

УДК 551.242.11

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕМАНТИЙНОЙ КОНВЕКЦИИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИТОСФЕРЫ АРКТИКИ В МЕЗОЗОЕ И КАЙНОЗОЕ

© 2013 г. Л. И. Лобковский¹, Э. В. Шипилов², М. В. Кононов¹

¹Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), г. Москва

E-mail: llobkovsky@ocean.ru

²Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, г. Мурманск

E-mail: shipilov@pgi.ru

Поступила в редакцию 12.11.2012 г.

В работе по результатам интерпретации комплекса геолого-геофизической информации и палеотектонических реконструкций, выполненных с учетом данных глубинной сейсмофотографии, обосновывается новый глубинный геодинамический механизм образования и эволюции Амеразийского и Евразийского бассейнов и окружающих их геоструктур Арктического региона. Рассмотрены мезозойско-кайнозойские трансформации литосферы ряда областей Северного Ледовитого океана, роль и место в этих процессах верхнемантийной конвекции и хронологическая последовательность главных структурообразующих событий.

Ключевые слова: Арктический регион, геолого-геофизические данные, геодинамический анализ, трансформации литосферы, поля напряжений, глубинная сейсмофотография, мантийная конвекция, плюм, литосферная плита, рифтогенез, магматизм, спрединг, субдукция, палеотектонические реконструкции.

DOI: 10.7868/S0002333713060100

ВВЕДЕНИЕ

В геологической истории развития Северного Ледовитого океана (рис. 1) наиболее изученным этапом является кайнозойский, обусловленный спредингом в хребте Гаккеля и связанный с проникновением в Арктику Срединно-Атлантического хребта. Это привело к образованию глубоководного Евразийского бассейна с четко выраженным набором кайнозойских полосовых магнитных аномалий океанической коры расположенных по обе стороны хребта Гаккеля и отображением последнего в гравитационном поле (рис. 2).

Если спрединговая природа Евразийского бассейна сегодня не вызывает сомнения у большинства исследователей, то происхождение структур Амеразийского бассейна (все еще слабо изученного геофизическими методами), включающего Канадскую котловину, поднятия Менделеева и Альфа, котловины Макарова и Подводников (рис. 1, рис. 2), до сих пор является предметом научных дискуссий. Так, предполагаемый меловой палеоспрединговый центр Канадского бассейна находит отражение в структуре аномалий гравитационного поля (рис. 2), а в структуре магнитного определяется неоднозначно. Однако полученные в последние годы материалы сейсмических работ [Dinkelman et al., 2008; Helwig et al., 2010;

Hutchinson et al., 2009] подтверждают наличие структур растяжения (рис. 3а) и следа отмершего спредингового центра (рис. 3б) в основании осадочного чехла соответственно в центральной и южной частях Канадского бассейна.

В отношении генезиса Канадской котловины наиболее широкое распространение получила “ротационная” модель ее раскрытия (последняя версия [Grantz, Hart, 2012]) с многочисленными вариантами модификаций других авторов. Но в сопровождающих эти варианты палеореконструкциях остается множество проблем и главные из них **касательно Арктического региона** связаны с межплитными зияниями или перекрытиями плит, которые до сих пор не удается решить в рамках классической концепции тектоники плит [Зоненшайн и др., 1990; Miller et al., 2006; и др.].

Обращают на себя внимание и специфические особенности строения и эволюции литосферы океана в Арктике. Прежде всего, следует отметить, что конечные спрединговые центры Арктической Атлантики – Книповича, Моллой и Гаккеля – в Евразийском бассейне находятся как бы в “заторе” подавляющих по площади континентальных плит, а для спрединга свойственна нестабильность, ультрамедленная скорость, а нередко и отмирание спрединговых центров в мезозое и,

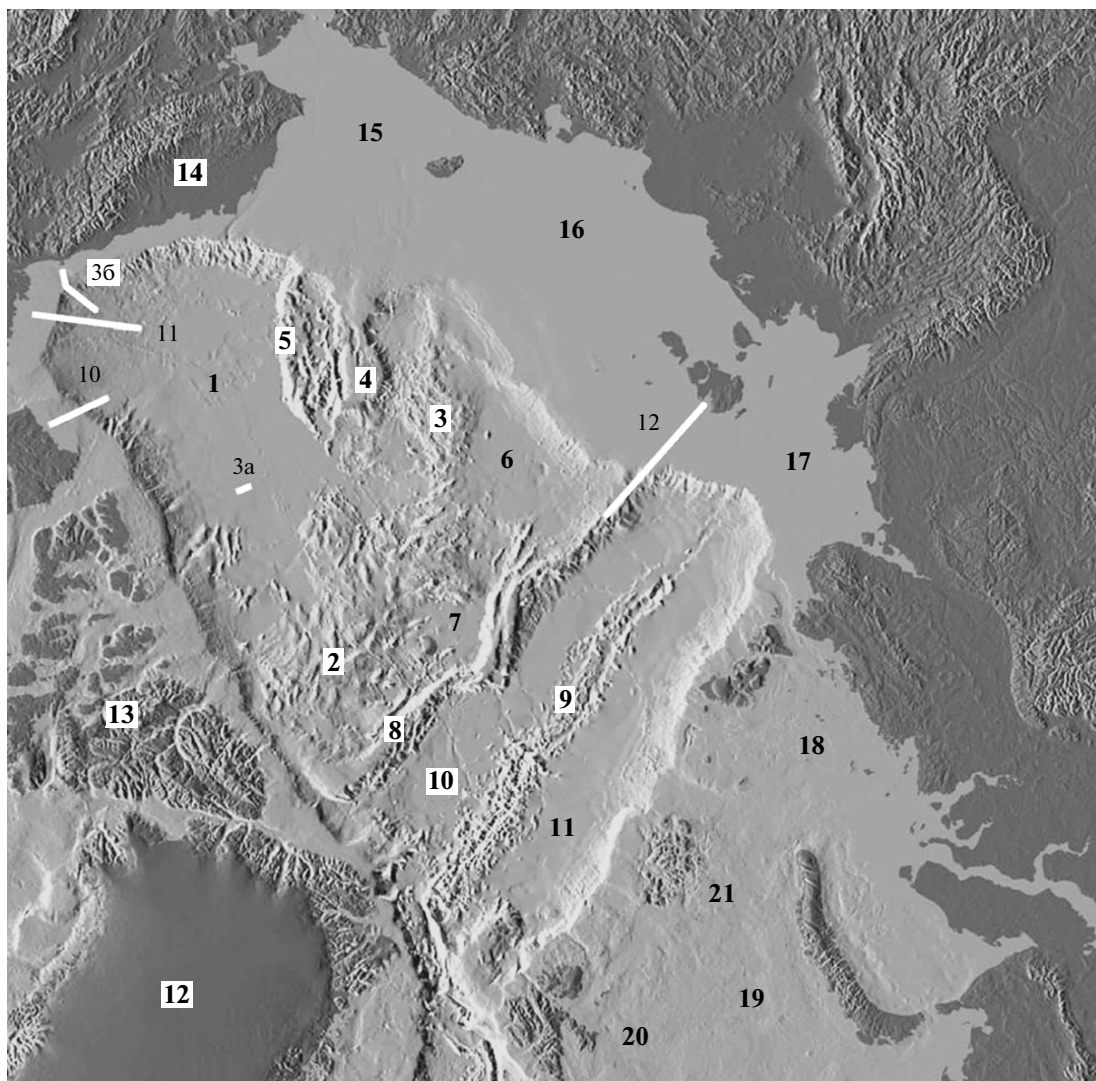


Рис. 1. Рельефная карта Арктического региона и прилегающих областей с положением обсуждаемых геолого-геофизических разрезов.

Цифры: 1 – Канадская котловина, 2 – хр. Альфа, 3 – хр. Менделеева, 4 – Чукотское плато, 5 – хр. Нортвинд, 6 и 7 – котловины Подводников и Макарова, 8 – хр. Ломоносова, 9 – срединно-океанический хр. Гаккеля, 10 и 11 – котловины Амундсена и Нансена Евразийского бассейна, 12 – Гренландия, 13 – Канадский Арктический архипелаг, 14 – Аляска; 15, 16, 17, 18 и 19 – шельф соответственно Чукотского, Восточно-Сибирского, Лаптевых, Карского и Баренцева морей; 20 и 21 – архипелаги Шпицберген (Свальбард) и Земля Франца-Иосифа.

Белые линии и обозначения около них – положение разрезов с указанием номеров соответствующих рисунков.

особенно, в кайнозое. В этом отношении вся Северная Атлантика за зоной разломов Чарли Гиббса, представляет собой, образно говоря, “кладбище” отмерших спрединговых центров. Средняя продолжительность функционирования здесь спрединговых центров составляла 25–35 млн лет, после чего они либо отмирали, либо скорость генерирования ими океанической коры падала до минимально возможной для их существования [Шипилов, 2008], что наблюдается и сейчас в хребтах Книповича и Гаккеля. При этом отчетливо выраженных признаков субдукционных процессов здесь не установлено. Поэтому предпола-

галось, что балансировка аккреции океанической коры достигалась за счет субдукции в значительно удаленных зонах расположенных в северном сегменте Тихого океана. Сопровождающий раскрытие Евразийского бассейна магматизм на континентальных окраинах Северного Ледовитого океана проявился крайне скудно.

Что касается Канадской океанической впадины, то ее раскрытие было длительным, сложным и полициклическим. Однако плюмовый магматизм сопровождавший ее развитие практически на всех этапах эволюции проявился на континентальных окраинах весьма заметно и длился по-

