенсивными магнитными аномалиями изометричной формы и общим хаотическим рисунком, а также щелочным магматизмом континентально-рифтогенного типа, обязана своим происхождением восходящему потоку верхнемантийной ячейки, насыщенному гидратированным веществом океанской литосферы.

Восходящий поток мантийной ячейки ослабляет прочность литосферы и под действием растягивающих напряжений, вызванных «волокущей» силой сцепления возвратного потока с подошвой литосферы, происходит механический отрыв от Баренцево-Карской окраины «первой меловой полосы» блоков в виде хребтов Альфа и

Менделеева и образованием утоненных областей континентальной коры в их тылу, формирующих котловины Макарова и Подводников (рис.5). Процесс отрыва и последующего отодвигания хребтов Альфа и Менделеева от Баренцевоморской окраины, сопровождаемый рифтогенным расширением бассейнов Макарова и Подводников, происходил в интервале времени от 110 до 60 млн. лет [Лобковский Л.И. и др., 2010; 2011; Лаверов Н.П. и др., 2013]. В течение этого периода в силу непрерывного поступления нового материала океанской литосферы из зоны субдукции в область верхнемантийной ячейки под литосферу Арктики горизонтальный размер ячейки увеличивался как за счет отступления зоны субдукции в сторону Тихого океана, так и благодаря продвижению фронта ячейки вглубь Баренцевоморской окраины. Последнее обстоятельство в конце концов привело к отрыву «второй кайнозойской полосы» тектонических блоков в форме линейного хребта Ломоносова от Баренцевоморской окраины и образованию в тылу отодвигающегося хребта в кайнозойский период Евразийского бассейна благодаря сначала утонению континентальной коры, а затем медленному спредингу с формированием котловин Амудсена и Нансена, разделенных хребтом Гаккеля [Лобковский Л.И. и др., 2010; 2011; Лаверов Н.П. и др., 2013] (рис.5).

Описанная и смоделированная нами последовательность событий, сформировавших основные структуры Американо-Евразийского и Евразийского бассейнов Северного Ледовитого океана, кинематически представлена в известных реконструкциях К. Скотиза [2011], опиравшегося на ранние работы Зоненшайна и Натапова [1987]. К сожалению, в этих реконструкциях, как было отмечено выше, имеется внутреннее противоречие, связанное с принятым механизмом субдукции литосферы Канадской котловины под Баренцевоморскую окраину и затем под хребет Альфа-Менделеева в меловой период, поскольку никаких следов внутриарктической субдукции не существует. Выходом из данного противоречия представляется такая модификация кинематических реконструкций К. Скотиза, в которой отсутствует механизм внутриарктической субдукции и при этом сохраняются основные этапы образования структур Американо-Евразийского бассейна.

Такие новые реконструкции выполнены в настоящей работе и представлены на рис. 6б. Главное их отличие от реконструкций К. Скотиза (рис. 6а) состоит в том, что вместо сомнительной внутриарктической меловой субдукции под Баренцевоморскую окраину и хребет Альфа-Менделеева новые реконструкции основываются на общепринятых представлениях о субдукции литосферы палео-Тихого океана под Аляску-Чукотку и на рассмотренной выше геодинамической модели верхнемантийной ячейки, образующей с этой субдукцией единую конвективную систему. В геометрическом плане наибольшее отличие реконструкций К. Скотиза от их модифицированного аналога относится к условному «начальному» моменту времени около 110 млн. лет, когда в Арктической литосфере установились условия субширотного растяжения после закрытия Южно-Аньюского палеоокеана и образования Канадской котловины. В варианте К. Скотиза Канадская котловина представляет собой весьма значительный по размерам бассейн с поперечником более 2 тыс. км (рис. 6а). В процессе реконструкций площадь Канадской котловины уменьшалась ровно на величину появляющейся новообразованной площади хребтов Альфа и Менделеева и котловин Макарова и Подводников, сохраняя при этом общий пространственный баланс площадей. В итоге к началу кайнозоя (60 млн. лет) весь Американо-Евразийский бассейн занимал площадь, равную площади одной Канадской котловины на время ее образования около 110 млн. лет. В новых реконструкциях начальная площадь образованной Канадской котловины на момент 110 млн. лет равна ее сегодняшней площади, т.е. примерно в 4 раза меньше начальной площади

