

УДК 551.242.11/31

# Базовая модель тектонического развития Арктики как основа для подготовки обновленной заявки России в Комиссию ООН на установление внешней границы континентального шельфа

*Н.П. Лаверов*, академик,  
Российская академия наук,

*Л.И. Лобковский*, член-корреспондент РАН,  
*М.В. Кононов*, кандидат геолого-минералогических наук,  
Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН,

*Н.Л. Добрецов*, академик,  
*В.А. Верниковский*, член-корреспондент РАН,  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

*С.Д. Соколов*, доктор геолого-минералогических наук,  
Геологический институт РАН,

*Э.В. Шипилов*, доктор геолого-минералогических наук,  
Полярный геофизический институт КНЦ РАН

*Представлена новая модель геологической эволюции Арктики. Предложен геодинамический механизм образования Американо-Евразийского и Евразийского бассейнов. Модель рассматривается в качестве обоснования заявки России на установление ВГКШ в Комиссию ООН.*

## Введение

Приближается время подачи обновленной заявки России на установление внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) в Арктике в Комиссию ООН по границам континентального шельфа. По-видимому, это произойдет в 2014 году.

Напомним, что впервые заявка на установление внешней границы континентального шельфа была подана Российской Федерацией в Комиссию ООН по границам континентального шельфа 20 декабря 2001 года в полном соответствии с Конвенцией по морскому праву 1982 года. Заявленный район

расширенного континентального шельфа России в Арктике показан на *рис. 1*. Внешняя граница российского континентального шельфа за пределами 200-мильной экономической зоны установлена в заявке в соответствии со статьей 76 Конвенции 1982 года [Continental shelf limits, 2000].

Как видно из *рис. 1*, в российский континентальный шельф не включен хребет Гаккеля, являющийся типичным спрединговым океаническим хребтом, который по Конвенции 1982 года не может включаться в область юридического континенталь-

ного шельфа. Это, заметим, единственный участок морского дна, «вырезанный» из «российского полярного сектора», который был объявлен территорией СССР специальным постановлением Президиума ЦИК СССР от 15 апреля 1926 г. Следует подчеркнуть, что норма секторального разграничения морских пространств и дна в Арктике не нашла отражения в Конвенции ООН по морскому праву 1982 г., которая была ратифицирована Россией 26

Построение внешней границы юридического континентального шельфа представляет собой нетривиальную задачу, поскольку некоторые положения статьи 76 Конвенции 1982 года допускают противоречивое толкование [Continental shelf limits, 2000]. Так, например, в пункте 5 статьи 76 Конвенции 1982 года указаны два пространственных ограничения, которые следует применять при построении внешней границы континентального

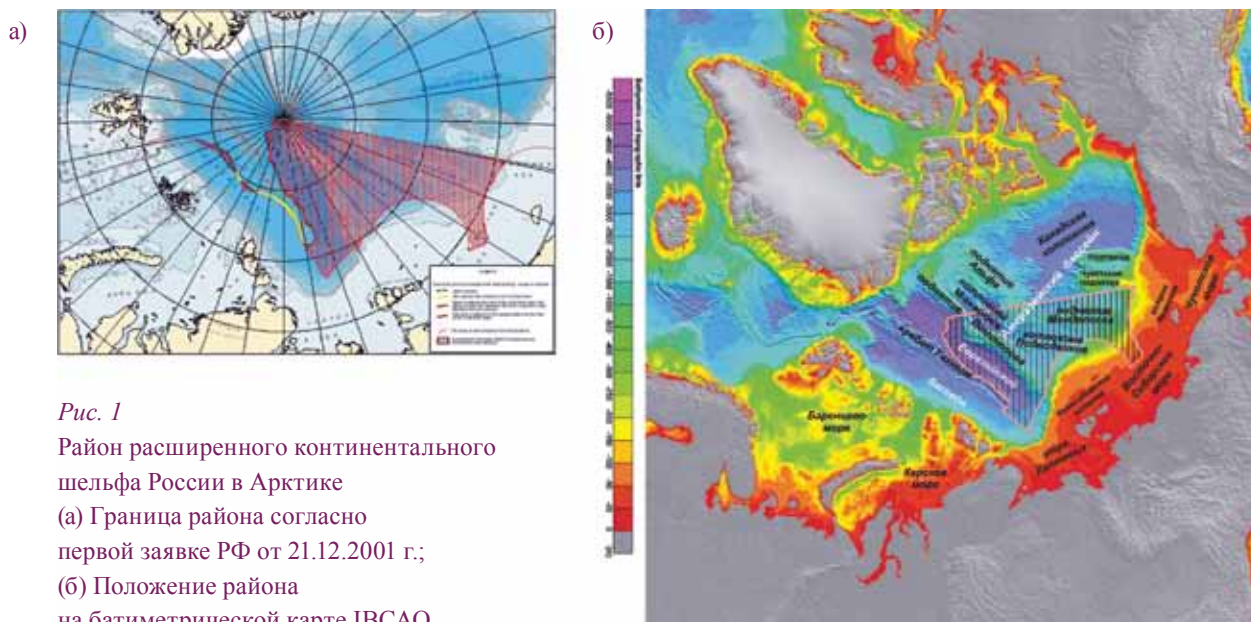


Рис. 1

Район расширенного континентального шельфа России в Арктике

(а) Граница района согласно первой заявке РФ от 21.12.2001 г.;

(б) Положение района на батиметрической карте ИВСаО (2001, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html>)

февраля 1997 г. Поэтому отнесение всего «полярного сектора» к российскому континентальному шельфу противоречило бы нормам международного права.

В центральной и восточной частях Арктики построение внешней границы континентального шельфа основано на представлении о континентальной природе хребтов Ломоносова и Менделеева и трактовке их подножий как подножия континентального склона, являющегося частью подводного продолжения Евразийской континентальной окраины вплоть до Северного полюса. В приполюсной части заявленной площади континентального шельфа внешняя граница должна разделять континентальный шельф России и континентальные шельфы Канады и Дании и будет определяться в ходе предстоящего переговорного процесса с этими странами. Восточная граница заявленного шельфа совпадает с линией, установленной в соответствии с Соглашением между СССР и США о линии разграничения морских пространств от 1 июня 1990 г.

шельфа: дистанционный лимит в 100 морских миль, отсчитываемый от 2500-метровой изобаты, и лимит в 350 морских миль, отсчитываемый от берега (точнее говоря, от так называемых исходных линий). С другой стороны, в пункте 6 статьи 76 Конвенции 1982 г. сказано, что в случае подводного хребта (имея в виду его континентальное происхождение) должен применяться только лимит в 350 морских миль от исходных линий. Легко убедиться, что в случае применения последнего правила к хребтам Ломоносова и Менделеева из российской заявки на юридический континентальный шельф выпадает большая часть глубоководного дна центральной части Северного Ледовитого океана. Однако в том же пункте 6 статьи 76 Конвенции 1982 года прописано, что правило дистанционного лимита в 350 морских миль не применяется в случае, когда мы имеем дело с подводными возвышенностями, являющимися естественными компонентами материковой окраины, такими как плато, поднятия, вздутия, банки и отроги [Continental shelf limits, 2000].

Очевидно, что с геологической точки зрения дистанционный лимит в 350 морских миль не применяется, когда в силу особенностей тектонического развития региона крупный массив подводной континентальной окраины оказывается выдвинутым далеко в глубоководную часть океана и структурно проявляется в виде системы различных геоморфологических образований: плато, поднятий, банок, отрогов и т.д. В настоящей статье показывается, что тектоническое развитие Арктического региона приводит именно к такой достаточно уникальной ситуации, когда поднятия Ломоносова и Менделеева, а также другие тектонические образования центральной части Северного Ледовитого океана являются естественными компонентами крупного континентального массива, являющегося продолжением Евразийской окраины в глубоководную часть океана.