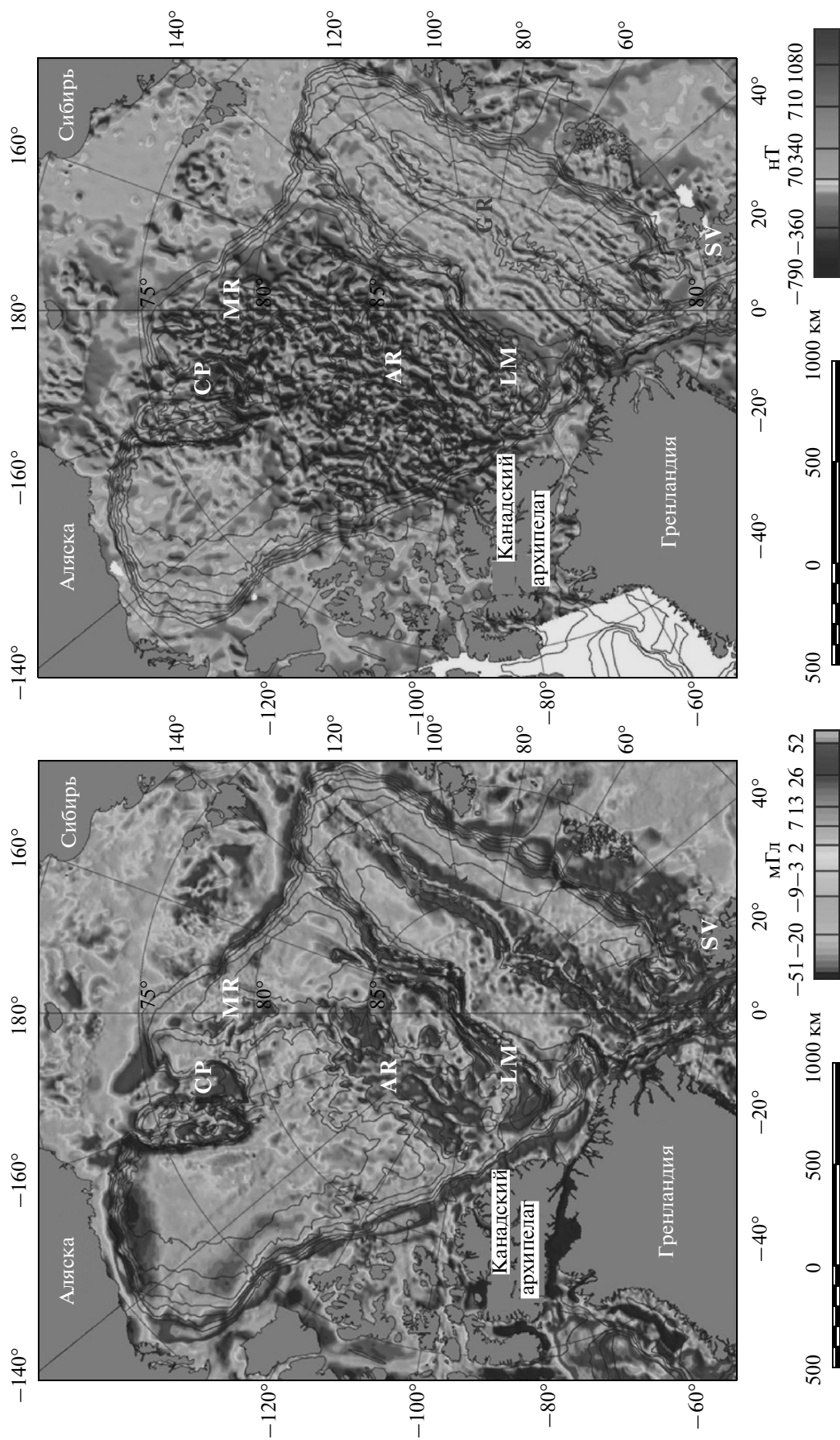


Рис. 2. Карты аномалий геофизических полей Арктического региона: слева – гравитационные аномалии в свободном воздухе (мГл) [Forsberg, Kelson, 2004]; справа – магнитные аномалии (нТ) [Kovacs et al., 2002]. Буквенные обозначения: AR – хр. Альфа, CP – Чукотское плато, GR – срединно-океанический хр. Гаккеля, LM – хр. Ломоносова, MR – хр. Менделеева, SV – арх. Свальбард.

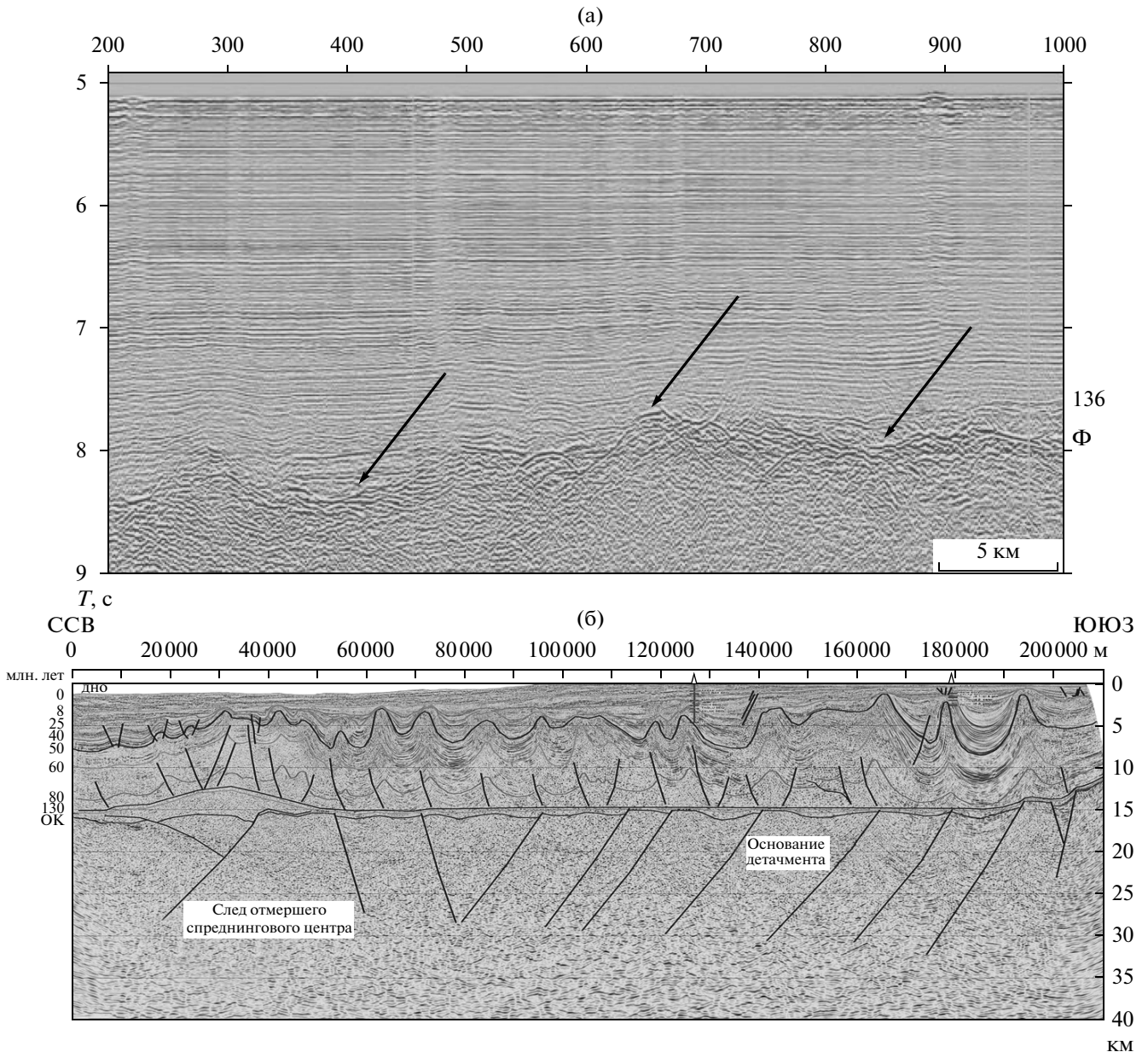


Рис. 3. Сейсмические разрезы Канадского бассейна: (а) – фрагмент сейсмического разреза [Hutchinson et al., 2009] (положение на рис. 1) иллюстрирующий строение осадочного комплекса и фундамента (Ф) центральной части Канадского бассейна. Стрелками отмечены структуры растяжения в фундаменте выполненные синрифтовыми отложениями. 136 – возможный возраст (млн лет) отражающего сейсмического горизонта, связанного с несогласием в кровле синрифтовых отложений; (б) – фрагмент сейсмического разреза южной части Канадского бассейна [Dinkelman et al., 2008; Helwig et al., 2009] (с изменениями, положение рис. 1), иллюстрирующий закартированный инверсированный грабен, лежащий на продолжении мелового спредингового центра Канадской впадины и строение зоны сжатия маркируемой складками осадочного чехла сложенными меловыми – миоценовыми отложениями, сформированными над детачментом. Длина профиля 200 км, глубина записи 40 км.

рядка 100 млн лет, что позволяет говорить о его уникальности и резко отличает по времени действия, скажем, от Сибирского суперплюма. Раскрытие Канадской спрединговой впадины сопровождалось коллизионно-конвергентными и субдукционными процессами, сформировавшими, в частности, один из главных тектонических швов

региона – Южно-Анюйскую офиолитовую сутуру, которая маркирует закрытие в позднеюрско-раннемеловое время одноименного, или Ангаучам по [Moore et al., 1994] палеоокеана. Спрединг в Канадском бассейне окончательно прекратился около 90 млн лет назад. Особо подчеркнем, что последующие рифтогенно-спрединговые осевые

центры в позднем мелу—кайнозое (бассейны Макарова-Подводников и Евразийский) заняли ортогональную позицию по отношению к таковому в Канадском бассейне.

Все изложенное дает основание говорить, что отмеченные особенности геодинамической эволюции литосферы Арктического океана предполагают значительные отличия от глубинного механизма преобразования Тихоокеанской литосферы, где ее движение отражает устойчивый процесс развития общемантийной конвекции. Создается впечатление, что условия ограниченного пространства океанической литосферы и доминирования континентальных плит в полярной области не способствовали достаточному “разгону” и запуску в рассматриваемом регионе в позднемеловое-кайнозойское время механизма полномасштабного (по эндогенным энергетическим возможностям) спредингового “конвейера”.

В представленной работе по результатам интерпретации комплекса геолого-геофизической информации и палеотектонических реконструкций, выполненных с учетом данных глубинной сейсмофотографии, рассмотрены тектоно-геодинамические трансформации литосферы Арктического региона в мезозое—кайнозое и обосновывается новый глубинный геодинамический механизм образования и эволюции Амеразийского и Евразийского бассейнов.

МЕЗОЗОЙСКАЯ ГЕОДИНАМИКА

Анализ геолого-геофизических данных показывает, что в позднемеловое-кайнозойское время центральная часть Арктического региона (представленная останцами древнего континента Арктида [Верниковский и др., 2010; Лаверов и др., 2012; Лобковский и др., 2010; Хаин и др., 2009] последовательно прошла через две основные геодинамические фазы развития, характеризующиеся принципиально различными полями напряжений в литосфере [Лаверов и др., 2012; Лобковский и др., 2010; Шипилов, 2004; 2008].

Первая фаза, продолжавшаяся с поздней юры до апта, характеризовалась полем напряжений с существенной компонентой растяжения в направлении от северо-запада к юго-востоку. Это привело к отрыву Чукотско-Аляскинской системы блоков Арктиды от Северо-Американского континента, образованию между ними Канадского океанического бассейна, движению Чукотки на юг, ее коллизии с Евразийской окраиной и закрытию Южно-Аньюского (Ангаючам по [Moore et al., 1994] палеоокеана (рис. 4). Кроме того, в результате столкновения Чукотско-Аляскинской микроплиты с Евразией формировалась субшироко эшелонированная система складчато-надвиговых поясов, протянувшаяся от Новосибир-

ских островов через Чукотку и ее шельф к хребту Брукса на Аляске. Становление этих поясов сопровождалось развитием субпараллельных им форландовых бассейнов.

Вторая фаза эволюции началась с возникновения в апте (~120 млн лет) постколлизийного субширотного поля растягивающих напряжений, которое в течение апт-альбского времени и позднего мела обусловило образование рифтогенных структур Центрально-Арктической области литосферы, включая бассейны Макарова и Подводников, а также хребет Альфа-Менделеева [Лаверов и др., 2012; Лобковский и др., 2010; Шипилов, 2004; 2008].

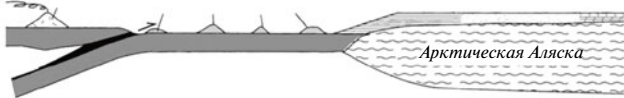
В кайнозое действие этого силового поля реализовалось в отколе хребта Ломоносова от Баренцево-Карско-Лаптевской континентальной окраины и возникновении спредингового центра Евразийского бассейна (рис. 5).

Остановимся на геодинамическом анализе движущих сил тектонической эволюции Арктики, которые, как представляется, привели к раскрытию Канадской котловины в поздней юре—раннем мелу. Многочисленные исследования показывают, что арктическая область Северо-Американской плиты (с включенным в нее континентом Арктида) в триасе и юре была окружена двумя палеоокеанами: Палео-Тихим (Пацификом) и Южно-Аньюским (Ангаючам или Протоарктическим). Последний отделял Канадскую окраину Северо-Американской плиты от Сибирской окраины Евразийской плиты значительным океаническим пространством, сузившимся к началу мела до ширины 500—1000 км (рис. 4). Начиная с юры, к постоянно действующей субдукции литосферы океана Пацифик добавляется субдукция в Южно-Аньюском океане [Лаверов и др., 2012; Лобковский и др., 2010; Moore et al., 1994]. Поэтому естественно предположить, что основной причиной раскрытия Канадской котловины в поздней юре—раннем мелу, явился интенсивный сток мантийного вещества в сопряженных зонах субдукции литосферы северо-западной Пацифики и Южно-Аньюского (Ангаючам) океана [Лобковский и др., 2010].

