

## IV. Экология

## Геодинамическая модель эволюции арктического региона в позднем мезозое-кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России

*Л.И. Лобковский, чл.-корр.РАН, В.Е. Вержбицкий, к.г.-м.н.,*

*М.В. Кононов, к.г.-м. н., А.А. Шрейдер, д.г.-м.н*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

*И.А. Гарагаш, д.ф.-м.н.*

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

*С.Д. Соколов, д.г.-м.н., М.И. Тучкова, д.г.-м.н.*

Геологический институт РАН

*В.Д. Котелкин, д.ф.-м.н.*

Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова

*В.А. Верниковский, чл.-корр.РАН*

Институт нефтяной геологии и геофизики

им.А.А.Трофимука СО РАН

### Введение

**К**ак известно, в 2001 году Россия подала в ООН заявку на расширение внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) в Северном Ледовитом и Тихом океанах в соответствии с Конвенцией ООН по морскому праву от 1982 г. В этой заявке предлагалось, в частности, рассмотреть вопрос о включении крупных подводных тектонических структур центральной части арктического бассейна в область расширенного шельфа России. Речь шла, прежде всего, о хребте Ломоносова и поднятии Альфа-Менделеева вместе с разделяющими их котловинами Подводников и Макарова.

Комиссия ООН по границам континентального шельфа, рассмотрев заявку России, нашла недостаточно убедительными содержащиеся в ней аргументы о принадлежности центральных структур Северного Ледовитого океана (СЛО) к российскому шельфу и предложила представить более весомые дополнительные доказательства в пользу континентальной природы этих структур и их неразрывной связи с Евразийской континентальной окраиной. При этом повторная заявка России в Комиссию ООН по расширению ВГКШ должна быть подана в 2013 году.

В условиях относительной доказательной базы геофизических материалов по глубинному строению и типу коры центральных структур СЛО и отсутствия глубокого бурения коры в тяжелых ледовых условиях СЛО большое, если не решающее, значение приобретает построение адекватной модели геологической эволюции арктического региона, которая должна ясно показывать континентальное происхождение тектонических структур центральной области СЛО и их структурно-генетическую связь с Евразийской континентальной окраиной.

Учитывая данные обстоятельства, Вице-президент РАН академик Н.П.Лаверов предложил Агентству по недропользованию РФ (Роснедра), ответственному за подготовку повторной заявки России в Комиссию ООН по ВГКШ, максимально использовать потенциал Российской академии наук для теоретического обоснования ВГКШ России в СЛО, исходя из современных геодинамических представлений об эволюции арктического региона. Это предложение было принято руководством Роснедра, и в апреле 2010 года оно объявило тендер на выполнение работы «Построение плитотектонических реконструкций и модели напряженного состояния литосферы арктического региона в связи с проблемой расширения внешней границы континентального

шельфа РФ». В итоге проведенного конкурса головной организацией для выполнения данной работы был определен Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, а в качестве соисполнителей выступили ведущие Институты РАН, занимающиеся проблемами геологии Арктики: Геологический институт РАН, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Институт нефтяной геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, а также ФГУП ВНИИОкеангеология им. И. С. Грамберга.

Таким образом в Российской академии наук был сформирован временный творческий коллектив под руководством Вице-президента РАН академика Н. П. Лаверова, состоящий из ведущих специалистов разных направлений наук о Земле (геологов, геофизиков, механиков, специалистов по численному моделированию), перед которым была поставлена важнейшая задача научного обоснования ВГКШ России в Арктике на основе создания количественной геодинамической модели эволюции арктического региона. Среди участников коллектива: член-корреспондент РАН Л. И. Лобковский (являющийся ответственным исполнителем работ по договору Роснедра-РАН), академик Н. Л. Добрецов, член-корреспондент РАН Е. В. Артюшков, член-корреспондент РАН В. А. Верниковский, д. ф.-м. н. И. А. Гарагаш (ИФЗ РАН), д. ф.-м. н. В. Д. Котелкин (МГУ), д. г.-м. н. С. Д. Соколов (ГИН РАН), д. г.-м. н. Э. В. Шипилов (ММБИ РАН), д. г.-м. н. А. А. Шрейдер (ИО РАН) и другие.

В настоящей работе рассматриваются представления об эволюции арктического региона в позднем мезозое – кайнозое, когда были сформированы основные структурно-тектонические элементы, определяющие современный геоморфологический облик глубоководной части СЛО: Канадская котловина, поднятие Альфа-Менделеева, хребет Ломоносова, котловины Макарова и Подводников, хребет Гаккеля, котловины Нансена и Амудсена, Чукотское плато, хребет Нортвинд. Кроме того, развивается новый геодинамический подход к анализу эволюции арктического региона, обобщающий плитотектоническую методологию, который основан на количественном описании упруго-пластических деформаций литосферы, вызванных конкретным распределением конвективных течений в мантии, получаемых из данных сейсмической томографии Земли и геометрии палеозон субдукции и плюмов в мезо-кайнозое, а также взаимодействием смежных литосферных плит в полярной области Земли.

**Геолого-геофизические данные и существующие представления о строении и мезо-кайнозойской эволюции арктического региона**

Основными структурными элементами арктического региона являются (рис. 1, 2):

- мезо-кайнозойские океанические бассейны (Евразийский бассейн с котловинами Нансена и Амудсена, Амеразийский бассейн с котловинами Канадской, Макарова и Подводников);
- крупные шельфовые моря с примыкающими к ним участками суши, с которыми связаны глубокие осадочные бассейны, начавшие погружаться в разное время, начиная с позднего палеозоя (бассейны Баренцева и Карского морей, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей Евразийской окраины, бассейн моря Бофорта, обрамляющий с юга Канадскую котловину, Свердрупский бассейн в Канадском Арктическом архипелаге);
- континентальное основание, включающее древние щиты (Балтийский, Анабарский и Канадский), перекрывающие их позднедокембрийский и палеозойский платформенные чехлы, складчатые пояса (Каледонский, Уральский, Таймырский, Тиманский, Иннуитский, Верхояно-Чукотский и Северной Аляски), разделяющие древние платформы (Восточно-Европейскую, Сибирскую и Северо-Американскую).