Особую актуальность развиваемый ниже подход приобретает, если учесть ярко выраженный негативный характер тех рекомендаций, которые были высказаны Комиссией ООН по границам континентального шельфа при рассмотрении первой заявки России на установление ВГКШ от 20 декабря 2001 г. Заявка России не была одобрена. При этом рекомендации Комиссии, официально утвержденные 27 июня 2002 г., содержали весьма тенденциозные заключения о природе поднятий Ломоносова и Менделеева. В частности, в полном согласии с нотой США в Комиссию ООН, последняя заключила, что поднятие Менделеева имеет вулканическое происхождение и относится к океаническому хребту по Конвенции 1982 г., а это не позволяет относить его к российскому континентальному шельфу. Что касается хребта Ломоносова, то Комиссия, признавая его континентальное происхождение, определила эту структуру как отдельный самостоятельный хребет. В этом случае, как указывалось выше, в соответствии с пунктом 6 статьи 76 Конвенции 1982 г. к хребту Ломоносова должен быть применен дистанционный лимит в 350 морских миль от исходных линий.

Таким образом, Комиссия ООН в своих рекомендациях продемонстрировала весьма жесткую позицию относительно российской заявки 2001 г., стараясь максимально сузить потенциальную площадь юридического континентального шельфа России в Арктике. Настоящая работа нацелена на преодоление сложившейся негативной тенденции путем научного доказательства принадлежности тектонических структур центральной Арктики к продолжению Евразийской и Северо-

Американской континентальных окраин в глубоководную часть Северного Ледовитого океана на основе разработанной российскими учеными модели тектонической эволюции Арктического региона.

### Концепция древнего континента Арктида

При анализе строения и тектонической эволюции Арктического региона важное значение имеют данные о существовании в его пределах древних докембрийских блоков континентальной коры, которые еще в ранней работе Н.С. Шатского (1935) были интерпретированы как фрагменты древней Гиперборейской платформы, расположенной в приполярной области Земли и разрушенной последующими тектоно-магматическими процессами. Позднее в работах [Зоненшайн, Натапов, 1978; Зоненшайн и др., 1990; Верниковский, 1996; Кузнецов, 2006; Хаин и др., 2009] были развиты представления о палеозойской эволюции древнего Арктического континента, получившего название Арктида, фрагменты которого сегодня разбросаны по всему континентальному обрамлению арктических бассейнов, вскрываясь в обнажениях на архипелаге Новая Земля, полуострове Таймыр, архипелаге Северная Земля, Новосибирских островах, архипелаге де-Лонга, острове Врангеля, Чукотке, полуострове Сьюард, хребте Брукса, Земле Пири, Канадском арктическом архипелаге и в других местах.

В работах Л.И. Лобковского и др. (2010, 2011) делается следующий важный шаг в развитии концепции древнего континента Арктида применительно к проблеме внешней границы континентального шельфа, а именно: предполагается, что основные структуры дна центральной части Северного Ледовитого океана (СЛО), в частности, хребет Ломоносова, поднятия Менделеева и Альфа, котловины Макарова и Подводников, поднятие Нортвинд также представляют собой сохранившиеся в ходе геологической эволюции фрагменты древнего континента Арктида. Как будет показано ниже, из данной концепции следует, что хребет Ломоносова, поднятия Альфа и Менделеева вместе с расположенными между ними котловинами Макарова и Подводников являются естественными компонентами подводных продолжений материковых окраин Евразии и Северной Америки в глубоководную часть СЛО, представляющих собой своеобразный тектонический мост, оставшийся после разрушения древнего континента Арктида и соединяющий две эти окраины. Распад Арктиды

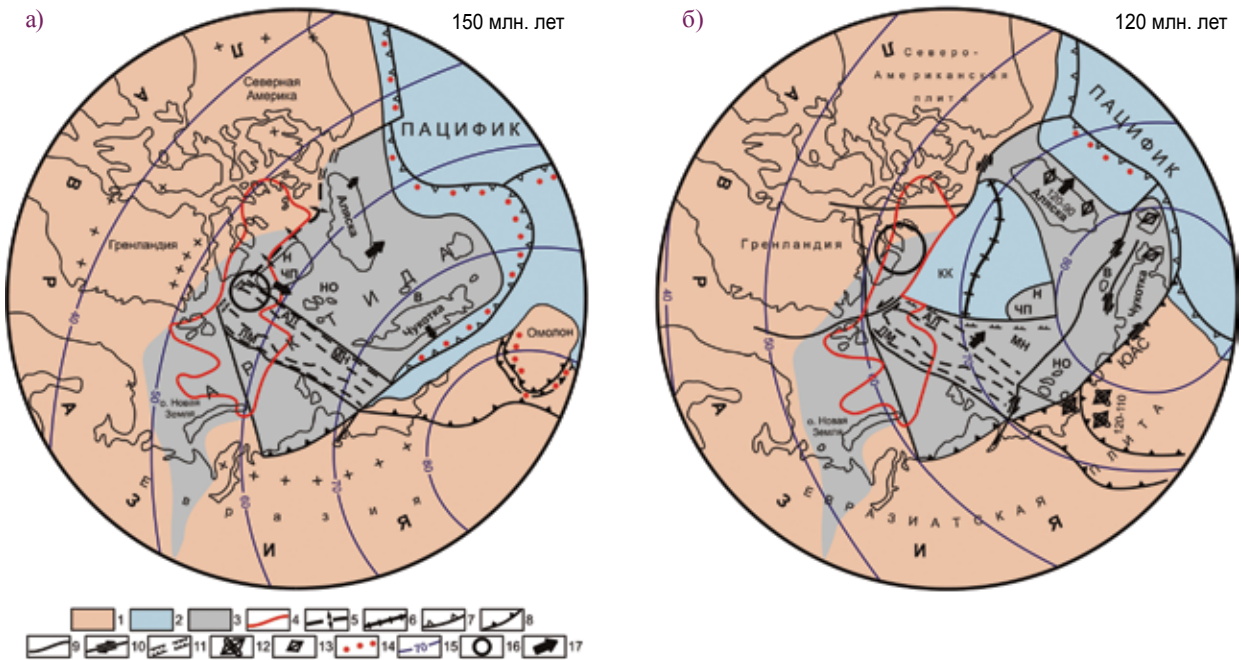


Рис. 2

Палеогеодинамические реконструкции Арктики на (а) 150 млн лет (поздняя юра, киммеридж/титон) и (б) 120 млн лет (ранний мел, апт)

Условные обозначения:

1. Области с континентальной корой;
2. Области с океанической корой;
3. Территория распавшегося палеоконтинента Арктида;
4. Область магматических проявлений Арктического мантийного плюма на континентальной коре по геологическим [Шпилов, Верниковский, 2010] и магнитным [Gaina et al., 2010] 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 по [Lawver et al., 2002];
17. Направление движения блоков Арктиды относительно Лавразии

Буквенные обозначения:

- АМП – поднятие Альфа-Менделеева,  
 АЛ – хребет Альфа,  
 ГХ – хребет Гаккеля,  
 КК – Канадская котловина,  
 ЛМ – хребет Ломоносова,  
 ЛП – поднятие Ломоносова,  
 МК – котловина Макарова,  
 МН – хребет Менделеева,  
 Н – хребет Нортвинд,  
 НО – Новосибирские о-ва,  
 ЧП – Чукотское поднятие,  
 ЮА – Южно-Аньюйский океан,  
 ЮАС – Южно-Аньюйская сутура

произошел в мезокайнозойе в результате последовательного раскрытия Канадского и Амеразийского бассейнов.