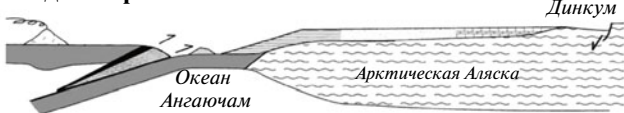
Такой нисходящий мантийный поток в зонах субдукции предполагает наличие развитой мантийной конвекции. При этом возникает вопрос, охватывают ли ячейки конвекции всю мантию или имеет место структура двухъярусной конвекции с отдельными ячейками в верхней и нижней мантии. Выбор формы и структуры конвекции наиболее обоснованно может быть сделан, исходя из палеомагнитных данных о движении материков и результатов сейсмофотографии внутреннего строения Земли. Если обратиться к сейсмофотографическим разрезам верхней мантии для областей перехода от Тихого океана к Северо-Восточной и Восточной Азии [Жао и др., 2010; Кула-

Средняя юра

Вулканическая дуга
Океан Ангаючам
Океанические горы и плато



Поздняя юра



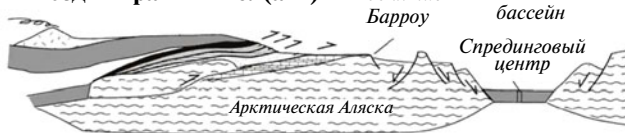
Ранний мел(берриас)



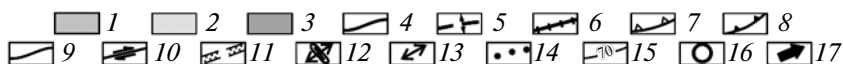
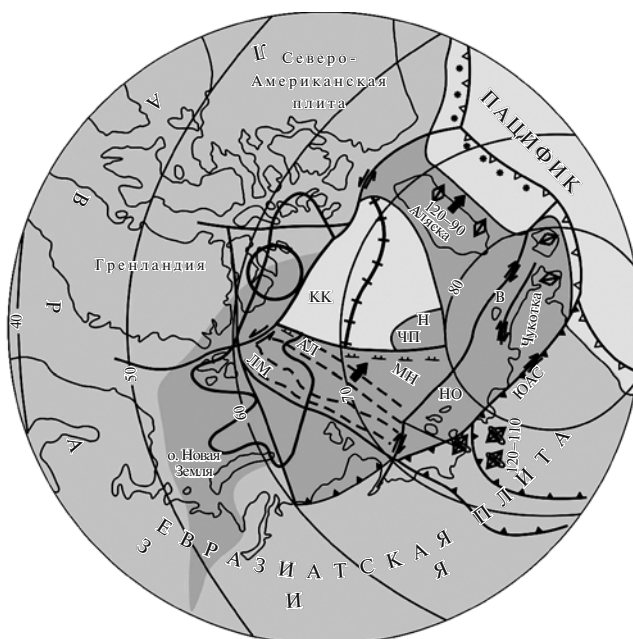
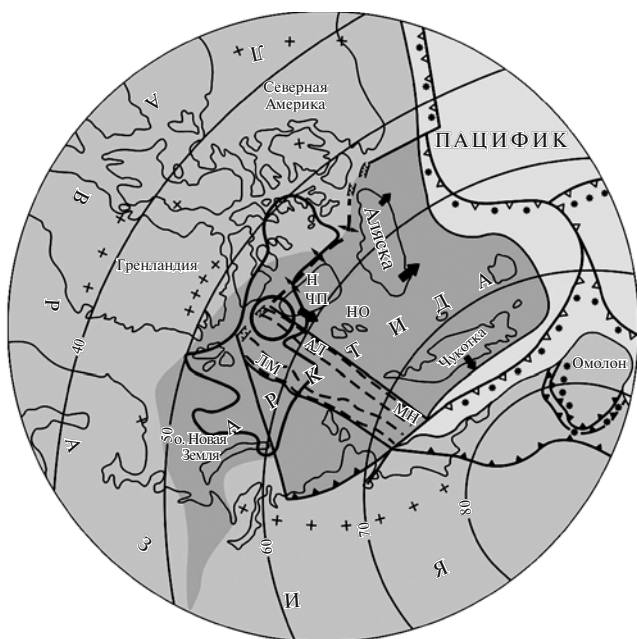
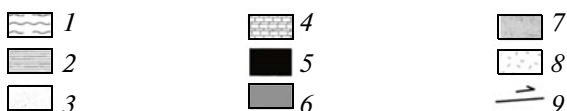
Средина раннего мела(готерив)



Поздний ранний мел(апг)



Конец раннего мела(альб)



ков и др., 2011; Zhao et al., 2009], то вырисовывается совершенно определенная картина конвекции. Из полученных обобщенных разрезов мантии было сделано предположение [Жао и др., 2010; Zhao et al., 2009], что погружающееся в зонах субдукции холодное вещество, достигая переходной зоны между верхней и нижней мантией, может переходить в протяженный горизонтальный слой холодного мантийного вещества, кото-

рый распространяется далеко (до 2 и более тысяч километров) под Евразийский континент. Такая картина указывает на развитие ячейки верхнемантической конвекции, нижняя горизонтальная ветвь которой течет под континент вдоль переходной зоны между нижней и верхней мантией. А верхняя ветвь формирует возвратный поток вещества под литосферой в сторону Тихоокеанской зоны субдукции, приводя к растяжению континен-

Рис. 4. Палеотектонические разрезы (вверху) по [Moore et al., 1994] (с изменениями) и палеогеодинамические реконструкции Арктики на 150 млн лет (поздняя юра) и 120 млн лет (ранний мел, апт).

Условные обозначения к разрезам:

1 – доверхнедевонские породы; 2 – образования террейна Гор Де Лонга; 3 – образования террейна Гор Эндикот; 4 – миссисипско-меловые породы террейна Северного Склона; 5 – амфиболиты, 6 – океаническая кора; 7 – базальты и диабазы подводных гор; 8 – островодужные комплексы; 9 – направления смещений по разломам.

Условные обозначения к реконструкциям:

1 – области с континентальной корой; 2 – области с океанической корой; 3 – контуры распавшегося палеоконтинента Арктида; 4 – область магматических проявлений Арктического мантийного плюма на континентальной коре по геолого-геофизическим данным; 5 – ось спрединга; 6 – отмершие зоны спрединга; 7 – зоны субдукции; 8 – зоны надвигов; 9 – крупные зоны сдвигов, трансформных разломов; 10 – направление сдвигов, там где известно; 11 – рифты; 12 – ориентировка дайковых комплексов и направление растяжения с возрастной привязкой в млн лет; 13 – направление растяжения по структурным данным с возрастной привязкой в млн лет; 14 – островодужный магматизм; 15 – палеомагнитные широты; 16 – расчетное положение Исландского плюма; 17 – направление движения блоков Арктиды относительно Лавразии.

Буквенные обозначения: АЛ – хребет Альфа, ЛМ – хребет Ломоносова, МН – хребет Менделеева, Н – хребет Нортуинд, НО – Новосибирские о-ва, ЦФКА – Центральный фрагмент континента Арктида, ЧП – Чукотское поднятие, ЮА – Южно-Анойский (Ангаючам) океан, ЮАС – Южно-Анойская сутура.

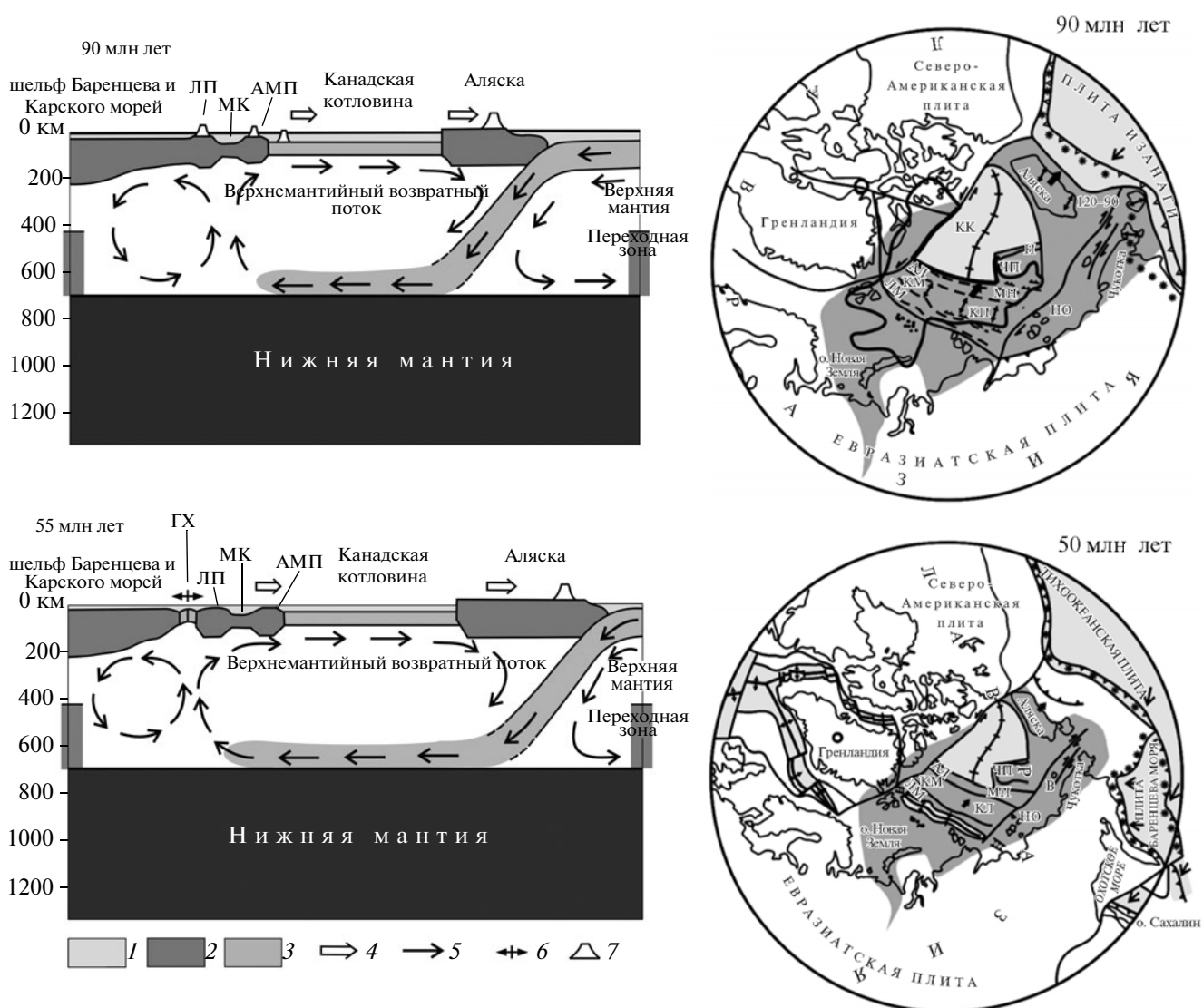


Рис. 5. Модель (слева) верхнемантийной ячейки под континентом (на 90 и 55 млн лет), вызванной процессом субдукции Тихоокеанской литосферы, и палеогеодинамические реконструкции (на 90 и 50 млн лет) (справа) для Арктического региона (условные на рис. 4).