Важное значение для понимания строения и эволюции арктического региона имеет существование в его пределах древних докембрийских блоков континентальной коры, которые являются фрагментами древней платформы (Гипербореи согласно ранним представлениям Н. С. Шатского (1935)). Позднее Л. П. Зоненшайн и Л. М. Натапов (1978) в своей плитотектонической модели эволюции арктического региона развили представления о древнем континенте, игравшем существенную роль в этой эволюции, назвав его Арктидой (рис. 1). По мнению В. Е. Хаина и др. (2009) современные геолого-геофизические данные указывают, что фрагменты неопротерозойского кратона Арктида, разрушенного в ходе палеозойско-кайнозойской эволюции, сегодня занимают практически всю полярную область, вскрываясь по континентальному обрамлению арктических океанических бассейнов на архипелаге Новая Земля, полуострове Таймыр, Карском массиве, Новосибирских островах, архипелаге де-Лонга, острове Врангеля, полуострове Сьюард, хребте Брукса, Земле Пири, Канадском Арктическом архипелаге и других местах. Есть все основания полагать, что основные структуры Центральной Арктики, а именно: хребет Ломоносова, поднятия Альфа и Менделеева, котловины Подводников и Макарова, хребет Нортвинд и другие также представляют собой сохранившиеся в ходе геологической эволюции фрагменты древнего кратона Арктида. При такой картине геологической эволюции арктического региона хребет Ломоносова как и поднятие Альфа-Менделеева должны являться

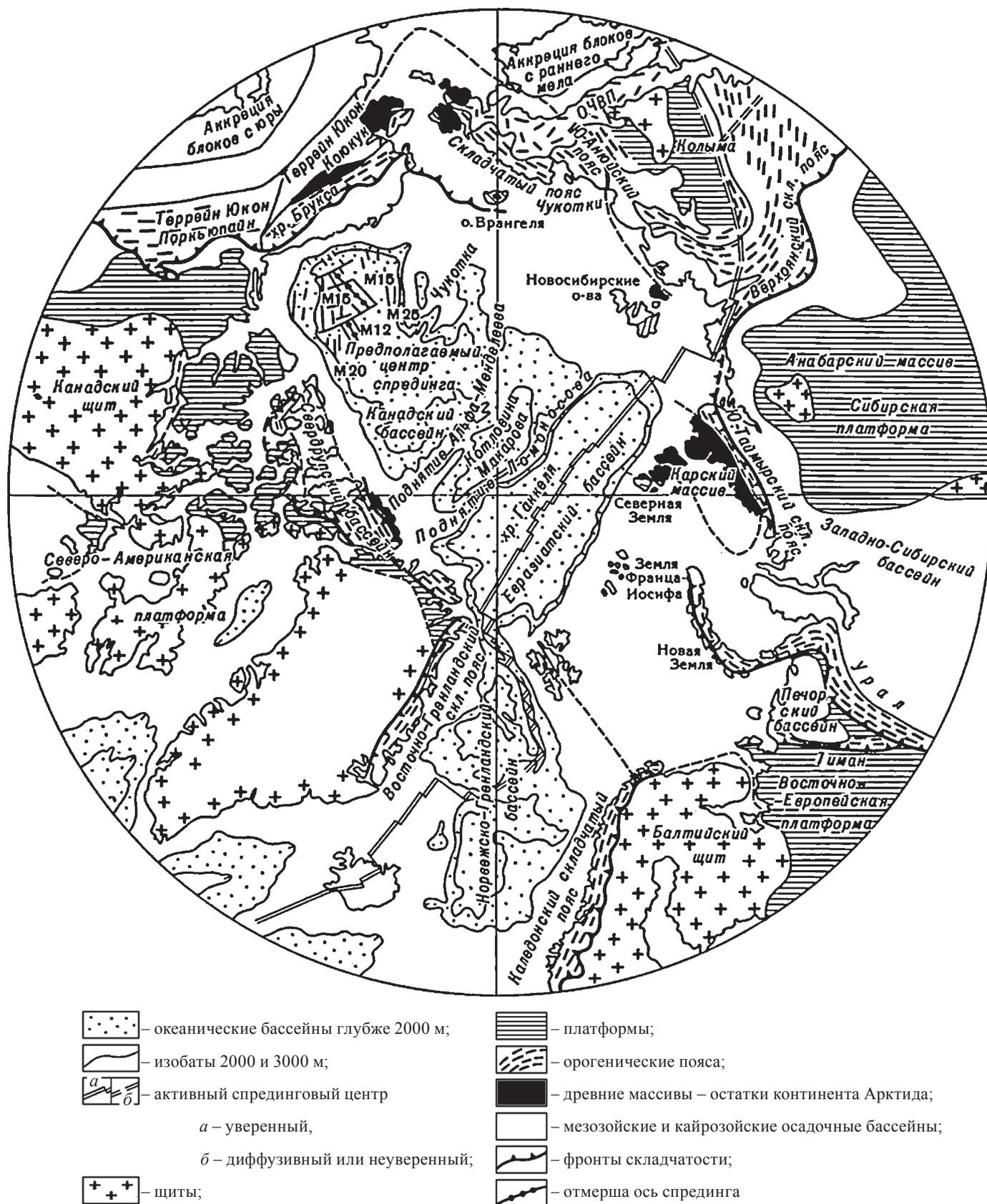
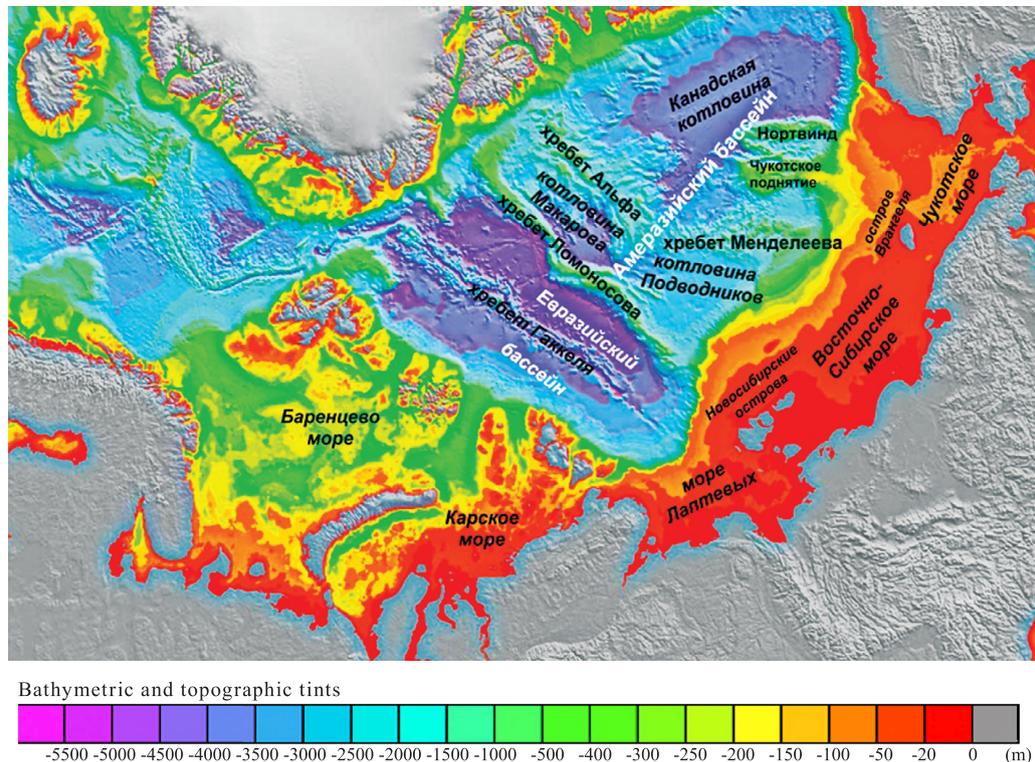