Важно отметить, что, исходя из совокупности имеющихся геолого-геофизических материалов, особенно палеомагнитных данных, удается представить достаточно обоснованную картину палеозойской эволюции континента Арктида и составляющих его частей [Верниковский и др., 2010; Метелкин и др., 2012; Metelkin et al., 2011], отталкиваясь от которой можно приступить к анализу дальнейшей мезозойско-кайнозойской истории развития этого ключевого для понимания арктической геологии континента.

#### Геодинамическая модель мезозойско-кайнозойской эволюции Арктического региона

**В** геологической истории развития Арктики наиболее детально изученным этапом является кайнозойский спрединг в хребте Гаккеля, возникший в результате проникновения в Арктику Срединно-Атлантического хребта, что привело к образованию глубоководного Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана (см. рис. 1б). В процессе рифтогенеза и последующего спрединга от Баренцево-Карской континентальной окраины был отколот и затем отодвинут линейно вытянутый блок хребта Ломоносова, который в результате занял свое нынешнее пограничное положение, разделяющее два разновозрастных и различных по тектоническому генезису бассейна – Евразийский и Амеразийский. Если спрединговая природа Евразийского бассейна сегодня не вызывает сомнения у специалистов, то происхождение структур Амеразийского бассейна, включающего Канадскую котловину, поднятия Менделеева и Альфа, котловины Макарова и Подводников до сих пор является предметом научных дискуссий и споров (см. рис. 1б).

Что касается происхождения Канадской котловины, то наиболее широкое распространение получила так называемая «ротационная» модель Грантца [Grantz, May, 1984; Grantz et al., 1998; Embry, Dixon, 1994; Соколов и др., 2010; Sokolov et al., 2002; 2009; 2012; Lawer et al., 2002, 2011], согласно которой в юрско-меловое время ключевую роль в геодинамическом развитии Арктики играла микроплита «Чукотка-Арктическая Аляска», отрыв которой от Канадского Арктического архипелага и последующее столкновение с Евразией привели к формированию Канадской котловины Северного Ледовитого океана, закрытию Южно-Аньюйского палеоокеана

и формированию складчато-надвиговых поясов, протянувшихся от Новосибирских островов через Чукотку к хребту Брукса Аляски. Сразу же после завершения коллизионных процессов в конце неокома, в апт-альбское время (120–108 млн лет назад) территория Центральной Чукотки подверглась интенсивному близширотному растяжению – примерно вкrest простирания расположенного севернее бассейна Макарова [Miller, Verzhbitsky, 2009]. На Аляске аналогичные события датируются 120–90 млн лет [Miller, Hudson, 1991].

Исходя из совокупности имеющихся геолого-геофизических данных, можно представить, что позднемезозойско-кайнозойская эволюция литосферы центральной части Арктического региона (в частности, эволюция древнего континента Арктида) последовательно прошла через две основные геодинамические фазы развития, характеризующиеся принципиально различными полями напряжений в литосфере [Лобковский и др., 2010; 2011]. Первая фаза, продолжавшаяся с поздней юры до апта, характеризовалась полем напряжений с существенной компонентой растяжения в направлении от северо-запада к юго-востоку, что привело к отрыву Чукотско-Аляскинской системы блоков Арктиды от Северо-Американского континента, движению Чукотки на юг, ее коллизии с Евразийской окраиной в результате закрытия Южно-Аньюйского палеоокеана и образованию Канадского океанического бассейна (рис. 2а, б).

Вторая фаза эволюции началась с возникновения в апте (~120 млн лет) постколлизионного субширотного поля растягивающих напряжений, которое в течение апт-альбского времени и позднего мела привело к образованию рифтогенных структур Центрально-Арктической области литосферы, включая бассейны Макарова и Подводников, а также хребет Альфа-Менделеева [Лобковский и др., 2010; 2011] (рис. 2б). В кайнозойе действие этого силового поля реализовалось в образовании спредингового Евразийского бассейна с отколом хребта Ломоносова от Баренцево-Карской континентальной окраины.

Перейдем теперь к геодинамическому анализу движущих сил тектонической эволюции Арктики, которые, в частности, могли привести к раскрытию Канадской котловины в верхней юре – нижнем мелу, т.е. задолго до проникновения спрединговой границы Северной Атлантики в Арктику. Здесь прежде всего следует принять во внимание, что арктическая область Северо-Американской плиты (с включенным в нее континентом Арктида) в триасе и юре была окружена двумя палеоокеанами: Палео-

Тихим океаном (Пацификом) и Южно-Анжойским (Протоарктическим) океаном, причем последний отделял Канадскую окраину Северо-Американской плиты от Сибирской окраины Евразийской плиты значительным океанским пространством, сузившемся к началу мела до ширины 500–1000 км (рис. 2а). Начиная с юры, к постоянно действующей субдукции литосферы океана Пацифик добавляется

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 сейсмотомографического анализа внутреннего строения Земли. Если обратиться к сейсмотомографическим разрезам верхней мантии для областей перехода от Тихого океана к Северо-Восточной и Восточной Азии [Zhao et al., 2009; Жао и др., 2010, Кулаков и др., 2011], то вырисовывается совершенно определенная картина конвекции. Из полученных обобщенных разрезов мантии было сделано предположение [Zhao et al., 2009; Жао и др., 2010], что погружающееся в зонах субдукции холодное вещество, достигая переходной зоны между верхней и нижней мантией, может переходить в протяженный горизонтальный слой холодного мантийного вещества, который распространяется далеко (до 2 и более тысяч километров) под Евразийский континент. Такая картина указывает на развитие ячейки верхнемантийной конвекции, нижняя горизонтальная ветвь которой течет под континент вдоль переходной зоны между нижней и верхней мантией, а верхняя формирует возвратный поток вещества под литосферой в сторону Тихоокеанской зоны субдукции, приводя к растяжению континентальной

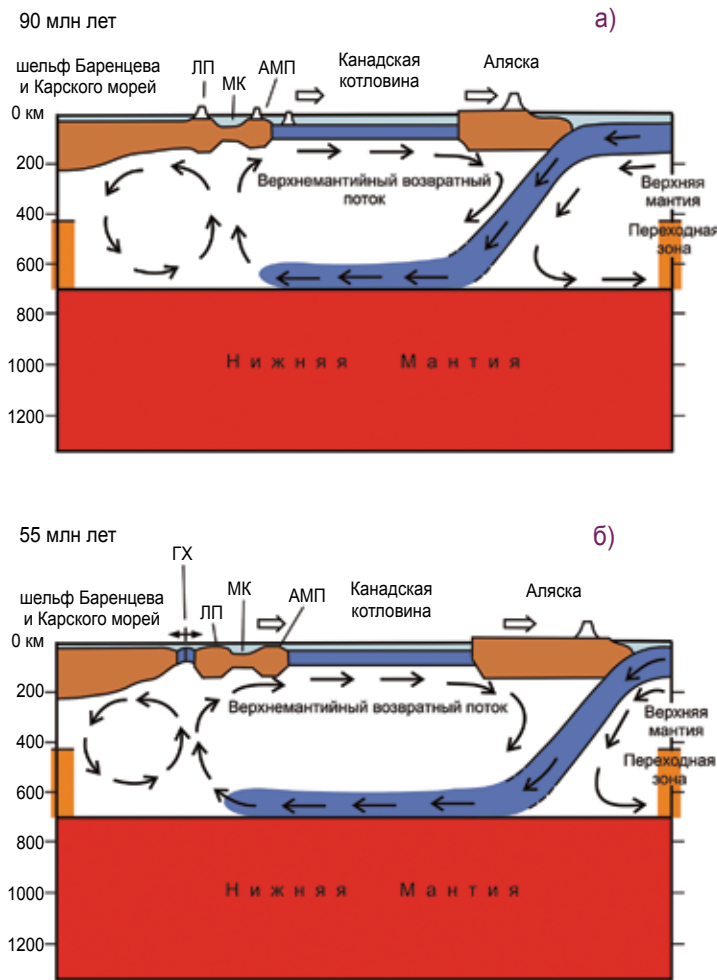


Рис. 3  
 Модель верхнемантийной ячейки под континентом, вызванной процессом субдукции Тихоокеанской литосферы, для Арктического региона за 90 (а) и 55 (б) млн лет

субдукция в Южно-Анжойском океане [Sokolov et al., 2009, 2012]. Поэтому естественно предположить, что основной причиной раскрытия Канадской котловины в поздней юре – нижнем меле, явился интенсивный сток мантийного вещества в сопряженных зонах субдукции литосферы северо-западной Пацифики и Южно-Анжойского океана [Лобковский и др., 2010; 2011].