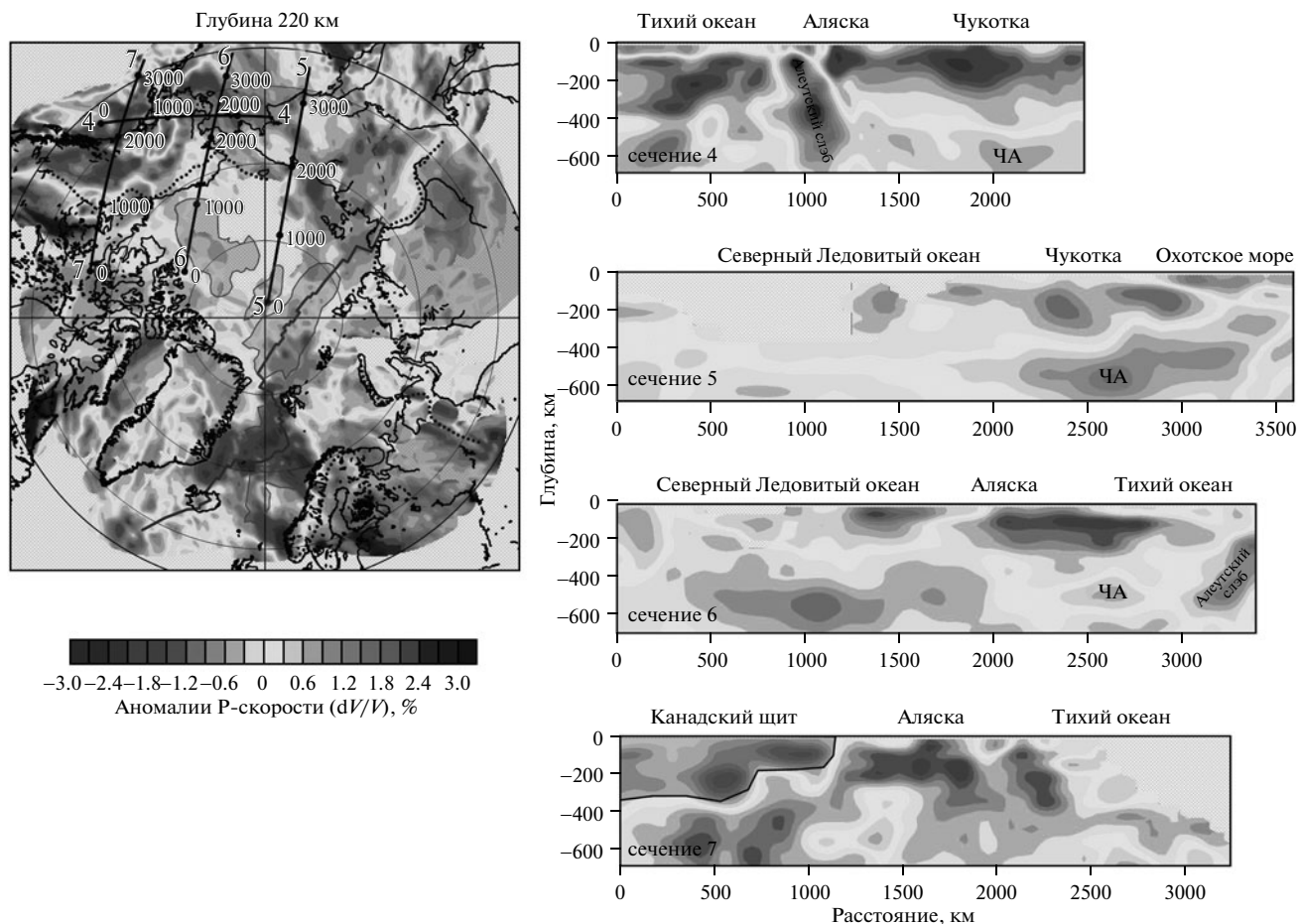


Рис. 6. Вертикальные сечения полученной модели аномалий сейсмических скоростей P -волн вдоль четырех вертикальных сечений, положение которых показано на карте [Яковлев и др., 2012]. Основные географические элементы указаны над профилями. Положение континентальных литосферных блоков подписано (см. также текст). ЧА – чукотская аномалия (холодное вещество поступающее из зоны субдукции).

тальной литосферы, рифтогенезу и связанному с ним магматизму [Лаверов и др., 2012; Лобковский и др., 2010; Шипилов, 2004; 2008] (рис. 5). Подобная гидродинамическая трактовка томографической картины мантии является более естественной, чем “статическая” интерпретация этой картины, исходящая из представления о “стагнирующей” литосферной плите, застрявшей в переходной мантийной области [Жао и др., 2010; Zhao et al., 2009]. Более детальная сейсмотомография Алеутской и Камчатской зон субдукции показала, что горизонтальное распространение субдуцирующего слэба установлено только под Южными Курилами и Японией [Кулаков и др., 2011], в остальных участках трехмерная форма слэба более сложная. Но в таком случае, после окончания субдукции остатки субдуцировавшего материала могут сохраниться только в переходной области. Действительно, последние результаты сейсмотомографии Арктического региона (рис. 6), подтверждает картину о подтекании холодного вещества верхней мантии в переходной области из зоны субдукции в

районе Аляски и Алеутской дуги под литосферу Центральной Арктики [Яковлев и др., 2012].

Комплексный анализ данных сейсмотомографии, палеомагнетизма и плитотектонических реконструкций приводит к определенной геодинамической модели мантийной конвекции, характерные черты которой заключаются в следующем. Конвекция, развивающаяся в верхней мантии под континентальной литосферой Арктики (Арктиды) и Восточной Азии является частью общемировой системы конвекции, но в данном регионе она стимулировалась непрерывным конвейерным погружением Тихоокеанской литосферы в зонах субдукции. Погружающееся холодное вещество Тихоокеанской литосферы не проникает в нижнюю мантию из-за эффекта положительной плавучести, создаваемого эндотермическим фазовым переходом вещества на границе между верхней и нижней мантией [Лобковский и др., 2004], что и модифицирует верхнемантийные ячейки конвекции. Движение самой Тихоокеан-

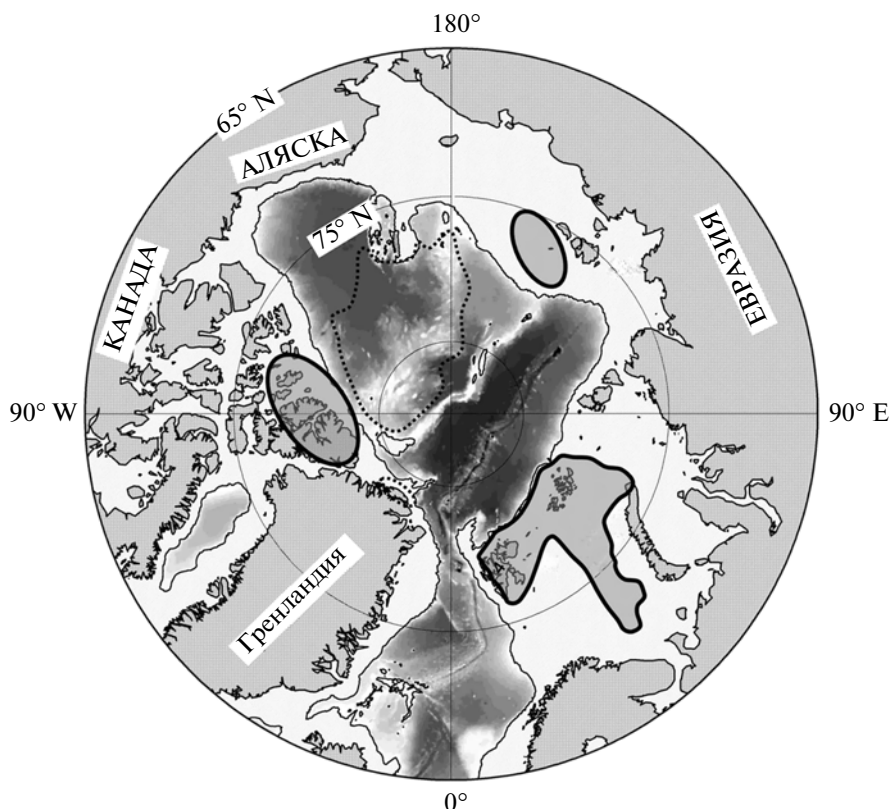


Рис. 7. Ареалы (магматические провинции, в англоязычной терминологии – LIP или HALIP*) проявления юрско-мелового (окопунктурные черной линией) и поздне-мелового (окопунктурные точечным пунктиром) базальтоидного магматизма, обусловленные действием плюма в Арктике [Шипилов, Карякин, 2010; 2011; Шипилов и др., 2009]. Поздне-меловая магматическая провинция Альфа–Менделеева занимает области одноименных хребтов и прилегающей северной части Канадского бассейна.

* LIP или HALIP – High Arctic Large Igneous Province.

ской литосферы отражает устойчивый процесс развития общемантийной конвекции с сопровождающими ее эффектами [Трубицын, 2006; 2010; 2012] в Тихоокеанском сегменте Земли. Глобальная конвекция в Тихоокеанском секторе Земли действует как внешний фактор на смежную область развития верхнемантийной конвекции под континентом, непрерывно поставляя в нижний переходный слой верхней мантии относительно холодный и тяжелый литосферный материал через зоны субдукции. Рассматриваемая верхнемантийная конвекция является **нестационарной**, поскольку в континентальную область ячейки поступает все время новый материал, расширяя эту область за счет продвижения фронта ячейки вглубь материка. Горизонтальное расширение верхнемантийной ячейки происходит не только в направлении континента, но и в противоположном направлении, в сторону Тихого океана, приводя к широко развитому явлению отодвигания зон субдукции вместе с островными дугами от края материка и образованию в их тылу окраинных бассейнов. Важным элементом моде-

ли является то, что фронт продвигающейся под континент верхнемантийной ячейки отождествляется с восходящим возвратным мантийным потоком, содержащим гидратированное вещество, привнесенное из зоны субдукции, что создает благоприятные условия для проявления магматизма (рис. 4). Свидетельством этому является плюмовый магматизм [Шипилов, 2004; 2008; Шипилов, Верниковский, 2010; Шипилов, Карякин, 2010; 2011; Шипилов и др., 2009], который менялся на площади Арктического региона вне зависимости от зон субдукции (рис. 7, рис. 8). Этот вывод нашел подтверждение в данных сейсмической томографии [Яковлев и др., 2012].

ОБЩАЯ ХРОНОЛОГИЯ ДЕЙСТВИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА

Рассмотрим действие вышеизложенного механизма в хронологическом порядке, начиная с образования Канадской котловины. Как было отмечено в ряде работ по геологии Арктики, начиная с юры, область континента Арктида оказалась в

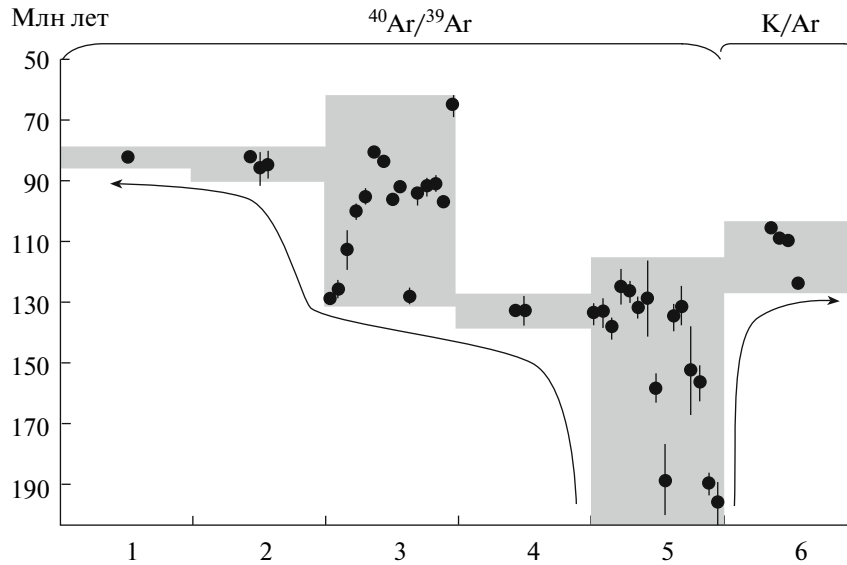


Рис. 8. 2D-модель развития плюма в Арктике по данным радиологического датирования базальтоидных образований (точки и точки с линиями) магматических областей и районов Арктики. Ось ординат – возраст (млн лет), ось абсцисс – области и районы проявления магматизма (см. рис. 7). Возрастные датировки ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и K/Ar) магматизма даны по столбцам: 1 – хребет Альфа, 2 – Северная Гренландия, 3 – Свердрупский бассейн (Канадский Арктический архипелаг), 4 – архипелаг Шпицберген, 5 – архипелаг Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), 6 – о-ва Де-Лонга, Новосибирский архипелаг. Стрелки – направления омоложения возраста магматизма относительно ЗФИ [Шипилов, Карякин, 2011].