Рис 1  
 Главные геологические  
 структуры Арктики  
 [Зоненшайн, Натапов,  
 1987]

Рис. 2  
Основные  
геоморфологические  
структуры Северного  
Ледовитого океана  
(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/currentmap.html>)



естественными продолжениями материковых окраин Евразии и Северной Америки, что создает научную базу для определения ВГКШ как для России, так и для Канады и Дании.

Таким образом, ключевое значение для обоснования ВГКШ России в Арктике имеет построение адекватной модели мезо-кайнозойской деструкции кратона Арктида, включая образование Канадской котловины в юре, формирование центральной арктической провинции бассейнов и хребтов (бассейны Макарова и Подводников, хребты Альфа и Менделеева) в мелу и возникновение Евразийского спредингового бассейна в кайнозой с океаническим хребтом Гаккеля в центре бассейна и континентальным хребтом Ломоносова по его восточному обрамлению.

Учитывая доказанную на основании выявленной системы кайнозойских линейных магнитных аномалий [Карасик, 1973; Шрейдер, 2004; и мн. др.] спрединговую природу хребта Гаккеля и Евразийского бассейна в целом, вряд ли можно сомневаться в континентальной природе хребта Ломоносова, который был «отрезан» от Баренцево-Карской пассивной окраины в процессе развития рифтогенеза, переходящего в спрединг в палеоцене [Хаин, 2001, Хаин и др., 2009]).

В то же время происхождение хребта Альфа-Менделеева, также как и бассейна Макарова до сих пор остается загадкой для мирового сообщества арктических геологов и геофизиков [Богданов, 2004].

Существуют, по крайней мере, четыре основные группы моделей происхождения хребта Альфа-Менделеева:

- срединно-океанический хребет [Деменицкая, 1975; Карасик, 1974];
- островная дуга [Herron et al., 1974; Зоненшайн, Натанов, 1987]
- внутриплитное океаническое вулканическое плато [Jokat et al., 2007];
- континентальный фрагмент [Пуцаровский, 1976; Заманский и др., 2002; Поселов и др., 2002; Кабаньков и др., 2004; Lebedeva-Ivanova et al., 2009; Miller et al., 2008; Miller and Verzhbitsky, 2009].