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

литосферы, рифтогенезу и связанному с ним магматизму [Лобковский и др., 2010; 2011] (рис. 3). Данная 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 [Zhao et al., 2009; Жао и др., 2010]. 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

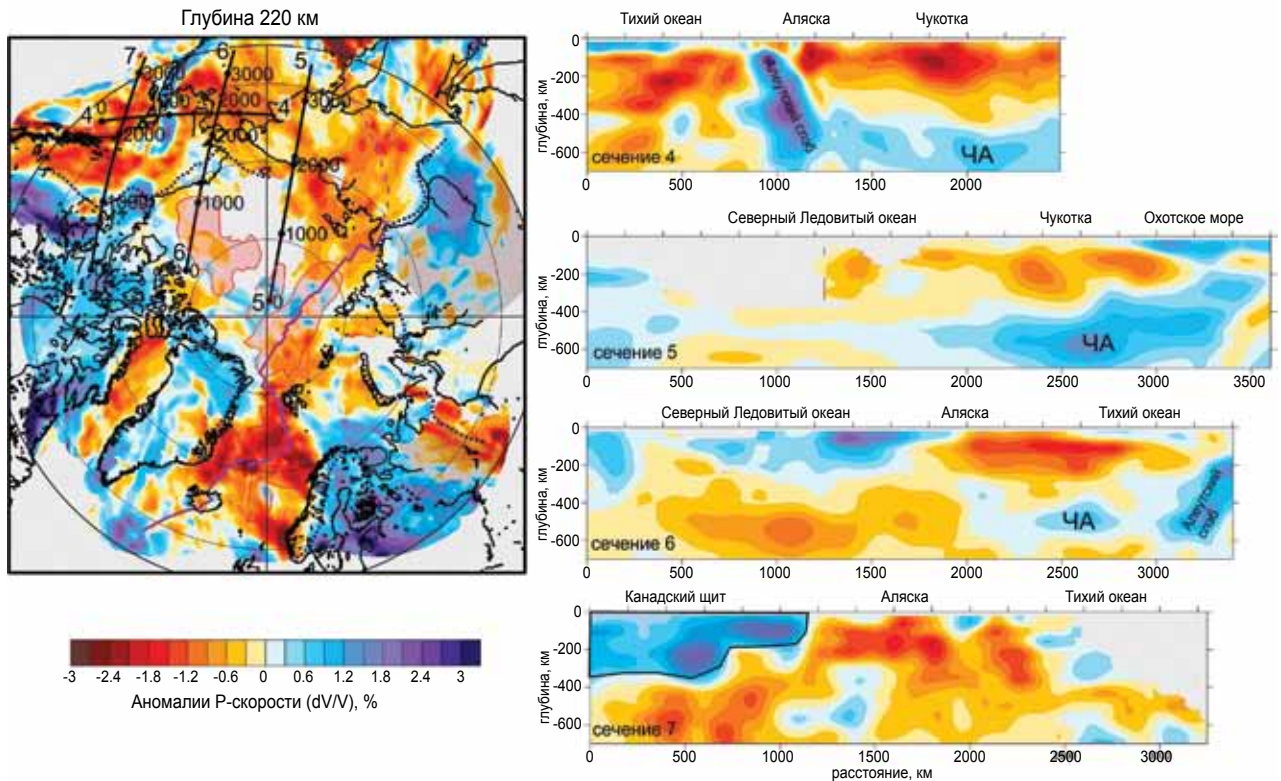


Рис. 4

Вертикальные сечения полученной модели аномалий сейсмических скоростей Р-волн вдоль четырех вертикальных сечений, положение которых показано на карте.

Положение континентальных литосферных блоков выделено голубыми контурами.

Основные географические элементы указаны над профилями.

ЧА – чукотская аномалия, природа которой обсуждается в тексте

слеба более сложная. Но в таком случае, после окончания субдукции остатки субдуцировавшего материала могут сохраниться только в переходной области. Действительно, впервые полученная сейсмотомография Арктического региона, 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] (рис. 4).

Совместный анализ данных сейсмотомографии, палеомагнетизма и плитотектонических реконструкций приводит нас 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 Тихоокеанской литосферы отражает устойчивый процесс развития общемантийной конвекции 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 (рис. 3). 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 модели 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. 3). На это накладывается плюмовый магматизм Арктического региона, рассматриваемый во многих работах [Шипилов, Карякин, 2010, Шипилов, Верниковский, 2010], который менялся на площади Арктического региона вне зависимости от зон субдукции. Этот вывод находит подтверждение в данных сейсмической томографии [Яковлев и др., 2012] (рис. 4). Описанная геодинамическая модель верхнемантийной конвекции, связанной с глобальным Тихоокеанским субдукционным конвейером, может дать единый физический механизм для объяснения основных закономерностей тектонической эволюции Арктики в мезозое и кайнозое. Сходная модель верхнемантийного плюма, вызванного погружением литосферной плиты была рассмотрена в работе [Faccenna et al., 2010].

Рассмотрим действие вышеизложенного механизма в хронологическом порядке, начиная с образования Канадской котловины в поздней юре. Как было отмечено в ряде работ по геологии Арктики [Grantz et al., 1998; Sokolov et al., 2002; 2009; Шипилов, Верниковский, 2010], начиная с юры, область континента Арктида оказалась в окрестности функционирования примыкающей к ней с одной стороны сопряженной зоны субдукции литосферы Пацифики и Южно-Аньюского океана, а с противоположной – Арктического плюма (рис. 2). 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, прежде всего Чукотки и Аляски, от Северо-Американской окраины и раскрытию Канадской котловины (рис. 2). 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, Карякин, 2010, Шипилов, Верниковский, 2010], что способствовало ослаблению и разрыву литосферы в этой зоне. Компонента горизонтального возврат-

ного 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 (см. рис. 2, 3). Таким образом, эти два блока растаскивались расходящимися мантийными потоками в разные стороны. За ними возникла обширная зона деформаций растяжения литосферы, которая позднее трансформировалась в диффузный спрединг, образовав Канадскую котловину. При этом восточный фланг хребта Альфа-Менделеева мог начать формироваться именно в это время (киммеридж/титон) в условиях трансенсии (см. рис. 2).

Достаточно заметные события происходили в раннем мелу эпохи готерива (130 млн лет). В частности, в это время отмечается значительное повышение магматической активности Арктического плюма [Карякин, Шипилов, 2009], 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, 1987], которая взаимодействовала с Евразийской плитой со стороны Пацифики (т.е. увеличилась скорость поступления субдукционного материала в верхнемантийную ячейку) (рис. 5а).