окрестности функционирования примыкающей к ней с одной стороны сопряженной зоны субдукции литосферы Пацифики и Южно-Аньюского (Ангаючам) океана, а с противоположной – Арктического плюма (рис. 4). Исходя из нашей модели, с этого времени в данном регионе функционировала верхнемантийная конвективная ячейка, верхняя горизонтальная ветвь которой за счет сил вязкого сцепления тянула литосферу Арктиды к криволинейной зоне стока, что привело к отколу серии крупных блоков Арктиды (Чукотки и Аляски) от Северо-Американской окраины и раскрытию Канадской котловины (рис. 4). Судя по проявлениям магматизма, мезозойский Арктический плюм, возник в начале юры в районе Земли Франца-Иосифа и усилился с расширением в конце юры (160–150 млн лет), в том числе вблизи зоны сочленения Арктиды с Северо-Американской плитой [Шипилов, 2008; Шипилов, Карякин, 2010; 2011; Шипилов и др., 2009; и др.], что способствовало ослаблению и разрыву литосферы в этой зоне (рис. 4, 7, 8). Компонента горизонтального возвратного мантийного потока, направленная к Южно-Аньюской зоне субдукции, смещала блок Чукотки на юг в направлении Евразии вдоль крупного сдвига, обрамляющего с востока хребет Альфа-Менделеева. В то же время составляющая возвратного мантийного потока, направленная в сторону зоны субдукции северо-западной Пацифики, вызывала ротационное движение против часовой стрелки Аляскинского блока (рис. 4). Таким образом, эти два блока рас-

таскивались расходящимися мантийными потоками в разные стороны. За ними возникла обширная зона деформаций растяжения литосферы, которая позднее трансформировалась в диффузный спрединг, образовав Канадскую котловину, что подтверждается сейсмическими разрезами (рис. 3). При этом восточный фланг хребта Альфа-Менделеева мог начать формироваться именно в это время (киммеридж/титон) в условиях транстенсии (рис. 4).

Достаточно заметные события происходили в раннем мелу эпохи готерива (130 млн лет). В это время отмечается значительное повышение магматической активности Арктического плюма [Шипилов, Карякин, 2010; 2011; Шипилов и др., 2009; Karaykin et al., 2011; Shipilov, Karaykin, 2011], что в терминах модели означает усиление активности восходящего возвратного потока верхнемантийной ячейки. Отметим, что в это время резко увеличилась скорость движения плиты Изагаги (с 3 до 20 см/год), являющейся частью Тихоокеанской литосферы [Кононов, 1989], которая взаимодействовала с Евразийской плитой со стороны Пацифики (т.е. увеличилась скорость поступления субдукционного материала в верхнемантийную ячейку).

На эпоху апта (120 млн лет) пришлось фаза окончательного закрытия Южно-Аньюского океана, столкновения Чукотки с Евразией по Южно-Аньюскому шву. Это привело к прекращению рассеянного спрединга в Канадской котловине и резкому замедлению стока мантийного вещества в Южно-Аньюской зоне. При этом актив-

ной областью погружения мантийного вещества продолжала оставаться зона субдукции со стороны Пацифики, создавая субширотный тянущий эффект в литосфере Восточной и Центральной Арктики. В результате по крупным сдвигам в сторону Пацифики начали перемещаться блоки некогда единой Арктиды. Именно в это время произошла перестройка поля напряжений примерно на 90 градусов [Лобковский и др., 2010] и возникли условия растяжения и рифтогенеза в системе котловин и хребтов Макарова–Подводников–Альфа-Менделеева, составляющих центральный фрагмент континента Арктида (рис. 5).

К апту (119 млн лет) закончились коллизионные события в Южно-Аннуйской шовной зоне и главные складчатые деформации в Верхоянском складчатом поясе. В Арктике сохранялась геодинамическая ситуация активного субширотного растяжения и рифтогенеза в системе котловин и хребтов Макарова–Подводников–Альфа-Менделеева. Такая ситуация продолжалась вплоть до начала раскрытия Евразийского бассейна и откола от Баренцевоморско-Карско-Лаптевского шельфа хребта Ломоносова за счет продвижения фронта верхнемантийной ячейки на запад (рис. 5). В итоге центральный континентальный фрагмент Арктиды, состоящий из тектонических элементов хребтов Ломоносова и Альфа-Менделеева, а также котловин Макарова и Подводников, оказался окруженным с двух сторон бассейнами с океанической корой (рис. 5).

Магматические проявления Арктического плюма в альбе (110 млн лет), установленные в различных структурах обрамления Северного Ледовитого океана, вполне естественно распространить на центральную провинцию “бассейнов и хребтов Макарова–Подводников–Альфа-Менделеева”, поскольку фронт восходящего потока расширяющейся верхнемантийной ячейки находился в это время под этой центральной провинцией. В пользу предположения о внутриплитном магматизме, приуроченном к рифтогенной области утоненной континентальной литосферы центральной области бассейнов и хребтов (рис. 7), свидетельствует и характер аномального магнитного поля (рис. 2), типичный для трапповых излияний на континентах [Поселов и др., 2008; Bruvold et al., 2012; Funck et al., 2006; и др.] и радиологический возраст последних 75–89 млн лет [Bruvold et al., 2012].

ТЕКТОНО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЛИТОСФЕРЫ В КАЙНОЗОЕ

Главенствующим событием в кайнозойской эволюции океана в Арктике является становление Норвежско-Гренландского и Евразийского спрединговых бассейнов, раскрывавшихся отно-

сительно разделяющей их Шпицбергенско-Северогренландской трансформы. В этой связи, они представляли собой гигантскую взаимосвязанную геодинамическую систему: две раскрывающиеся впадины и связывающая их зона разломов с большой сдвиговой компонентой [Шипилов, 2008]. На этом же этапе отколовшийся от Баренцево-Карско-Лаптевской окраины линейный блок хребта Ломоносова в процессе спрединга мигрировал до нынешнего своего положения. В результате, по существующим представлениям, хребет Ломоносова является пограничной структурой, разделяющей два разновозрастных и различных по устройству бассейна – Евразийский и Амеразийский (рис. 9).

В начальную фазу формирования хребта Ломоносова рифтогенно-спрединговые процессы во впадинах Канадской и Макарова, входящих в Амеразийский бассейн, как было показано выше, уже были последовательно завершены [Вержбицкий и др. 2011; Лобковский и др., 2010; Шипилов, 2008]. А зарождающийся осевой спрединговый центр хребта Гаккеля, как и в целом, Евразийский бассейн, заняли, практически, ортогональную позицию по отношению к отмершему спрединговому центру Канадской впадины. Поэтому большинство исследователей считают, что никаких кардинально значимых тектоно-геодинамических событий в Амеразийском бассейне, в частности в Канадской впадине, на его кайнозойском послеспрединговом “пассивном” этапе эволюции не происходило, за исключением проявления, обычных в таких случаях процессов погружения и гравитационно-оползневой тектоники. Однако появляется все больше, главным образом, геофизических данных, интерпретация которых позволяет говорить об активизации в кайнозое тектоно-геодинамических преобразований литосферы Амеразийского бассейна, протекавших на фоне спрединга в Евразийском бассейне.

Прежде всего, следует заметить, что раскрытие и дальнейшее расширение Евразийского бассейна привело в действие механизм перемещения Центрально-Арктического геоблока хребтов и поднятий по двум протяженным и не параллельным зонам трансформных разломов – Шпицбергенско-Северогренландской и Хатангско-Ломоносовской [Шипилов, 2004]. Если по ним оценивать кинематику перемещения хребта Ломоносова, то можно видеть, что она была неодинакова. Опережающими темпами двигался фланг хребта, обращенный к Шпицбергенско-Северогренландской трансформе. Анализ палеотектонических реконструкций свидетельствует, что эта зона разломов была заложена как минимум в юрско-меловое время на этапе отрыва Новосибирско-Чукотско-Североаляскинского блока (микроплиты) от Североамериканской окраины. На этапе расхождения Гренландии и Баренцевоморского сегмента

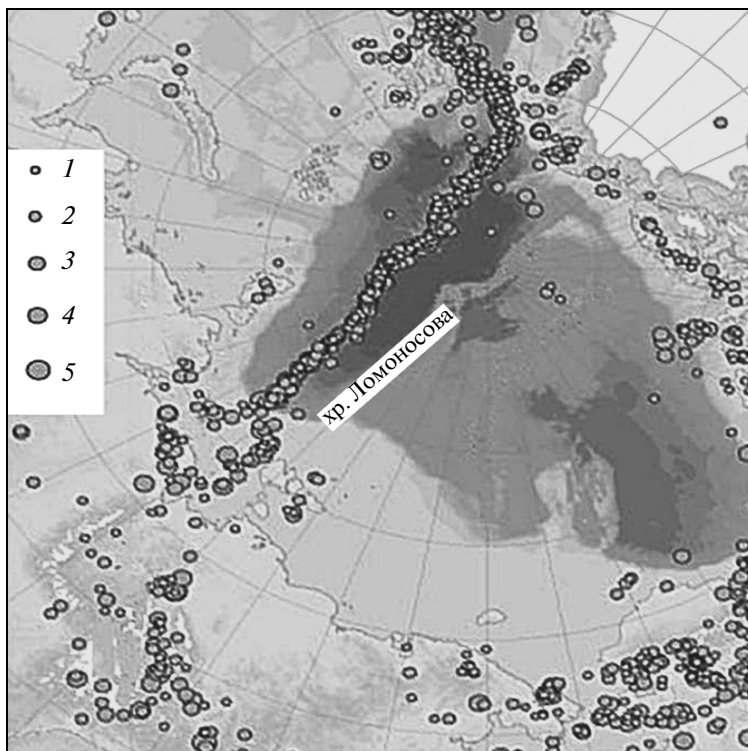
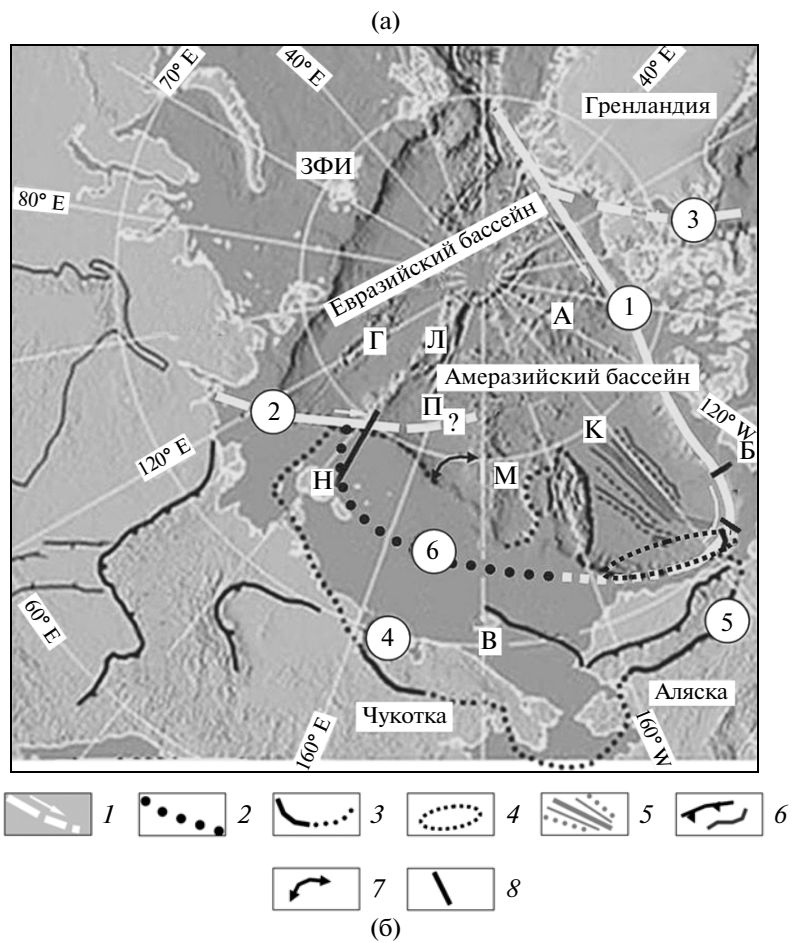


Рис. 9. Основные элементы строения (а) и эпицентры землетрясений (б) Арктического региона:

а) — 1 — зоны разломов и их предполагаемое продолжение, 2 — осевые зоны бассейнов, 3 — границы Новосибирско-Чукотско-Аляскинской плиты, 4 — пояс складчатых деформаций, 5 — меловой палеоспрединовый центр с сопровождающими линейными магнитными аномалиями, 6 — прочие тектонические элементы, 7 — угол раскрытия, 8 — положение сейсмических разрезов (см. также рис. 1).