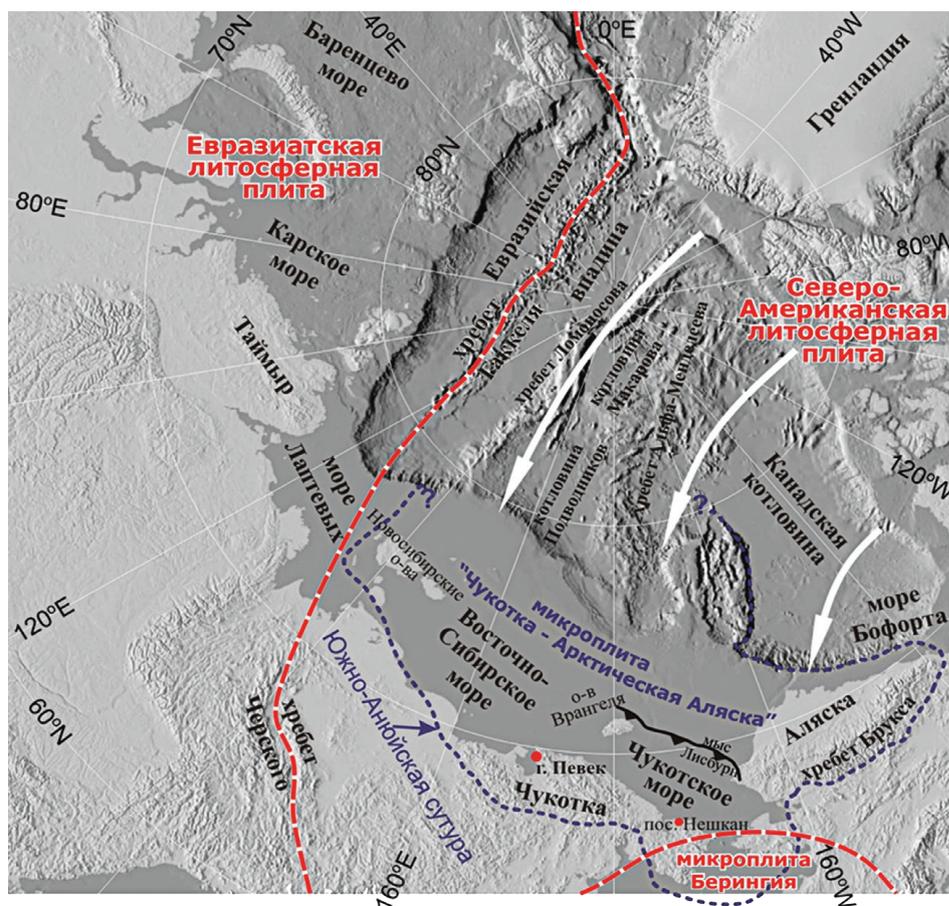
Что касается бассейна Макарова, то диапазон возрастов его формирования у разных авторов [Taylor et al., 1981; Rowley and Lottes, 1988; Weber and Sweeney, 1990; Шпилов, 2004] варьирует от позднего мелопалеоцена (71-56 Ма [Шрейдер, 2004]), до поздней юры – неокома (157–127 Ма) [Гуревич, Меркурьев, 2007].

В работах [Miller et al., 2008; Miller and Verzhbitsky, 2009] на основе геолого-структурных и геохронологических исследований на севере Чукотского полуострова обосновывается апт-альбский (~117–108 Ма) возраст формирования бассейна Макарова. При этом, в соответствии с широко распространенной «ротационной моделью» [Grantz et al., 1998; Sokolov et al., 2002; 2009; и мн. др.], предполагается, что в юрско-меловое время ключевую роль в геодинамическом развитии Арктики играла микроплита «Чукотка-Арктическая Аляска», отрыв которой от Канадского Арктического архи-

пелага и последующее столкновение с Евразией привели к формированию Канадской котловины СЛО, закрытию Южно-Аньюского палеоокеана и формированию складчато-надвиговых поясов, протянувшихся от Новосибирских островов через Чукотку к хребту Брукса Аляски (рис. 3). Согласно результатам работы [Miller and Verzhbitsky, 2009], сразу же после завершения коллизионных процессов в конце неокома, в апт-альбское время территория Центральной Чукотки подверглась интенсивному близширотному растяжению – примерно вкост простирающегося расположенного севернее бассейна Макарова. Поскольку раскрытие Евразийского бассейна в результате рифтогенеза, а затем спрединга океанского дна началось заведомо позже – в позднем мелу-кайнозое [Драчев, 2000; Drachev et al., 1998; Gaina et al., 2002], то естественно связывать более раннее апт-альбское растяжение литосферы с возникновением более древнего бассейна близкой пространственной ориентировки, а именно – бассейна Макарова (рис. 4).

При рассмотрении возраста и происхождения зоны срединных поднятий и котловин Северного Ледовитого океана следует принять во внимание существование на востоке Якутии весьма протяженного (~ 500 км) долготного Нижнеиндигирского рифтового пояса, впервые выделенного А.П.Ставским [Ставский, 1982] и исследованного в последующих работах [Трунилина и др., 1999; Парфенов, Кузьмин, 2001]. Существование подобной структуры вполне согласуется с предположением об апт-альбском времени возникновения котловины Макарова и дает основание считать, что рифтогенез литосферы Центрально-арктического региона продолжал развиваться в позднем мелу синхронно с развитием Охотско-Чукотского вулcano-плутонического пояса, маркирующего палеосубдукционную зону окраины Азии, вплоть до раннего палеогена.

Таким образом, в первом приближении позднемезозойско-кайнозойская эволюция центральной части арктического региона претерпела две основные геодинамические фазы, характеризующиеся



Красным пунктиром показано положение идеализированных границ современных литосферных плит. Синим пунктиром показано положение микроплиты «Чукотка – Арктическая Аляска». Белые стрелки соответствуют идеализированным траекториям движения микроплиты «Чукотка – Арктическая Аляска» в процессе раскрытия Канадской котловины. Топографическая основа – IBCAO (2001, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html>).

Рис. 3

Карта основных географических и тектонических элементов Арктики (на основе карты [Miller et al., 2006], с изменениями и дополнениями по [Ландер и др., 1994; Имаев и др., 2000; Mackey et al., 1997])

разными полями напряжений в литосфере. Первая фаза, продолжавшаяся с поздней юры до апта, характеризовалась полем напряжений с существенной долготной компонентой растяжения, что привело к отрыву Чукотско-Аляскинского блока Арктиды от Североамериканского континента, движению Чукотки на юг, ее коллизии с Евразийской окраиной в результате закрытия Южно-Анжуйского палеоокеана и раскрытию Канадского океанического бассейна. Вторая фаза эволюции началась фактически с возникновения с апта постколлизийного широтного поля растягивающих напряжений, которое в течение апт-альбского времени и позднего мела привело к образованию рифтогенных структур Центрально-арктической области литосферы, включая бассейны Макарова, Подводников и хребет Альфа-Менделеева, а в кайнозойе действие этого силового поля реализовалось в образовании спредингового Евразийского бассейна. Объяснение такой картины геодинамической эволюции арктического региона предлагается в следующем разделе.