На эпоху апта (120 млн лет) пришлось фаза окончательного закрытия Южно-Аньюского океана, столкновения Чукотки с Евразией по Южно-Аньюскому шву [Sokolov et al., 2002; 2009]. Это привело к прекращению рассеянного спрединга в Канадской котловине и резкому замедлению стока мантийного вещества в Южно-Аньюской зоне. При этом активной 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 [Miller, Hudson, 1991; Miller, Verzhbitsky, 2009] и возникли условия растяжения и рифтогенеза в системе котловин и хребтов Макарова-Подводников-Альфа-Менделеева, составляющих центральный фрагмент континента Арктида (рис. 2, 5а).



К апту (119 млн лет) закончились коллизионные события в Южно-Анжуйской 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 Баренцево-морско-Карского шельфа хребта Ломоносова за счет продвижения фронта верхнемантийной ячейки на запад (рис. 3). 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 (см. рис. 1б).

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 СЛО, говорит аномальное магнитное поле данной области, характеризующееся «мелкодисперсным» изометричным рисунком аномалий, типичным для зон трапповых излияний на континентах [Поселов и др., 2008]. Хотя в пределах всей центральной магматической провинции СЛО достоверно известно лишь одно радиологическое определение возраста 82 млн лет [Initial ..., 1985], скорее всего эта цифра может служить в качестве оценки окончания магматической активности в данной провинции.

Рассмотрим несколько подробнее кайнозойский этап тектонической эволюции Арктики в связи с образованием Евразийского бассейна. Прежде всего, следует подчеркнуть, что раскрытие и дальнейшее расширение Евразийского бассейна происходило одновременно с перемещением Центрально-Арктического литосферного фрагмента Арктиды в сторону зоны субдукции Тихоокеанской литосферы по двум протяженным и не параллельным зонам трансформных разломов – Шпицбергенско-Северогренландской и Хатангско-

Ломоносовской [Лобковский и др., 2010; Шипилов и др., 2003]. Если по ним оценивать кинематику перемещения хребта Ломоносова, то можно увидеть существенные различия в величине и характере перемещений по этим трансформам. 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 Чукотско-Аляскинской микроплиты от Северо-Американской окраины [Шипилов, 2004; Лобковский и др., 2010]. На этапе расхождения Гренландии и Баренцево-морского сегмента Евразийской плиты (поздний олигоцен-миоцен) Шпицбергенско-Северогренландская трансформа была разорвана в связи с образованием рифта Моллой [Шипилов, 2004]. Ее продолжение далее в Северном Ледовитом океане (Северогренландско-Канадская окраинно-континентальная трансформа) некоторыми исследователями увязывается со сдвигом Калтаг, прослеживаемым с Аляски [McWhae, 1986]. Судя по концентрации вблизи и вдоль этой зоны разломов эпицентров землетрясений [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, заложеной по простиранию ветви каледонид-элсмирид (рис. 5б, в).

Другая, Хатангско-Ломоносовская, окраинно-континентальная трансформа довольно отчетливо отражается, как наиболее заметный линеймент, в рельефе дна Лаптево-морской континентальной окраины [Головачев, Шипилов, 1986] и в структуре геофизических полей. Кроме того, к ней приурочены и эпицентры некоторых землетрясений. Отрезок Хатангско-Ломоносовской трансформы, лежащий к востоку от района ее сочленения с хребтом Гаккеля на этапе раскрытия Евразийского бассейна, играл активную роль в кайнозойской тектонике: по нему происходило правостороннее перемещение отколовшегося сублинейного блока хребта Ломоносова в процессе открытия Евразийского бассейна. Такая картина подтверждается геофизическими данными, в частности, полученные в последнее время сейсмические материалы по профилю МОВ ОГТ, проложенному от Новосибирского архипелага до хребта

Ломоносова с пересечением его южного фланга [Казанин и др., 2010], дают основание для вывода о существовании здесь литосферной трансформной зоны разломов.

Северо-восточное продолжение Хатангско-Ломоносовской трансформы, судя по батиметрии и структуре аномального гравитационного поля, теряется в котловине Подводников на подходе к поднятию Менделеева, 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 архипелаге Де Лонга.

Представляется, что обособление и перемещение Американо-Арктического фрагмента Арктиды по описанным выше трансформам в сторону Тихоокеанской субдукции и ороклинального 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] пояс деформаций осадочного чехла, расположенный на границе континентальной и океанической коры на южной периферии Канадского бассейна. В складки пликативного типа собраны верхнемеловые-олигоценые отложения. Ареал развития этих деформаций отмечен отрицательной гравитационной аномалией и к нему подходит полоса эпицентров землетрясений Аляски, связанная с простирающимся сюда следом Алеутской зоны субдукции.

Таким образом, рассмотренные материалы 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 литосферной плиты Американо-Арктического бассейна (Американо-Арктической субплиты), включающей фрагмент древнего континента Арктида, привело к формированию пояса складчатых деформаций на границе континентальной и океанической коры в южной части Канадской котловины на рубеже олигоцена/миоцена (рис. 5 б, в).

Описанная картина кайнозойской эволюции Американо-Арктической субплиты с сохранившимся фрагментом древней Арктиды ясно показывает сдвиговую природу сочленения ее структурных

элементов с Евразийской и Северо-Американской континентальными окраинами. Как известно, сдвиги в коре и литосфере как современные, так и древние не являются разделительными границами между корой континентального и океанического типов. Отметим в этой связи, что многие континентальные окраины представляют собой широкие пояса, составленные из разнородных блоков континентальной коры, причленившихся к окраинам в ходе геологической эволюции в результате сдвигового взаимодействия крупных литосферных плит. Классическим примером такой композитной континентальной окраины является Тихоокеанская окраина Северной Америки и Северо-Востока Азии (Корякско-Камчатская складчатая область), которая состоит из многочисленных чужеродных блоков-террейнов, присоединившихся к ней в мезозое и кайнозое по многочисленным региональным сдвигам в результате правостороннего косоугольного взаимодействия Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит.

С точки зрения генезиса композитной материковой окраины составляющие ее окраинные континентальные блоки, имеющие с ней сдвиговые контакты и расположенные в областях шельфа и континентального склона, являются естественным ее продолжением в океаническую область. Точно также в случае Арктики структуры Центрально-Арктического сегмента континентальной литосферы (в частности, хребет Ломоносова или поднятие Менделеева), контактирующие с Евразийской и Северо-Американской окраинами по сдвиговым трансформным разломам, являются геологически естественными компонентами материковых окраин, непрерывно продолжающихся в глубоководную область Северного Ледовитого океана.