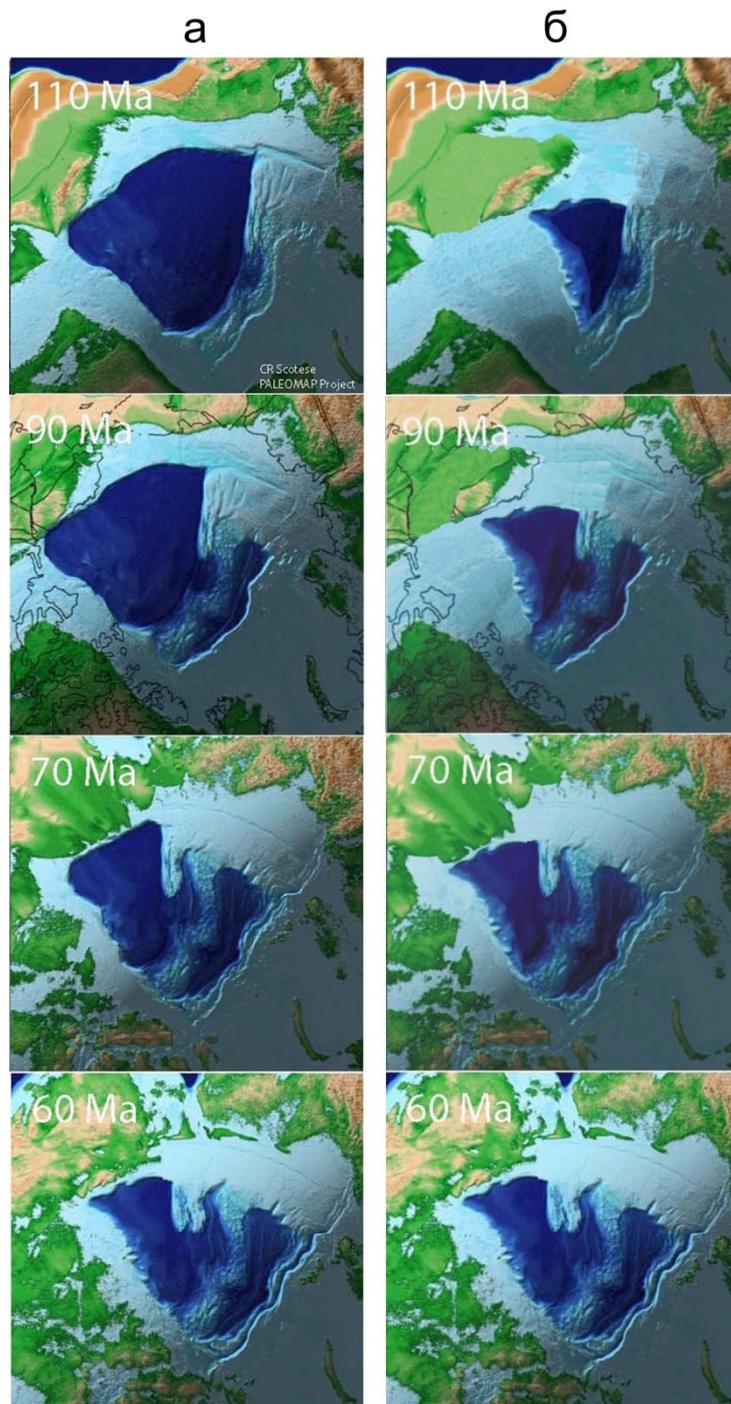


Рис. 6. Палеогеодинамическая реконструкция раскрытия Амеразийского бассейна: (а) Реконструкции Северного Ледовитого океана. на 60, 70, 90 и 110 млн лет назад по [Scotese C. R., 2011]; (б) Авторская реконструкции Северного Ледовитого океана на 60, 70, 90 и 110 млн лет назад выполненная в стилистике [Scotese C. R., 2011]

Канадской котловины по К. Скотизу (рис. 6а). В дальнейшем последовательное образование структур Амеразийского бассейна, включая хребты Альфа и Менделеева вместе с котловинами Макарова и Подводников происходило за счет непрерывного отступления в сторону Тихого океана зоны субдукции, расположенной на окраине Арктической литосферы, что также обеспечивало общий баланс площадей. Однако в предложенных реконструкциях нет внутренних противоречий и они полностью отвечают всем имеющимся на сегодня геолого-геофизическим данным.