#### Геодинамическая модель формирования основных структур Северного Ледовитого океана в позднем мезозое-кайнозое

Как было отмечено выше, до последнего времени отсутствовала удовлетворительная геодинамическая модель возникновения Амеразийского бассейна, способная, с одной стороны, объяснить известные геологические данные о строении и эволюции основных структур этого бассейна, а с другой – предложить непротиворечивый с точки зрения геомеханики механизм их образования. В основе предлагаемой нами модели лежат следующие предположения и принципы.

Во-первых, мы исходим из того, что главной движущей силой, приводящей к раскрытию Канадской котловины в поздней юре – нижнем мелу, является мощный сток мантийного вещества в сопряженных зонах субдукции литосферы Северо-западной Пацифики и Южно-Анжуйского океана. Существование

Черные звездочки соответствуют областям постколлизийной магматической активности, цифры соответствуют ее датировкам. Удлиненные черные эллипсы – усредненное простирание даек и других структур растяжения, разнонаправленные стрелки – направление постколлизийного растяжения. Тонкие черные линии в пределах хребтов Ломоносова, Альфа-Менделеева и Чукотского бордерленда соответствуют предполагаемым сбросам. Черная точечная линия – положение Южно-Анжуйской сuture

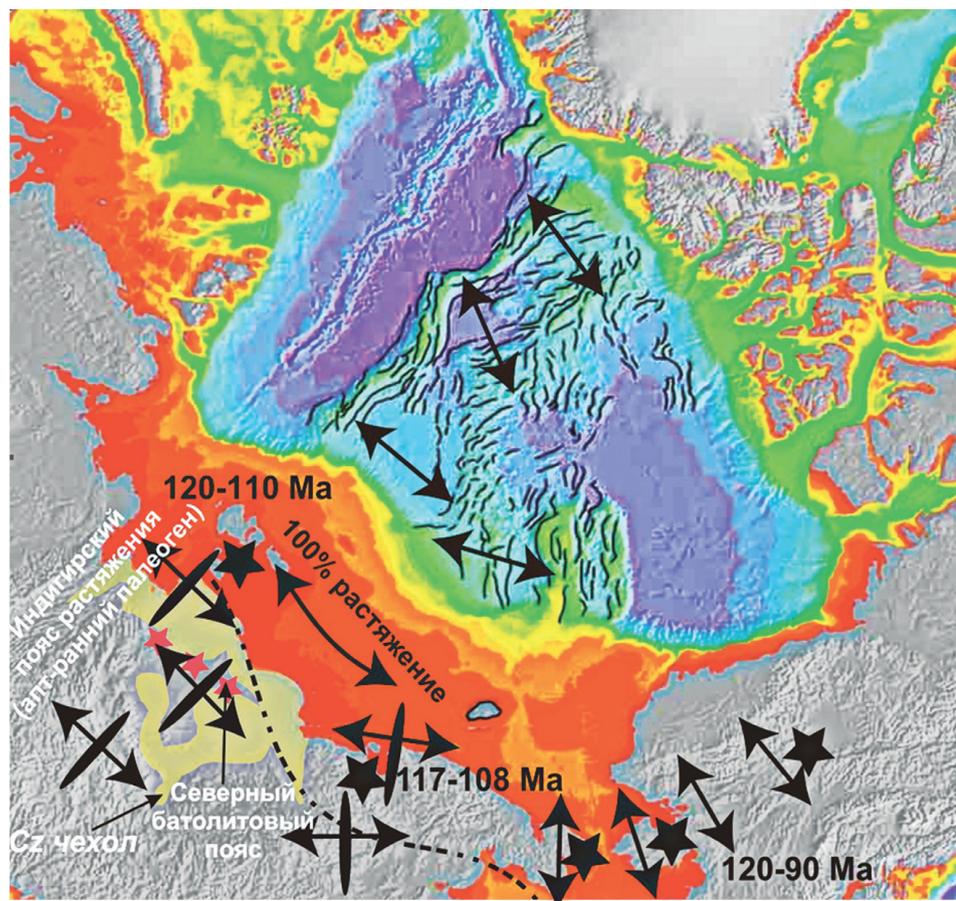


Рис. 4

Модель раскрытия бассейна Макарова в апт-альбское время, основанная на результатах геохронологических и структурных исследований. По [Miller and Verzhbitsky, 2009] с дополнениями по [Парфенов, Кузьмин, 2001]

такого мантийного стока в рассматриваемой области Земли в период времени, начиная по крайней мере с юры, доказываются современными данными сейсмической томографии, из которых видно, что самая крупная на Земле аномалия высокоскоростного вещества нижней мантии расположена как раз под областью современного положения северо-восточной части Азиатского континента [Fukao et al., 1994; Лобковский и др., 2004]. Отсюда следует, что начиная с юры в области континента Арктида, примыкающей к сопряженной зоне субдукции литосферы Пацифики и Южно-Аньюского океана имела место крупномасштабная конвективная ячейка, верхняя ветвь которой тянула литосферу Арктиды к этой криволинейной зоне стока, что привело к отколу крупного блока Арктиды от Северо-Американской окраины и раскрытию Канадской котловины.

Второе принципиальное положение нашей модели состоит в том, что вместо жестких вращательных движений микроплит, постулируемых классической концепцией тектоники плит, мы рассматриваем распределенные (пластические) деформации литосферы разрушающейся Арктиды с разнонаправленными движениями составляющих ее континентальных блоков, в частности, Чукотки и Аляски. В этом контексте известная ротационная модель движения Аляски и образования Канадской котловины имеет весьма серьезные ограничения. Соответственно, в модели распределенных деформаций океанская кора Канадской котловины образуется в результате так называемого диффузного спрединга без формирования одной линейной зоны раздвижения литосферы.