#### Палеорекострукции Арктики для мезозоя и кайнозоя и геологическое обоснование заявки на расширение континентального шельфа России

В заключительном разделе представлена серия реконструкций Арктики для мезозоя и кайнозоя, выполненная на основе имеющейся на сегодняшний день совокупности геолого-геофизических материалов, а также развитых здесь и ранее [Лобковский и др., 2010; 2011] геодинамических представлений об эволюции литосферы Арктического региона (рис. 5). Из этих реконструкций следует, что мезозойско-кайнозойская эволюция Арктического региона естественным образом распадается на следующие три основных этапа:

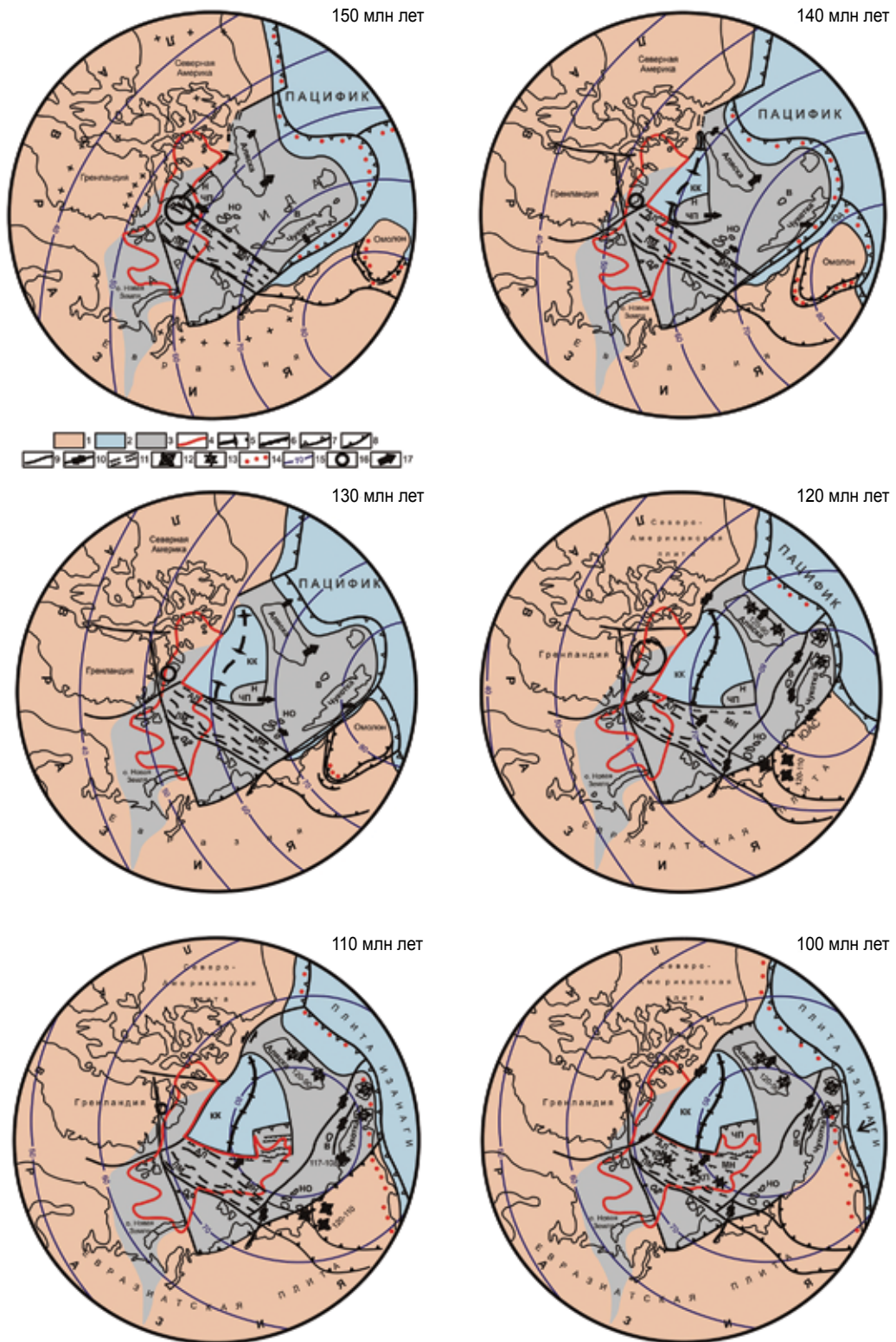


Рис. 5а

Палеогеодинамические реконструкции Арктики для мезозоя и кайнозоя с шагом 10 млн лет. Условные обозначения см. рис. 2

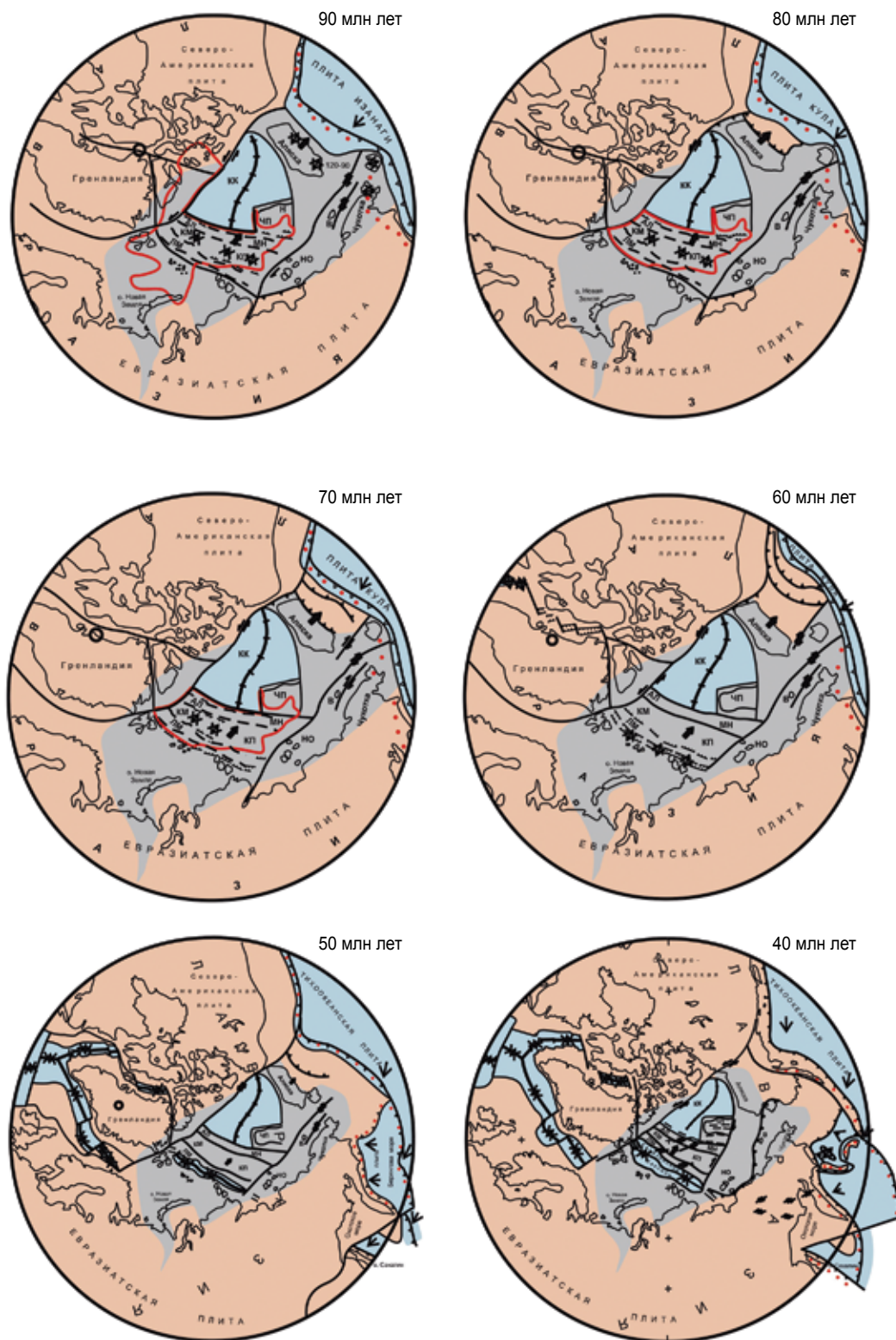


Рис. 56  
 Палеогеодинамические реконструкции Арктики для мезозоя и кайнозоя с шагом 10 млн лет.  
 Условные обозначения см. рис. 2