Литература

1. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: ГЕО, 2001. 409 с.
2. Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1188-1203.
3. Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М. Тектоническая история Арктики // В кн.: Актуальные проблемы тектоники океанов и континентов. М.: Наука, 1987. С. 31-57.
4. Зорин Ю. А., Турутанов Е. Х. Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. №7. С. 685-699.
5. Зорин Ю. А., Балк Е.В., Новоселова М.Р., Турутанов Е.Х. Толщина литосферы под Монголо-Сибирской горной страной и сопредельными регионами // Физика Земли. 2006. № 7. С. 32-42.
6. Имаев В. С., Имаева Л. П., Козьмин Б. М. Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС. 2000. 227 с.
7. Коваленко В. И., Ярмолюк В. В., Богатиков О. А. Новейший вулканизм и его связь с процессами межплитного литосферного взаимодействия и глубинной геодинамикой. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1204-1221.
8. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3-35.
9. Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 года: существует ли плита Берингия? / Геодинамика и прогноз землетрясений. Вычислительная сейсмология. Вып. 26. М.: Наука, 1994. С. 103–122.
10. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. – М.: Научный мир, 2004. – 612 с.
11. Лобковский Л.И., Вержбицкий В.Е., Кононов М.В., Шрейдер А.А., Гарагаш И.А., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Котелкин В.Д., Верниковский В.А. Геодинамическая модель эволюции арктического региона в позднем мезозое – кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Арктика. Экология и экономика. 2011. № 1. С. 104-115.
12. Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Кононов М.В., Вержбицкий В.Е., Котелкин В.Д. Тектоника деформируемых литосферных плит и геодинамическая эволюция Арктического региона в мезозое-кайнозое / Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 8-40.
13. Лобковский Л.И. Успехи и трудности теории тектоники плит: обобщение классической парадигмы на примере арктического региона. // Кн. Мировой океан Том. 1. М: Научный Мир. Ред. Л.И.Лобковский. 2013. С.
14. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. (ред.). Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: Наука, 2001. 571 с.
15. Пучков В.Н. «Великая дискуссия» о плюмах: так кто же все-таки прав? // Геотектоника. 2009. № 1. С. 3-22.
16. Alvey A., Gaina C., Kuszniir N. J., Torsvik T. H. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic // Earth and Planetary Science Letters. 2008. V. 274. № 3. P. 310-321.
17. Bruvoll V., Kristoffersen Y., Coakley B. J., Hopper J. R. Hemipelagic deposits on the Mendeleev and northwestern Alpha submarine Ridges in the Arctic Ocean: acoustic stratigraphy, depositional environment and an inter-ridge correlation calibrated by the ACEX results // Marine Geophysical Researches. 2010. V. 31. № 3. P. 149-171.

18. Bruvoll V., Kristoffersen Y., Coakley B. J., Hopper J. R., Planke S., Kandilarov A. The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean. *Tectonophysics*. 2012. V. 514. P. 123-145.

19. Churkin Jr. M., Trexler Jr. J. H. Circum-Arctic plate accretion—Isolating part of a Pacific plate to form the nucleus of the Arctic Basin // *Earth and Planetary Science Letters*. 1980. V. 48. № 2. P. 356-362.

20. Churkin Jr. M., Trexler Jr. J. H. Continental plates and accreted oceanic terranes in the Arctic // *The Arctic Ocean*. Springer US. 1981. P. 1-20.

21. Dove D., Coakley B., Hopper J., Kristoffersen Y. Bathymetry, controlled source seismic and gravity observations of the Mendeleev ridge; implications for ridge structure, origin, and regional tectonics // *Geophys. J. Int.* V. 183. № 2. P. 481-502, doi: 10.1111/J.1365-246X.2010.04746.X.

22. Golonka, J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region // Spencer, A. M., Embry, A. F., Gautier, D. L., Stoupakova, A. V. and K. Sorensen (eds) *Arctic Petroleum Geology*. Geological Society, London Memoir. 2011. V. 35. P. 79-129.

23. Golonka J., Bocharova N. Y., Ford D., Edrich M. E., Bednarczyk J., Wildharber J. Paleogeographic reconstructions and basins development of the Arctic // *Marine and Petroleum Geology*. 2003. V. 20. № 3. P. 211-248.