Третье положение модели состоит в том, что возникновение интенсивного близширотного растяжения литосферы рассматриваемого региона в аптальбское время сразу после завершения коллизии Новосибирско-Чукотского блока с Евразийской окраиной объясняется тем, что затягивающий эффект зоны субдукции Южно-Аньюского океана при его закрытии в значительной степени снижается, в то время как продолжающийся мощный сток мантии в зоне субдукции западной Пацифики создает активный тянущий эффект мантийной ячейки в субширотном направлении. Этот длительный эффект тяги литосферы к зоне мантийного стока западной Пацифики и определяет всю дальнейшую эволюцию тектонических структур арктического региона, в частности последовательное формирование поднятия Альфа-Менделеева, котловин Макарова и Подводников, спредингового хребта Гаккеля, хребта Ломоносова, котловин Нансена и Амудсена.

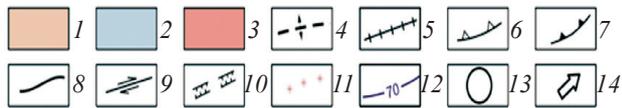
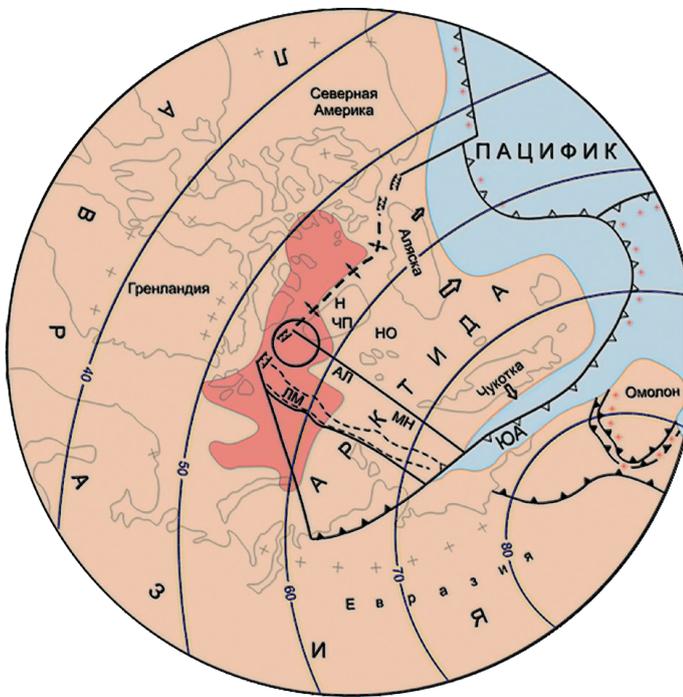
Разрабатываемая нами модель проиллюстрирована палеогеодинамическими реконструкциями на 150 и 120 млн. лет. Эти временные срезы взяты

как наиболее важные рубежные этапы тектонического развития арктического региона. Реконструкции выполнены по отношению к неподвижной Евразии. Северо-Американская и Евразийская плиты составляли единый суперконтинент Лавразию [Зоненшайн, Наманов, 1987] вплоть до среднего мела (около 120 млн лет), когда произошло разделение этих плит [Herron et al., 1974]. До этого времени между плитами происходил длительный период рифтогенеза, который начался еще в позднем карбоне-перми [Mjelde et al., 1998; Faerseth, Lien, 2002].

Палеогеодинамическая реконструкция на 150 млн лет (поздняя юра- киммеридж/титон) показывает начало раскрытия Канадской котловины, которое означает деструкцию кратона Арктида (рис. 5). Отколу Новосибирско-Чукотско-Аляскинского блока кратона Арктиды от Североамериканского континента способствовало влияние обширного мантийного плюма, располагающегося, судя по проявлениям магматизма, как раз на границе плиты (рис. 5–8) [Шипилов, Верниковский, 2010].

Движущей силой откола, как уже отмечалось выше, является наличие длительно существующих зон субдукции, которые дугой опоясывают кратон Арктида в Южно-Аньюском океане и западной Палеопацифике. Зона стока тяжелого литосферного материала в мантию в Южно-Аньюской зоне субдукции тянет блок Чукотки и Новосибирских островов на юго-восток (в системе ориентации рисунка) в направлении Евразии вдоль крупного сдвига вдоль борта хребта Альфа-Менделеева. В это же время зона стока в мантии в зоне субдукции на окраине Палеопацифики приводит к квазиротационному вращению Аляскинского блока в восточном направлении. Таким образом, эти два блока тянутся мантийными потоками в разные стороны. Между ними возникает обширная зона деформаций растяжения (и правосторонней трансенсии?). Восточный фланг хребта Альфа-Менделеева мог начать формироваться именно в это время в условиях трансенсии.

Палеогеодинамическая реконструкция на 120 млн лет (ранний мел, апт, рис. 6) показывает стадию окончательного закрытия Южно-Аньюского океана, столкновения Чукотки с Евразией по Южно-Аньюскому шву. Это приводит к прекращению спрединга (по-видимому диффузного) в Канадской котловине и резкому замедлению стока мантийного вещества в Южно-Аньюской зоне. При этом активной областью погружения мантийного вещества остается зона субдукции со стороны Пацифики, создавая субширотный тянущий эффект в литосфере. В результате по крупным сдвигам в сторону Пацифики начали вынужденно перемещаться блоки некогда единой Арктиды. Именно в это время произошла перестройка поля напряжений примерно на 90 градусов



1 – Области с континентальной корой; 2 – Области с океанической корой; 3 – Область магматических проявлений арктического мантийного плюма; 4 – Ось спрединга; 5 – Отмершие зоны спрединга; 6 – Зоны субдукции; 7 – Зоны надвигов; 8 – Крупные зоны сдвигов, трансформных разломов; 9 – Направление сдвигов, там где известно; 10 – Рифты; 11 – Островодужный магматизм; 12 – Палеомагнитные широты; 13 – Реконструируемое положение Исландского плюма; 14 – Направление движения блоков Арктиды относительно Лавразии.

*Буквенные обозначения:*

АЛ – хребет Альфа, ЛМ – хребет Ломоносова, МН – хребет Менделеева, Н – хребет Нортвинд, НО – Новосибирские о-ва, ЦФКА – Центральный фрагмент континента Арктида, ЧП – Чукотское поднятие, ЮА – Южно-Анюйский океан, ЮАС – Южно-Анюйская сутура.