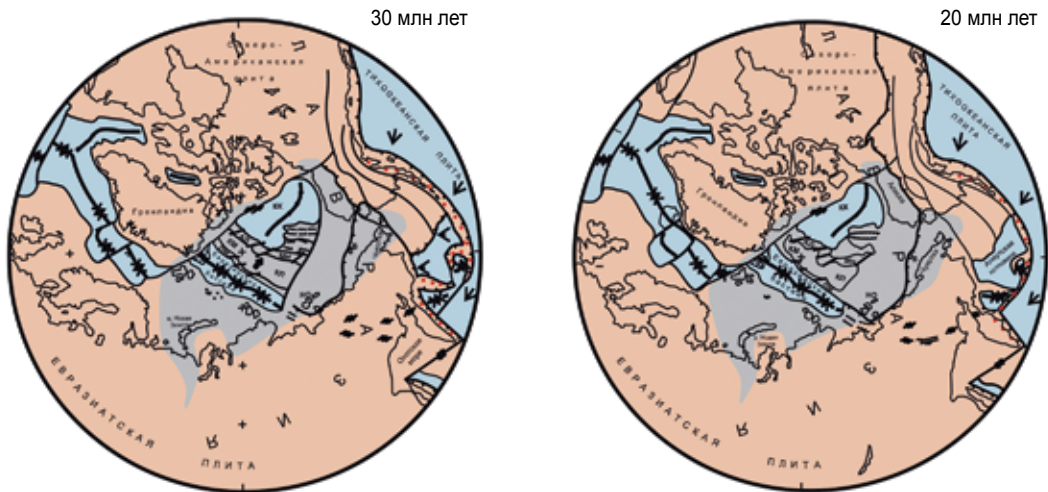


Рис. 5в

Палеогеодинамические реконструкции Арктики для мезозоя и кайнозоя с шагом 10 млн лет. Условные обозначения см. рис. 2

1) этап образования Канадского бассейна с преимущественно океанической корой за счет диффузного спрединга; 2) этап формирования структур Центрально-Арктической «провинции бассейнов и хребтов» в результате континентального рифтогенеза и сопутствующего магматизма, а именно: поднятий Ломоносова, Менделеева и Альфа, котловин Макарова и Подводников; 3) этап линейного спрединга в хребте Гаккеля и образования Евразийского океанического бассейна.

Первый этап, продолжавшийся с поздней юры до апта, связан с отколом континентальных блоков Чукотки и Северной Аляски, входящих в состав древнего континента Арктида, от Северо-Американской плиты, их движением в южном направлении к зонам субдукции, соответственно, Южно-Аньюского океана (Прото-Арктического океана) и Пацифики, коллизией Чукотки с Евразийской окраиной при закрытии Южно-Аньюского океана. При этом в тылу отодвигающихся блоков Чукотки

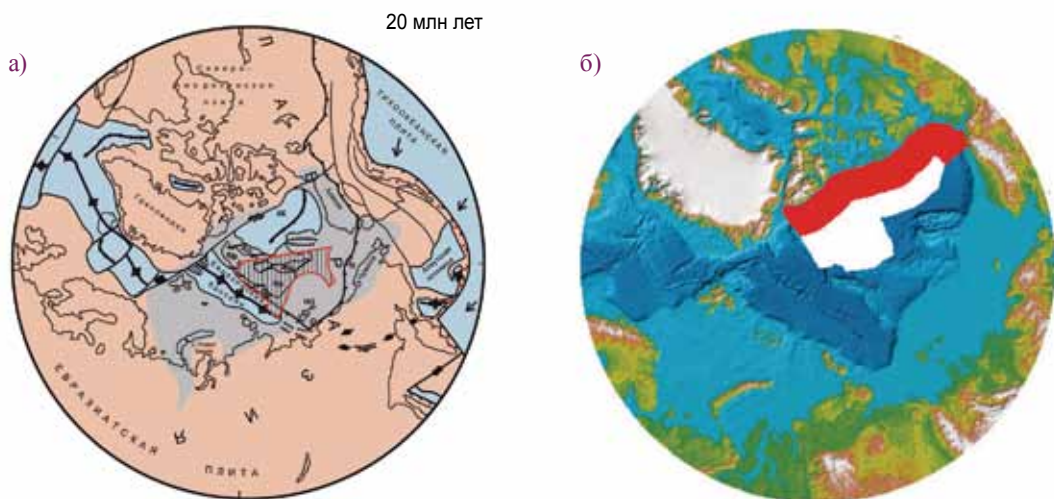


Рис. 6

Сопоставление области расширенного континентального шельфа России в Арктике и структуры Евразийской континентальной окраины, являющейся фрагментом Арктиды согласно палеорекострукции на 20 млн лет (а).

Расширенная область континентального шельфа Канады (б)

и Аляски сформировался Канадский бассейн с корой океанического типа, заполнившей образующееся пространство благодаря механизму диффузного спрединга (рис. 5а).

Второй этап, длящийся с апт-альбского рубежа до позднего мела, характеризовался континентальным рифтогенезом [Sokolov et al., 2012; Luchitskaya et al., 2012] в условиях растяжения Центрально-Арктического «куска» литосферы древнего континента Арктида в субширотном направлении, что привело к формированию характерной системы поднятий и погружений в виде хребтов Ломоносова и Альфа-Менделеева, а также котловин Макарова и Подводников. При этом рифтогенез, как это часто бывает, сопровождался внутриплитным магматизмом, проявленным, в частности, на поднятии Альфа. Важно подчеркнуть, что на данном этапе центральный фрагмент древнего континента Арктида, хотя и подвергся в процессе рифтогенеза достаточно сильным деформациям, однако сохранил свою целостность и тектоническую связь с континентальными окраинами Евразии и Северной Америки (рис. 5а, б).

Третий заключительный этап эволюции Арктики, начавшийся с раннего кайнозоя (палеоцена) и продолжающийся в настоящее время, характеризуется медленным спредингом в хребте Гаккеля, в результате которого сформированный ранее хребет Ломоносова вместе с центральным фрагментом континента Арктида (вошедшие в состав образовавшейся в мелу Американо-Евразийской субплиты) отодвинулся от Баренцево-Карской окраины в направлении Аляски и Алеутской зоны субдукции, освободив пространство для формирования Евразийского океанического бассейна. Движение центрального фрагмента континента Арктида как части Американо-Евразийской субплиты вместе с включенными в него поднятиями Ломоносова и Альфа-Менделеева и котловинами Макарова и Подводников осуществлялось по системам трансформных разломов, в частности, вдоль Шпицбергенско-Северогренландско-Канадской системы разломов со стороны Северо-Американской окраины и Хатангско-Ломоносовской системы разломов со стороны Евразийской окраины. При этом, как уже отмечалось выше, движения по сдвигам не приводили к отрыву каких-либо блоков континентального фрагмента Арктиды от окраин Евразии и Северной Америки, сохраняя тектоническую связь между ними (рис. 5б, в).

Таким образом, выполненный анализ эволюции Арктического региона показал, что структуры литосферы Центральной Арктики, расположенные

в глубоководной части Северного Ледовитого океана – поднятия Ломоносова, Альфа-Менделеева и котловины Макарова и Подводников, принадлежат к фрагменту литосферы древнего континента Арктида, сохранившего в виде своеобразного тектонического моста связь с континентальными окраинами Евразии и Северной Америки, по крайней мере, с мела и до наших дней (рис. 6а). Поэтому континентальные окраины Евразии и Северной Америки имеют непосредственное продолжение в глубоководную часть СЛО в центральной области Арктического бассейна, а поднятия Ломоносова и Альфа-Менделеева вместе с котловинами Макарова и Подводников представляют собой «естественные компоненты» этих материковых окраин. Отсюда в соответствии с пунктом 6 статьи 76 Конвенции ООН по морскому праву следует вывод о юридической обоснованности претензий России на расширение площади своего континентального шельфа в Арктике вплоть до Северного полюса, как это было представлено в заявке России в Комиссию ООН по границам континентального шельфа в 2001 г. Очевидно, что, исходя из данной научной концепции, аналогичные юридически обоснованные претензии на расширение площадей своих шельфов до Северного полюса могут предъявить Канада (рис. 6б) и Дания.