24. Grantz A., Clark D. L., Phillips R. L., Srivastava S. P., Blome C. D., Gray L. B., Haga H., Willard D. A. Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada basin, and the geometry and timing of rifting in the Amerasia basin, Arctic Ocean. // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1998. 110. № 6. P. 801-820.

25. Grantz A., Eittreim S., Dinter D. A. Geology and tectonic development of the continental margin north of Alaska // *Tectonophysics*. 1979. V. 59. № 1. P. 263-291.

26. Herron E. M., Dewey J. F., Pitman W. C. Plate tectonics model for the evolution of the Arctic // *Geology*. 1974. V. 2. № 8. P. 377-380.

27. Hutchinson D.R., Lebedeva-Ivanova N., Jackson R., Shimeld J., Mosher D., Chian D., Hart P. Seismic interpretation in the Arctic and recent U.S. Seismic Data Acquisition, Summer, 2011 // *Workshop on scientific issues on geomorphological and plate tectonic reconstructions in the Arctic Ocean and its implications for submissions according to UNCLOS Article 76 with representatives and scientists from Canada, Denmark, Norway, the Russian Federation and USA*. Copenhagen, GEUS, November 15-16, 2011. Compact Disk.

28. Jackson H. R., Forsyth D. A., Johnson G. L. Oceanic affinities of the Alpha Ridge, Arctic Ocean // *Marine geology*. 1986. V. 73. № 3. P. 237-261.

29. Jackson H. R., Gunnarsson K. Reconstructions of the Arctic: Mesozoic to present // *Tectonophysics*. 1990. V. 172. № 3. P. 303-322.

30. Jackson H.R., Mudie P.J., Blasco S.M. (Eds.) Initial Geological Report on CESAR — The Canadian Expedition to Study the Alpha Ridge, Arctic Ocean // *Geological Survey of Canada Paper*. 1985. V. 84-22. 177 p.

31. Jokat W. Seismic investigations along the western sector of Alpha Ridge, Central Arctic Ocean // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 152. №1. P. 185-201. doi:10.1046/j.1365-246X.2003.01839.x

32. Jokat W., Micksch U. Sedimentary structure of the Nansen and Amundsen basins, Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, L02603, 4 S. doi:10.129/2003GL018352

31. Jokat W. The sedimentary structure of the Lomonosov Ridge between 88°N and 80°N: Consequences for tectonic and glacial processes // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 163. P. 698-726, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02786.x

32. Jokat W., Ickrath M., O'Connor J. Seismic transect across the Lomonosov and Mendeleev ridges: Constraints on the geological evolution of the Amerasia Basin, Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. № 19. P. 5047-5051.