Рис. 5

Палеогеодинамическая реконструкция на 150 млн лет (поздняя юра, киммеридж/титон)

[Miller, Verzhbitsky, 2009] и начался рифтогенез в котловинах Макарова-Подводников и в системе хребтов и котловин Макарова-Подводников-Альфа-Менделеева (центральный фрагмент континента Арктида). Такая геодинамическая ситуация активного рифтогенеза продолжалась вплоть до начала раскрытия Евразийского бассейна и откола от Баренцевоморско-Карского шельфа хребта Ломоносова. В этой ситуации континентальный мост состоящий из блоков Ломоносова-Макарова-Подводников-Альфа-Менделеева оказался окруженным с двух сторон котловинами с океанической корой.

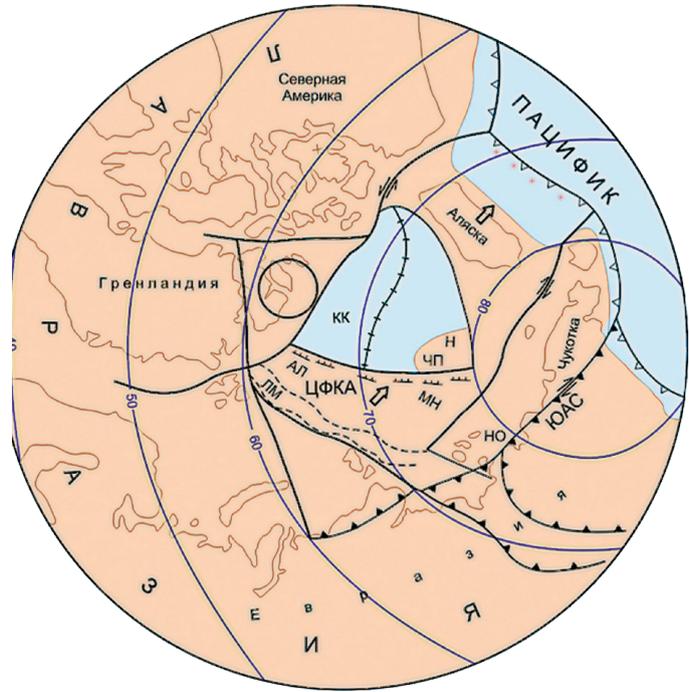


Рис. 6

Палеогеодинамическая реконструкция на 120 млн лет (ранний мел, апт)

### Численное моделирование напряженно-деформированного состояния литосферы арктического региона

**В** настоящее время создан первый вариант карт напряженно-деформированного состояния литосферы арктического региона (микроплиты Чукотка-Арктическая Аляска) на период его позднеюрско-раннемеловой эволюции.

Ниже приведены данные расчета для ситуации на 150 млн лет (поздняя юра, киммеридж/титон), что может приблизительно соответствовать времени начала спре-

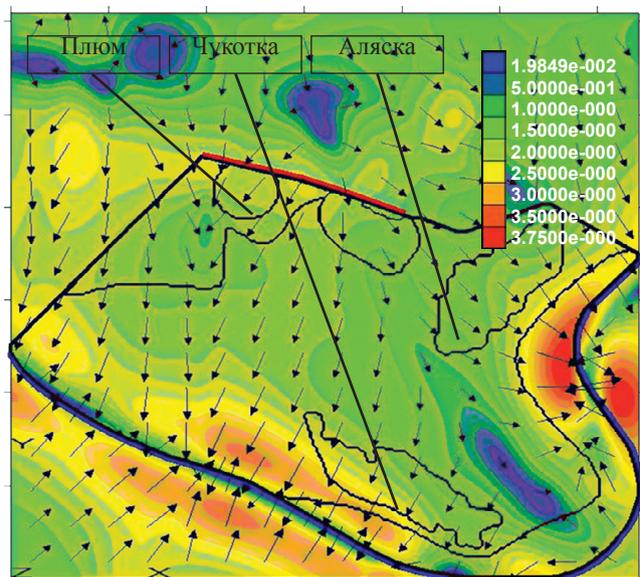


Рис. 7

Распределение скоростей в основании плиты Чукотка-Арктическая Аляска под действием мантийной ячейки. Пояснения в тексте

дингового раскрытия Канадской котловины (см., например, дискуссию в [Alvey et al., 2008]). Геомеханическая модель создана в среде программного кода FLAC3D [Itasca, 2006] и включает в себя основные структурные неоднородности, связанные с блоками Аляски, Чукотки и поднятия Нортвинд. На рисунках 5, 7 также отмечено положение ареала юрско-мелового базальтоидного магматизма, предшествовавшего раскрытию Канадского бассейна [Шпилов, Верниковский, 2010] с указанием идеализированного положения мантийного плюма (отмечен кругом).

Для анализа напряженного состояния плиты рассмотрена модель, представленная на рисунках 7 и 8. Материал литосферной плиты моделируется упругопластической средой с разупрочнением, т.е. предполагается, что деформирование материала после достижения предельного напряженного состояния продолжается при уменьшающемся напряжении в результате уменьшения параметров прочности (прочности на сдвиг и растяжение, а также коэффициента трения) при возрастании деформации до тех пор, пока напряжение не установится на заданном остаточном уровне. Обрамление плиты считается жестким и упругим, так же как и участки литосферы, относящиеся к Аляске и Чукотке. В пределах плюма и зоны его влияния литосфера считается более податливой и менее прочной. В определенной степени это относится и к участкам океанической коры, прилегающим к зонам субдукции.