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» и при поддержке Программы Президиума РАН № 23 «Мировой океан».

#### Литература:

1. Аветисов Г.П. Сейсмологические исследования НИИГА – ВНИИОкеангеология в Арктике (история, достижения, перспективы) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. Т. 82. №2. С. 27–41.
2. Верниковский В.А. Геодинамическая эволюция таймырской складчатой области/Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. 202 с.
3. Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Каминский В.Д., Лобковский Л.И., Шипилов Э.В.

- Геодинамика Центральной и Восточной Арктики // Материалы совещания по координации РАН по изучению Арктики и Антарктики, Архангельск, Екатеринбург. 2010. С. 41–58.
4. Головачев Э.М., Шипилов Э.В. Линеаментные зоны моря Лаптевых // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1986. № 8. С. 106–108.
  5. Жао Д., Пираино Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1188–1203.
  6. Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М., Тектоническая история Арктики // В кн.: Актуальные проблемы тектоники океанов и континентов. М.: Наука, 1987. С. 31–57.
  7. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР: В 2 кн. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 328 с.
  8. Казанин Г.С., Шкарубо С.И., Павлов С.П. и др. // Материалы IV международной рабочей встречи по делимитации шельфа в Арктике. Сессия 3. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. CDR-ресурс.
  9. Карякин Ю.В., Шипилов Э.В. Геохимическая специализация и 40Ar/39Ar возраст базальтоидного магматизма островов Земля Александры, Нортбрук, Гукера и Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа) // Докл. РАН. 2009. Т. 425. №2. С. 1–5.
  10. Кононов М.В. Тектоника плит северо-запада Тихого океана. М.: Наука, 1989. 167 с.
  11. Кузнецов Н.Б. Кембрийская коллизия Балтики и Арктиды, ороген Протоуралид-Тиманид и продукты его размыва в Арктике // Докл. РАН. 2006. Т. 411. № 6. С. 788–793.
  12. 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.
  13. Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Кононов М.В. и др. 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.
  14. 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.
  15. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир, 2004. 610 с.
  16. Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции // Геология и геофизика. 2012, (в печати).
  17. Поселов В.А., Буценко В.В., Верба В.В. и др. Поднятия Американо-Сибирского 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.
  18. Соколов С.Д., Тучкова М.И., Бондаренко Г.Е. Тектоническая модель Южно-Аннуйской сuture и ее роль в формировании структур восточной Арктики // Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen, 2010. С. 204–227.
  19. Шатский Н.С. Избранные труды. Т. I–IV. М.: Наука, 1963–1965.
  20. Шипилов Э.В. К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин Арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника. 2004. №5. С. 26–52.
  21. 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.
  22. 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.
  23. Шипилов Э.В., Шкарубо С.И., Богданов Н.А., Хаин В.Е. О тектоно-геодинамических взаимоотношениях областей молодого океанообразования с континентальными окраинами Арктики (Шпицбергенской и Лаптевоморской) // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Вып. 3. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003. С. 41–58.

24. 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.
25. 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. (в печати).
26. *Continental Shelf Limits. The scientific and legal interface* // Cook P.J., Carleton C.M. (eds.). Oxford University Press, 2000. 363 p.
27. *Dinkelmann M.G., Kumar N., Helwig J. et al. Highlights of Petroleum and Crustal Framework of the Beaufort-Mackenzie Basin: Key Results from BeaufortSPAN East Phases I and II Surveys* // Canadian Society Exploration Geophysicists (CSEG). Recorder. 2008. Vol. 33. № 9. P. 22–25.
28. *Embry A. F., Dixon J. The age of the Amerasia Basin* // Thurston D., Fujita K. (eds). Proceedings International Conference on Arctic Margin 1992. US Minerals Management Service, Anchorage, AK, Reports, MMS94-0040. 1994. P. 289–294.
29. *Faccenna C., Becker T. W., Lallemand S., Lagabriele Y., Funicello F., Piromallo C. Subduction-triggered magmatic pulses: A new class of plumes?* // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. V. 299. P. 54–68.
30. *Gaina C., Roest W.R., Muller R.D. Late Cretaceous-Cenozoic deformation of northeast Asia* // Earth Planet. Sci. Lett. 2002. V. 197. P. 273–286.
31. *Grantz, A., Clark, D. L., Phillips, R. L. et al. 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. V. 110. P. 801–820.
32. *Grantz A., May S.D. Sedimentary basins and geologic structure of the continental margin north of Alaska* // Geology of the Arctic. Moscow, 1984: Proc. 27 I.G.C. Coll. 04. P. 105–118.
33. *Initial geological report on CESAR - the Canadian Expedition to study the Alpha Ridge Arctic Ocean* // Jackson H.R., Mudie P.J., Blasko S.M. (eds). Geol. Survey Canada. Paper 84–22. 1985. 177 p.
34. *Lawver L.A., Ganagan L.M., Norton I. Palaeogeographic and tectonic evolution of the Arctic region during the Palaeozoic.* // Spencer, A. M., Embry, A. F., Gautier, D. L., Stoupakova, A. V. and K., Sørensen (eds). Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs. 2011. V. 35. P. 61–77.
35. *Lawver L.A., Grantz A., Gahagan L.M. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician.* // Miller, E.L., Grantz, A., Klemperer, S.L. (Eds.) Tectonic Evolution of the Bering Shelf–Chukchi Sea – Arctic Margin and Adjacent Landmasses. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. Boulder, CO: 2002. V. 360. P. 333–358.
36. *Luchitskaya M.V., Sokolov S.D., Moiseev A.V. Stages of Late Mesozoic granitoid magmatism of Chukotka (NE Russia).* // EGU General Assembly. Geophysical Research Abstracts. 2012. V. 14. EGU2012-2322.
37. *McWhae J.R. Tectonic history of Northern Alaska, Canadian Arctic, and Spitsbergen regions since Early Cretaceous* // The American Association of Petroleum Geologist Bulletin. 1986. Vol. 70. № 4. P. 430–450.
38. *Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu. Siberia – from Rodinia to Eurasia* // Closson D. (ed.) Tectonics. Tech, Rijeka, Croatia, 2011. P. 103–136.
39. *Miller E.L., Hudson T.L. Mid-Cretaceous extensional Fragmentation of a Jurassic-Early Cretaceous compressional orogen, Alaska* // Tectonics. 1991. V. 10. № 4. P. 781–796.
40. *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., Layer P. W., Miller E. L., Prokopiev A. V., Toro J. (eds.) Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov. EGU Stephan Mueller Publication Series. 2009. V.4. P. 223–241.
41. *Sokolov S.D., Bondarenko G.Ye, Morozov O.L. et al. Souyh Anyui suture, northeast Arctic Russia: Facts and problems* // Miller E.L., Grantz A, and Klemperer S.L. (eds), Tectonic evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses. GSA Special Paper. 2002. V. 360. P. 209–224.
42. *Sokolov, S. D., G. Ye. Bondarenko, P. W. Layer, and I. R. Kravchenko-Berezhnoy. South Anyui suture: tectono-stratigraphy, deformations, and principal tectonic events* // Stone D. B., Fujita K., Layer P. W., Miller E. L., Prokopiev A. V., and Toro J. (eds.). Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov. European Geosciences Union. Stephan Mueller Publication Series. 2009. V. 4. P. 201–221.
43. *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.