33. Jones, P. B. Evidence from Canada and Alaska on plate tectonic evolution of the Arctic Ocean Basin // *Nature*. 1980. V. 285. P. 215-217.
34. Kazmin Y. B., Laverov N.P., Nikishin A.M., Glumov I.F., Petrov E. I., Poselov V. A., Lobkovsky L.I., Morozov A.F., Petrov O.V., Kashubin S.N. History of Amerasia Basin in light of new data // International Conference "Geological Structure and Evolution Problems of the Arctic Basin in the Context of Submission on the Outer Limits of the Continental Shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean". Saint-Peterburg. Russia. May 27-28, 2014a. Compact Disk.
35. Kazmin Y., Glumov I., Nikishin A., Malishev N., Petrov E. Geological structure of sedimentary sequences of the Amerasia Basin in central Arctic Based on seismic data interpretation // International Conference "Geological Structure and Evolution Problems of the Arctic Basin in the Context of Submission on the Outer Limits of the Continental Shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean". Saint-Peterburg. Russia. May 27-28, 2014b. Compact Disk.
36. Koulakov I. Y., Gaina C., Dobretsov N. L., Vasilevsky A. N., Bushenkova N. A. Plate reconstructions in the Arctic region based on joint analysis of gravity, magnetic, and seismic anomalies // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V. 54. № 8. P. 859-873.
37. Lane L. S. Canada Basin, Arctic Ocean: evidence against a rotational origin // *Tectonics*. 1997. 16. № 3. 363-387.
38. Lawver L. A., Grantz A., Gahagan L. M. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician // *Geol. Soc. Amer. Spec. Papers*. 2002. P. 333-358.
39. Lawver L. A., Müller R. D., Srivastava S. P., Roest W. The opening of the Arctic Ocean // *Geological history of the polar oceans: Arctic versus Antarctic*. Springer Netherlands. 1990. P. 29-62.
40. Lebedeva-Ivanova N. N., Zamansky Y. Y., Langinen A. E., Sorokin M. Y. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82 N: evidence of continental crust // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 165. № 2. P. 527-544.
41. Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Kozmin B.M., Imaeva L.P. Seismicity of the Bering Strait region: Evidence for a Bering block // *Geology*. 1997. V. 25. P. 979-982.
42. Miller E.L., Verzhbitsky V.E. Structural studies near Pevek, Russia: Implications for formation of the East Siberian Shelf and Makarov Basin of the Arctic Ocean // Stone D. B., Fujita K., Lauer P. W., Miller E. L., Prokopiev A. V., Toro J. *Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov*. EGU Stephan Mueller Publication Series. 2009. V. 4. P. 223-241.
43. Miller E. L., Toro J., Gehrels G., Amato J. M., Prokopiev A., Tuchkova M. I., Akinin V. V., Dumitru T. A., Moore T. E., Cecile M. P. New insights into Arctic paleogeography and tectonics from U-Pb detrital zircon geochronology // *Tectonics*. 2006. V. 25. № 3. TC3013, doi:10.1029/2005TC001830.
44. Miller E. L., Gehrels G. E., Pease V., Sokolov S. Stratigraphy and U-Pb detrital zircon geochronology of Wrangel Island, Russia: Implications for Arctic paleogeography // *AAPG Bull.* 2009. V. 94. № 5. P. 665-692.
45. Mosher D. C., Shimeld J., Hutchinson D., Lebedeva-Ivanova N., Mayer L., Chapman B. Sedimentology in Canada Basin // Workshop on scientific issues on geomorphological and plate tectonic reconstructions in the Arctic Ocean and its implications for submissions according to UNCLOS Article 76 with representatives and scientists from Canada, Denmark, Norway, the Russian Federation and USA. Copenhagen, GEUS, November 15-16, 2011. Compact Disk.
46. Pitman W. C., Talwani M. Sea-floor spreading in the North Atlantic. // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1972. V. 83. № 3. P. 619-646.

47. Rowley D. B., Lottes A. L. Plate-kinematic reconstructions of the North Atlantic and Arctic: Late Jurassic to present. // *Tectonophysics*. 1988. V. 155. № 1. P. 73-120.
48. Savostin L. A., Natapov L. M., Stavsky A. P. Mesozoic paleogeodynamics and paleogeography of the Arctic region // *Geol. Congress. Arctic geology. Reports*. 1984. V. 4. P. 217-237.
49. Scotese C. R. Paleogeographic Reconstructions of the Circum-Arctic Region since the Late Jurassic // *Search and Discovery Article #30193*. Adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, April 10-13, 2011. (2011). Posted September 30, 2011.
50. Shokalsky S.P., Morozov A.F., Petrov O.V., Kashubin S.N., Kremenetsky A.A., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Shatov V.V., Vinokurov I.Yu., Rekant P.V., Gusev E.A., Grikurov G.E. New data on geology of the Central Arctic seafloor highs (results of analytical studies of bottom rock samples collected during the "Arctic-2012" cruise) // *International Conference "Geological Structure and Evolution Problems of the Arctic Basin in the Context of Submission on the Outer Limits of the Continental Shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean"*. Saint-Peterburg. Russia. May 27-28, 2014. Compact Disk.
51. Vogt P. R., Bernero C., Kovacs L., Taylor P. Structure and plate tectonic evolution of the marine Arctic as revealed by aeromagnetism // *Oceanologica Acta*. 1981. V. 4. P. 25-40.
52. Weber J. R. The Alpha Ridge: gravity, seismic and magnetic evidence for a homogenous, mafic crust // *J. of Geodynamics*. 1986. V. 6. № 1. P. 117-136.
53. Weber J. R. The structures of the Alpha Ridge, Arctic Ocean and Iceland-Faeroe Ridge, North Atlantic: comparisons and implications for the evolution of the Canada Basin // *Marine Geology*. 1990. V. 93. P. 43-68.
54. Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics. // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2004. V. 146. № 1. P. 3-34.
55. Zonenshain L. P., Natapov L. M. Tectonic history of the Arctic region from the Ordovician through the Cretaceous. 1989. Springer US. P. 829-862.