Цифры в кружках: 1 — Северогренландско-Канадская (как оторванный отрезок Шпицбергенско-Северогренландской) и 2 — Хатангско-Ломоносовская окраинно-континентальные зоны трансформных разломов и их продолжения; 3 — линеамент Вегенера, 4 — Южно-Аньюйская сутура и ее продолжения как границы Новосибирско-Чукотско-Североаляскинской плиты, 5 — хребет Брукса, 6 — цепь депоцентов мел-кайнозойских рифтовых бассейнов (Анжуйского, Новосибирского, Восточно-Сибирского и Северо-Чукотского).

Буквенные обозначения: А — хр. Альфа, Б — о. Бэнкса, В — о. Врангеля, Г — спрединговый центр хр. Гаккеля, ЗФИ — архипелаг Земля Франца-Иосифа, К — Канадская котловина, Л — хр. Ломоносова, М — хр. Менделеева, Н — Новосибирский архипелаг, П — котловина Подводников;

б) — эпицентры землетрясений с магнитудами по [Аветисов, 2009]: 1 — 4.0–4.2; 2 — 4.2–4.6; 3 — 4.6–5.0; 4 — 5.0–5.5; 5 — 5.5–6.4.

Евразийской плиты (поздний олигоцен—миоцен) Шпицбергенско-Северогренландская трансформация была разорвана в связи с образованием рифта Моллой [Шипилов, 2008]. Ее продолжение далее в Северном Ледовитом океане — Северогренландско-Канадская окраинно-континентальная трансформация — некоторыми исследователями увязывается со сдвигом Калтаг, прослеживаемым с Аляски [McWhae, 1986]. Судя по гравиметрическим картам (рис. 2) [McAdoo et al., 2008], Северогренландско-Канадская трансформация также была фрагментирована на отрезки, маркирующие сдвиго-сбросовую границу между континентальной окраиной Северной Америки и структурами Американо-Северного бассейна. Сейсморазведкой установлено [Dinkelman et al., 2008; Helwig et al., 2010], что на одном участке этой границе присуще сбросообразование (рис. 10), на другом формирование присдвиговых бассейнов по типу pull-apart (рис. 11). При этом характерной особенностью является то, что все отмеченные дислокации затрагивают как континентальную, так и океаническую стороны трансформы и связаны с временным отрезком поздний олигоцен—миоцен. Судя по концентрации вблизи и вдоль этой зоны разломов эпицентров землетрясений (рис. 9) [Аветисов, 2009] она активна и по сей день и по существу определяет новейшую блоковую делимость литосферы в регионе. Анализ истории развития региона и роли этой зоны разломов в формировании океанических и континентальных геоструктур позволяет отнести ее к одной из фундаментальных тектонических границ в Арктике трансформного типа, заложенной по простиранию ветви каледонид-эльмирид. Как показывают результаты последних сейсмических работ на юге Канадской котловины в районе дельты Макензи [Dinkelman et al., 2008; Helwig et al., 2010], эта зона разломов пересекает самый южный фланг (продолжение зоны растяжения) осевого палеоспрединового центра этой впадины (рис. 3а).

Другая, Хатангско-Ломоносовская, окраинно-континентальная трансформация довольно отчетливо отражается, как наиболее заметный линеа-

мент, в рельефе дна Лаптевоморской континентальной окраины [Головачев, Шипилов, 1986] и в структуре геофизических полей (рис. 2). Доводы в пользу ее существования, тектоническая позиция и взаимоотношения со структурами континентального и океанического обрамления изложены нами в ряде публикаций (Богданов и др., 1995; Шипилов, 2002; 2004). Эта трансформная зона получила отображение на изданной “Тектонической карте морей Карского и Лаптевых и севера Сибири” М 1 : 2 500 000 (Объяснительная..., 1998; Тектоническая..., 1998). К ней приурочены эпицентры некоторых землетрясений (рис. 9). Следует подчеркнуть, что большинство структурно-тектонических элементов, как со стороны Лаптевоморской континентальной окраины (ее рифты), так и со стороны Евразийского океанического бассейна (включая спрединговый хребет Гаккеля) и поднятия Ломоносова завязаны на Хатангско-Ломоносовскую трансформную зону разломов. В совокупности этот тектонический узел представляет собой уникального типа геодинамическую систему отражающую характер непосредственного торцового сочленения и взаимодействия в кайнозойское развивающегося океанического спредингового бассейна с континентальным окружением. Следует заметить, что именно к этой зоне разломов приурочены мощные и множественные прорывы метана в виде т.н. области фонтанов, установленные в ходе работ 2011 г. [Сергиенко и др., 2012].

Отрезок Хатангско-Ломоносовской трансформы лежащий к западу от района ее сочленения с хребтом Гаккеля на этапе раскрытия Евразийского бассейна был малоактивен и по нему происходили разнонаправленные низкоамплитудные движения. В то же время восточная часть трансформы играла активную роль в кайнозойской геодинамике. По ней происходило правостороннее перемещение отколовшегося сублинейного блока хребта Ломоносова в процессе открытия Евразийского бассейна. В результате эта трансформная зона определила прямолинейный характер границы северо-восточной части Лапте-

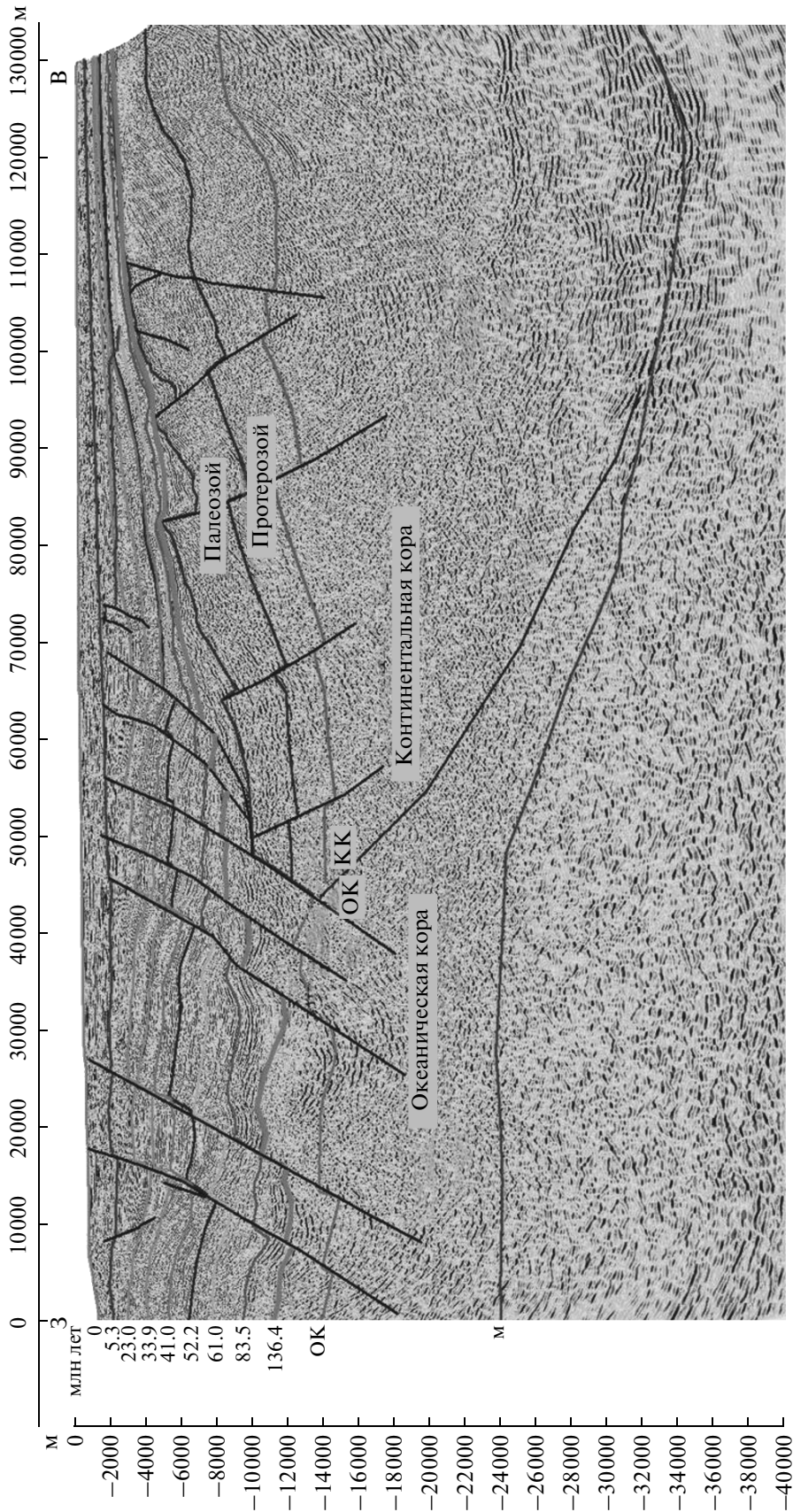


Рис. 10. Глубинный сейсмический разрез [Dinkelmann et al., 2008; Helwig et al., 2009] в районе о. Банкс (с изменениями, положение рис. 1), иллюстрирующий строение зоны перехода континентальной окраины Канадского Арктического архипелага – Канадская океаническая впадина. Граница континентальной и океанической коры маркируется зоной сбросов, заложенных около 136 млн лет и активизированных в позднем олигоцене – миоцене. Длина профиля 132 км, глубина записи 40 км. Слева – возраст млн лет основных отражающих границ. ОК – океаническая кора, М – граница Мохоровичича, ОК/КК – граница океанической и континентальной коры.

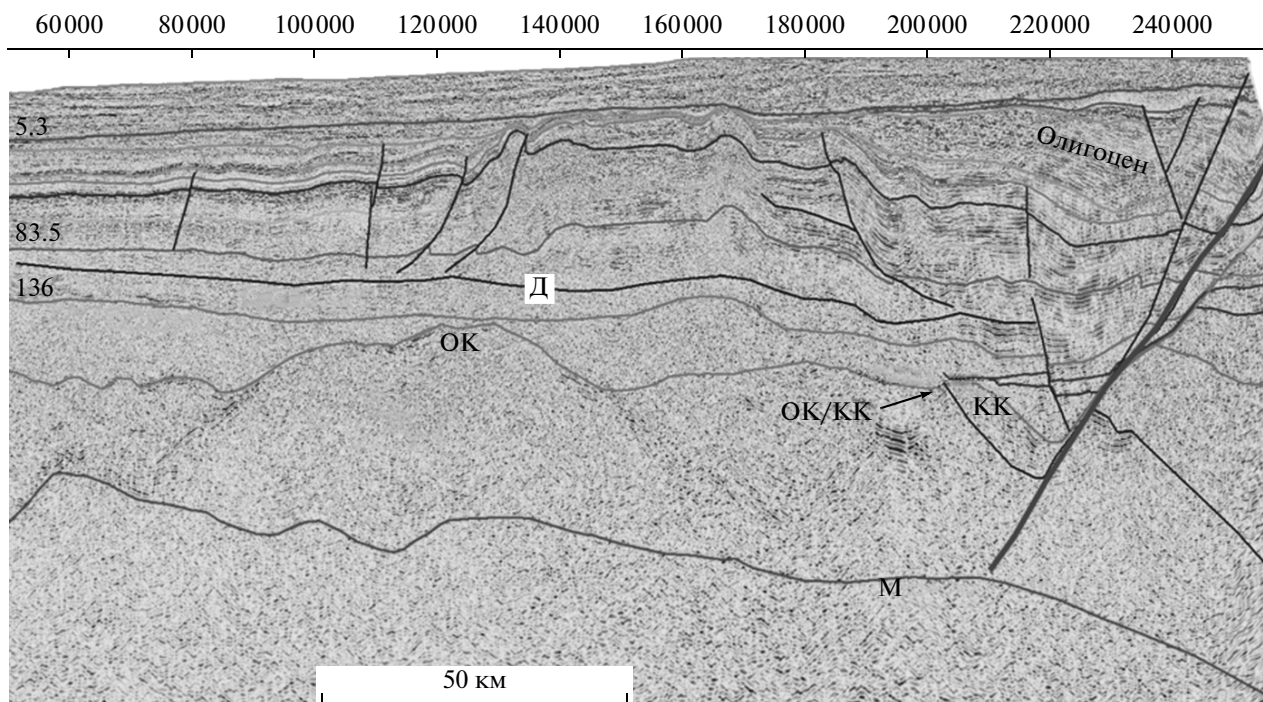


Рис. 11. Глубинный сейсмический разрез [Dinkelman et al., 2008; Helwig et al., 2009] в южной части Канадского бассейна (с изменениями, положение рис. 1), иллюстрирующий проявление сдвиговых деформаций на границе континентальной и океанической коры в виде полуграбена, образованного по типу pull-apart и заполненного олигоценовыми отложениями; 5.3, 83.5 и 136 – возраст несогласий в млн лет. Отчетливо видны не только складчатые деформации в осадочном чехле, но и сложная конфигурация границ, связанных с кровлей и подошвой консолидированной коры. Границы: Д – детачмент, М – Мохо, ОК – кровли океанической коры, КК – континентальной коры. Длина профиля 207 км, глубина записи 40 км.

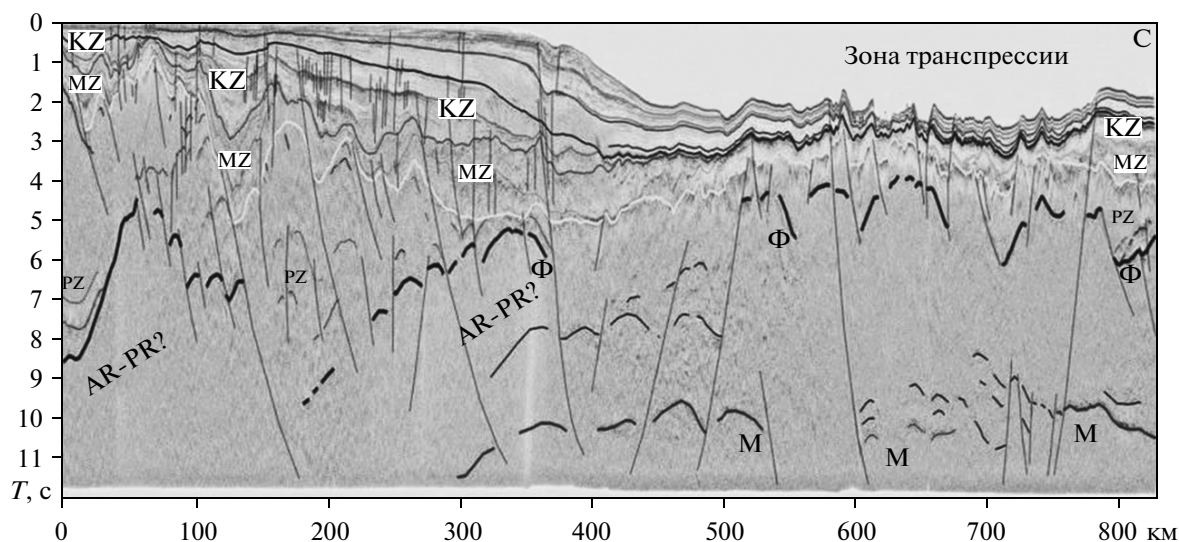


Рис. 12. Глубинный сейсмический разрез МОВ ОГТ по меридиональному профилю А7 по [Казанин и др., 2010] (с изменениями, положение рис. 1), иллюстрирующий характер транспрессивных взаимоотношений континентальной окраины и хр. Ломоносова. Отражающие горизонты: Ф – фундамент, М – Мохо.

воморской окраины с впадиной Амундсена. Некоторые представления о кинематике этого процесса изложены в работе [Шипилов, 2004].

Следует заметить, что Хатангско-Ломоносовская трансформная зона весьма слабо изучена в активной своей части, где проявилась, по нашим

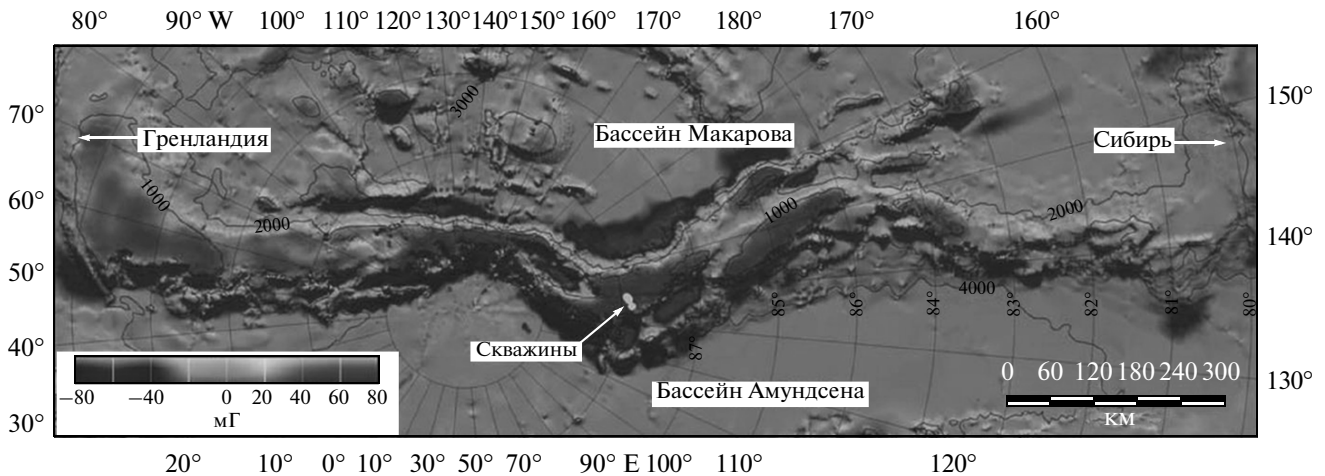


Рис. 13. Современная конфигурация хребта Ломоносова, отраженная в рельефе дна и аномалиях гравитационного поля в свободном воздухе (мГл). Изобаты обозначены – 1000, 2000, 3000 и 4000 метров.

представлениям, правосторонняя кинематика движений. Полученные в последнее время геофизические материалы по профилю МОВ ОГТ А7 [Казанин и др., 2010] длиной 832 км, и проложенному от Новосибирского архипелага до хребта Ломоносова с пересечением его южного фланга по простиранию, дают основание для вывода о существовании такой зоны разломов. Ее трудно не заметить на глубинном геофизическом разрезе (рис. 12), т.к. она (в нашей интерпретации) довольно отчетливо выражена и в структуре волнового поля, и в графиках интенсивности геофизических полей, и контрастными формами рельефа дна. На подходах к этому интервалу сейсмической записи и в его пределах наблюдаются деформированность, утонение и пережимы мощностей не только комплексов кайнозоя, но даже и верхов мезозойских отложений при том, что здесь отмечается их разбитость значительным количеством нарушений со смещением. Кроме того, отражения связанные здесь с границами фундамента и Мохо прослеживаются фрагментарно и прерывисто, перескакивая с одного гипсометрического уровня на другой. Все это имеет место на фоне резкого подъема границы Мохо и соответствующего уменьшения мощности земной коры при переходе от континентальной окраины к хребту Ломоносова.

Приведенные характеристики дают основание для отнесения Хатангско-Ломоносовской трансформы к зонам разломов литосферного типа. А учитывая косое положение трансформы по отношению к хребту Ломоносова, представляется, что описанные выше деформации земной коры возникли в ходе транспрессии при правостороннем перемещении хребта в условиях возрастающего сжатия вдоль его длинной оси как со стороны Североамериканской, так и Евразийской континен-

тальных окраин. Это привело к дислокациям коробления, изгибам и изломам хребта (рис. 13) [Шипилов, 2004; O'Regan et al., 2008]. Наши доводы получили подтверждение в результатах бурения здесь скважины, которая обнаружила значительный стратиграфический перерыв в разрезе отложений в диапазоне 44–18 млн лет [Baskman et al., 2008; O'Regan et al., 2008], что обусловлено подъемом и выводом хребта на уровень моря или выше и его эрозией. Затем хребет стал относительно стабильно (с небольшим перерывом) погружаться до современных отметок глубин, что отражает смену режима сжатия позднеолигоцен-миоценовой релаксацией характерной в целом для рассматриваемого региона.

Северо-восточное продолжение Хатангско-Ломоносовской трансформы, судя по батиметрии и структуре аномального гравитационного поля, теряется в котловине Подводников на подходе к поднятию Менделеева, возможно, затрагивая и его, что не исключает участия трансформы в развитии бассейна Подводников на кайнозойском этапе. С режимом растяжения в этом бассейне вероятно можно соотнести проявления позднеэоценового платобазальтового вулканизма на арх. Де Лонга.

Представляется, что обособление и перемещение Американо-Евразийского геоблока по описанным выше трансформам с вектором направленным на юг в сторону Тихоокеанской зоны субдукции и орклинального изгиба складчатых поясов Аляски должно сопровождаться развитием деформаций сжатия в его краевом сегменте. В этой связи представляет интерес закартированный сейсмическими работами [Dinkelman et al., 2008; Helwig et al., 2010] пояс деформаций осадочного чехла развитый над плоскостью детачмента, расположенный над границей континентальной и океанической коры на южной периферии Канадского бассейна

(рис. 3б). В складки, практически пликативного типа, собраны верхнемеловые-олигоценые отложения. Ареал развития этих деформаций довольно отчетливо обозначен отрицательной гравитационной аномалией субширотного простирания. Заметим также, что к этому району подходит полоса эпицентров землетрясений Аляски связанная с простирающимся сюда следом Алеутской зоны Беньофа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная геодинамическая модель верхне-мантийной конвекции, связанной с глобальным Тихоокеанским субдукционным конвейером, представляет единый физический механизм для объяснения основных закономерностей геологической структуры и тектонической эволюции Арктики в мезозое и кайнозое. Развиваемый авторами подход к анализу тектонических и геодинамических процессов базируется на платформе объединяющей рассмотрение глубинных (мантийных) и поверхностных (литосферно-коровых) процессов. Наиважнейшим элементом такого моделирования являются данные сейсмомографии, которые позволяют расшифровать структуру мантийной конвекции. Из полученных разрезов мантии видно, как погружающееся в зонах субдукции холодное вещество, достигая переходной зоны между верхней и нижней мантией, распространяется в виде протяженного горизонтального слоя далеко (тысячи км.) под Евразийский континент. Такая картина ясно показывает развитие ячейки верхнемантийной конвекции, нижняя горизонтальная ветвь которой течет под континент вдоль переходной зоны между верхней и нижней мантией, а верхняя формирует обратный поток вещества в сторону Тихоокеанской зоны субдукции, приводя к растяжению континентальной литосферы и плюмовому магматизму. Радиологические датировки возраста базальтоидов полученные авторами в последние годы вполне определенно укладываются в описываемую картину геодинамической эволюции.

С позиций развиваемой модели эволюции Арктического региона, полученные сейсмические изображения мантии и приведенные сейсмические разрезы земной коры подкрепляют исходное положение модели о движущей силе литосферных деформаций в Арктике, связанной с возвратным подлитосферным течением мантийного вещества к зонам субдукции в мезозое (палео-Пацифики и Южно-Аньюйского палеоокеана) и кайнозое (Тихого океана).

Вместе с тем предлагаемая модель значительно расширяет возможности интерпретационного анализа геолого-геофизических данных, что проиллюстрировано нами для кайнозойского этапа развития Арктического региона, когда первоначальная структура литосферы Канадского бассейна и его окружения была значительно трансформирована под влиянием изменения вектора перемещения подлитосферных мантийных масс.

Кроме того, описанная модель позволяет устранить ряд проблем при палеотектонических реконструкциях, указанных в начале статьи.

Представленные материалы и их интерпретация дают основание говорить, что на кайнозойском этапе определилась новая блоковая делимость литосферы океана в Арктическом регионе.

Основополагающую роль в этом играли Шпицбергенско-Северогренландская (и ее Северогренландско-Канадский отрезок) и Хатангско-Ломоносовская зоны трансформных разломов. Перемещение по ним литосферного блока Американо-Северогренландского бассейна привело к формированию пояса складчатых деформаций на границе континентальной и океанической коры в южной части Канадской котловины на рубеже олигоцена/миоцена. Причина рассмотренных трансформаций, как было показано выше, лежит в глубинной геодинамике, обусловленной процессами перемещения подлитосферных мантийных масс конвективной ячейкой в сторону Алеутской зоны субдукции. Это вызывает соответствующий тянущий момент и ползучесть самой литосферы с сопровождающими ее эффектами растяжения в одних местах и сжатия в других в пределах одной и той же плиты.

В результате рассмотренных тектоно-геодинамических преобразований литосферы в мезозое и кайнозое был создан своеобразный тектонический “мост” соединяющий Северо-Американский и Евразийский континенты, представленный структурами Центральной Арктики – поднятиями Ломоносова, Альфа-Менделеева и разделяющих их котловинами Макарова и Подводников. В геосторическом плане эта композиция блоков и микроплит соотносится с останцами деструктурированной литосферы палеоконтинента Арктида.

Работа подготовлена в рамках выполнения проекта по Государственному контракту Роснедра – РАН “Построение плитотектонических реконструкций и модели напряженного состояния литосферы Арктического региона в связи с проблемой расширения внешней границы континентального шельфа РФ” (научный руководитель академик Н.П. Лаверов) и при поддержке Программы Президиума РАН № 23 “Мировой океан”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аветисов А.П. Сейсмологические исследования НИИГА-ВНИИОкеангеология в Арктике (история, достижения, перспективы) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2. С. 27–41.

- Богданов Н.А., Хаин В.Е., Шипилов Э.В. Система кайнозойских рифтов Восточной Арктики и ее возможное значение // Докл. РАН. 1995. Т. 345. № 1. С. 84–86.
- Вержебицкий Е.В., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Бяков А.Ф. Возраст хребтов Альфа-Менделеев и Ломоносова (Амеразийский бассейн) // Докл. РАН. 2011. Т. 441. № 3. С. 380–383.
- Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Каминский В.Д., Лобковский Л.И., Шипилов Э.В. Геодинамика Центральной и Восточной Арктики. Материалы совместного заседания Совета РАН по координации деятельности региональных отделений и региональных научных центров РАН и Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики. Екатеринбург: изд-во УрО РАН. 2010. С. 41–58.
- Головачев Э.М., Шипилов Э.В. Линеаментные зоны моря Лаптевых // Изв. высших уч. заведений. Геология и разведка. 1986. № 8. С. 106–108.
- 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.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР: (В 2 кн). М.: Недра. 1990. Кн. 1. 328 с.
- Казанин Г.С., Шкарубо С.И., Павлов С.П. Новые результаты обработки материалов сейсмических исследований на хребте Ломоносова и в зоне сочленения с Новосибирским архипелагом. Материалы IV международной рабочей встречи по делимитации шельфа в Арктике. СПб.: ВСЕГЕИ. 2010. CDR-ресурс.
- Кононов М.В. Тектоника плит северо-запада Тихого океана. М.: Наука. 1989. 167 с.
- 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.
- Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.А., Шипилов Э.В. Базовая модель тектонического развития Арктики как основа для подготовки обновленной заявки России в Комиссию ООН на установление внешней границы континентального шельфа // Арктика. Экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 4–19.
- Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Кононов М.В., Вержебицкий 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.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир. 2004. 610 с.
- Объяснительная записка к Тектонической карте морей Карского и Лаптевых и севера Сибири м-ба 1 : 2500000 / Под ред. Богданова Н.А., Хаина В.Е., Розена О.М., Шипилова Э.В., Верниковского В.А., Драчева С.С., Костюченко С.Л., Кузьмичева А.Б., Секретова С.Б. М.: Институт литосферы РАН. 1998. 127 с.
- Поселов В.А., Буценко В.В., Верба В.В. Поднятия Амеразийского суббассейна в Северном Ледовитом океане и их возможные аналоги в Атлантическом океане. 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. С-Пб.: ВНИИОкеангеология. 2008. С. 275–304.
- Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Романовский Н.Н., Космач Д.А., Никольский Д.Н., Никифоров С.Л., Саломатин А.С., Ананьев Р.А., Росляков А.Г., Салюк А.Н., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Юсупов В.И., Куриленко А.В., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. РАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
- Свистунов Ю.И., Шипилов Э.В., Юнов А.Ю. Роль асейсмичных хребтов в структуре океанического дна // Изв. высших уч. заведений. Геология и разведка. 1989. № 4. С. 3–8.
- Тектоническая карта морей Карского и Лаптевых и севера Сибири м-ба 1 : 2500000 / Под ред. Богданова Н.А., Хаина В.Е. М.: Федеральная служба геодезии и картографии РФ. 1998.
- Трубицын В.П. Геодинамическая модель эволюции Тихого океана // Физика Земли. 2006. № 2. С. 3–25.
- Трубицын В.П. Численный эксперимент, воспроизводящий конвекцию в мантии с рождением и эволюцией литосферных плит, плюмов и суперплюмов // Докл. РАН. 2010. Т. 434. № 5. С. 681–683.
- Трубицын В.П. Реология мантии и тектоника океанических литосферных плит // Физика Земли. 2012. № 6. С. 3–22.
- Хаин В.Е., Филатова Н.И., Полякова И.Д. Тектоника, геодинамика и перспективы нефтегазоносности Восточно-Арктических морей и их континентального обрамления. Труды ГИН РАН. Вып. 601. М.: Наука. 2009. 227 с.
- Шипилов Э.В. Геодинамика генераций позднемезозойско-кайнозойского океанообразования Арктики в свете геолого-геофизических данных о строении ее континентальных окраин: новые идеи. Тектоника и геофизика литосферы. Т. II. М.: ГЕОС. 2002. С. 327–332.
- Шипилов Э.В. К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин Арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника. 2004. № 5. С. 26–52.
- Шипилов Э.В. Генерации спрединговых впадин и стадии распада вегенеровской Пангеи в геодинамической эволюции Арктического океана // Геотектоника. 2008. № 2. С. 32–54.
- 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.
- Шипилов Э.В., Карякин Ю.В. Баренцевоморская магматическая провинция: геолого-геофизические свидетельства и новые результаты определения $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста // Докл. РАН. 2011. Т. 439. № 3. С. 376–382.
- Шипилов Э.В., Карякин Ю.В. Мезозойский базальтоидный магматизм Баренцевоморской континентальной окраины: геодинамические обстановки раннего этапа раскрытия Арктического океана (по результатам исследований на архипелагах Земля Франца-Иосифа и

- Шпицберген). Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen. 2010. С. 312–330.
- Шипилов Э.В., Карякин Ю.В., Матишов Г.Г.* Баренцевско-Амеразийский суперплюм и инициальный этап геодинамической эволюции Арктического океана // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 3. С. 369–372.
- 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. 1261–1262.
- Backman J., Jakobsson M., Frank M., Sangiorgi F.* Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic coring expedition sediments from the Lomonosov ridge // *Paleoceanography*. 2008. V. 23. P. 3–18.
- Bruvoll V., Kristoffersen Y., Coakley B.J., R. Hopper J.R., Planke S., Kandilarov A.* The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean // *Tectonophysics*. 2012. V. 514–517. P. 123–145.
- 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.
- Forsberg R., Kenyon S.* Gravity and geoid in the Arctic Region – the Northern Polar Gap now filled. Proceeding of the GOCE Workshop. ESA-ESRIN. 2004. P. 6.
- Funck T., Jackson H.R., Shimeld J.* The crustal structure of the Alpha Ridge at the transition to the Canadian Polar Margin: Results from a seismic refraction experiment // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. B12101. doi:10.1029/2011JB008411.
- Grantz A., Hart P.* Petroleum prospectivity of the Canada Basin, Arctic Ocean // *Marine and Petroleum Geology*. 2012. V. 30. P. 126–143.
- 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 presented at GeoCanada 2010, May 10–14. Calgary, Canada, 4 p.
- Hutchinson D.R., Jackson H.R., Shimeld J.W., Chapman C.B., Childs J.R., Funck T., Rowland R.W.* Acquiring Marine Data in the Canada Basin, Arctic Ocean // *Eos*. 2009. V. 90. № 23. P. 197–204.
- Karyakin Yu.V., Shipilov E.V., Simonov V.A., Sklyarov E.V., Travin A.V.* Phases and stages of the plume magmatism in the Franz-Josef Land Archipelago. Large Igneous Provinces of Asia. Abstracts Intern. Symp. Irkutsk: Institute Earth Crust SB RAS. 2011. P. 96–98.
- Kovacs L.C., Glebovsky V.Y., Mashenkov S.P., Brozena J.M.* New map and grid of compiled magnetic anomalies from the Arctic Ocean // *Eos. Transactions. American Geophysical Union*. 2002. V. 83 (47). P. 2–4.
- McAdoo D.C., Farrell S.L., Laxon S.W., Zwally H.J., Yi D., Ridout A.L.* Arctic Ocean gravity derived from ICESat altimetry: Tectonic implications // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B05408, doi: 10.1029/2007JB005217.
- McWhae J.R.* Tectonic history of Northern Alaska, Canadian Arctic, and Spitsbergen regions since Early Cretaceous // *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*. 1986. V. 70. № 4. P. 430–450.
- Miller E.L., Toro J., Gehrels G., Amato J.M., Prokopyev 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. TC3013, doi:10.1029/2005TC001830.
- Moore T.E., Wallace W.K., Bird K.J., Karl S.M., Mull C.G., Dillon J.T.* Geology of northern Alaska. The Geology of Alaska. The Geology of North America / Plafker G. and Berg H.C. (eds). Geological Society of America. 1994. V. G-1. P. 49–140.
- O'Regan M., Moran K., Backman J., Jakobsson M., Sangiorgi F., Brinkhuis H., Pockalny R., Skelton A., Stickley C., Koc N., Brumsack H.-J., Willard D.* Mid-Cenozoic tectonic and paleoenvironmental setting of the central Arctic Ocean // *Paleoceanography*. 2008. V. 23. PA1S20. Doi: 10.1029/2007PA001559.
- Shipilov E.V., Karyakin Yu.V.* Geodynamics of the Jurassic-Cretaceous basaltoid magmatism of the Arctic region and the origin of the Canadian oceanic basin. International Conference on Arctic Margins (ICAM-VI). University of Alaska Fairbanks, USA. 2011. P. 185–186.
- Zhao D., Tian Y., Lei J., Liu L., Zheng S.* Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: Role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2009. V. 173. P. 197–206.