Характер напряженного состояния и формирование зон разрушения определяется силами, приложенными к подошве литосферы в результате действия мантийной конвекции. При этом области нисходящего

потока конвекции, очевидно, маркируются зонами субдукции в Южно-Анжойском океане и примыкающей области Тихоокеанского. В численной модели верхнемантийной конвекции для полярного региона зоны стока задавались в соответствии с указанными зонами субдукции. Полученная картина поля скоростей мантийных течений приведена на рис. 7, где показаны стрелками скорости течения на подошве литосферы арктического региона, а цветом – распределение модуля вектора скорости.

Данное поле скоростей на подошве плиты пересчитывалось в соответствующее поле напряжений, которое далее использовалось для моделирования напряжений внутри литосферы.

Выполненные расчеты показали (рис. 8), что в плите формируются зоны разрушения, связанные с превышением предела прочности на растяжение (показаны бежевым цветом) и с превышением предела прочности на сдвиг (отмечены серым цветом). Такое распределение зон разрушения можно связать с геологическими представлениями об отрыве части кратона Арктида от Североамериканской литосферы по границе в окрестности плюма, а также о возникновении широкой «бежевой» зоны разрушения литосферы между Аляской и Чукоткой, которую естественно трактовать как зону будущего рассеянного спрединга формирующейся Канадской котловины. Большой интерес представляет серая сдвиго-надвиговая зона в левой части картины, которую можно связать с зарождением хребта Альфа-Менделеева в литосфере Арктиды. Таким образом, впервые полученная картина распределенных внутриплитных напряжений и деформаций в рассматриваемом регионе на время поздней юры показывает основные струк-

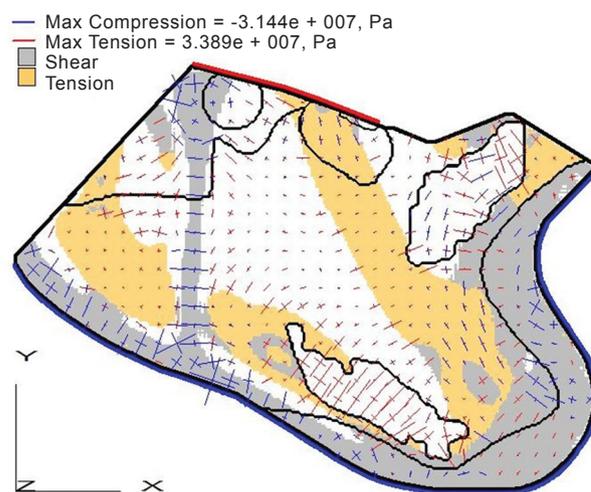


Рис. 8

Распределение зон пластического течения и главных напряжений в плите Чукотка-Арктическая Аляска. Пояснения в тексте

турно-эволюционные процессы, во многом предопределившие современный тектонический облик Арктики. Данные результаты представляют собой принципиально новую научную основу для обоснования ВГКШ России в Арктике.

### Выводы

- Разработан новый подход к количественному анализу эволюции арктического региона. Он объединяет классическую плитотектоническую парадигму и геомеханический метод расчета распределенных (внутриплитных) напряжений и деформаций литосферы. Кинематика жестких плит хорошо работает для описания движения крупных литосферных плит с океанической корой, но сталкивается с большими трудностями в случае малых плит и, особенно, плит континентальной природы. Примером этому служит арктический регион, окруженный огромными континентальными массивами. Так кинематические реконструкции Арктики демонстрируют наличие больших перекрытий и «зияний» [Alvey et al., 2008]. Например, присутствие таких больших «излишков» площадей в Канадской котловине требует введения зон субдукции литосферы под хребты Альфа-Менделеева [Зоненшайн, Натанов, 1987; Scotese et al., 2001], что противоречит наблюдаемым на этих хребтах сбросовым уступам и т.д. В действительности, движение малых плит и континентальных блоков должно описываться упруго-пластическими деформациями литосферы. Это означает, что контуры и границы блоков неизбежно будут видоизменяться во времени.
- Одним из исходных положений новой количественной модели эволюции арктического региона является тезис, что главная движущая сила, приводящая к образованию Амеразийского и Евразийского бассейнов Северного Ледовитого океана, это мощный сток мантийного вещества в сопряженных зонах субдукции литосферы Северо-западной Пацифики и Южно-Аньюского океана. Существование такого общемантийного стока в рассматриваемой области Земли в период времени, начиная по крайней мере с юры, доказываемыми современными данными сейсмической томографии, из которых видно, что самая крупная на Земле аномалия высокоскоростного вещества нижней мантии расположена как раз под областью современного положения северо-восточной части Азиатского континента [Fukao et al., 1994;

Лобковский и др., 2004]. Отсюда следует, что начиная с юры в области континента Арктида, примыкающей к сопряженной зоне субдукции литосферы Пацифики и Аньюского океана имела место крупномасштабная конвективная ячейка, верхняя ветвь которой тянула литосферу Арктиды к этой криволинейной зоне стока, что привело к отколу Чукотско-Аляскинского блока Арктиды от Северо-Американской окраины и раскрытию Канадской котловины.

- Смена полей напряжений в арктическом регионе в раннем мелу, соответствующая прекращению раскрытия Канадской котловины (в конце неокома) и началу активного рифтогенеза в котловинах Макарова-Подводников (в аптское время), определяется перестройкой зон мантийного стока из-за прекращения субдукции в Южно-Аньюском океане и коллизией Чукотки с Евразией и, как следствие, перестройкой на-



Триасовые отложения  
на западном берегу острова Врангеля.  
Фото М.И.Тучковой

правлений мантийных потоков на подошве литосферных плит.

- Разрабатываемая модель проиллюстрирована палеогеодинамическими реконструкциями на 150 и 120 млн лет. Эти временные срезы взяты как наиболее важные рубежные этапы тектонического развития арктического региона. Реконструкции выполнены по отношению к неподвижной Евразии. Северо-Американская и Евразийская плиты составляли единый суперконтинент Лавразию [Зоненшайн, Натанов, 1987] вплоть до среднего мела (около 120 млн лет), когда произошло разделение этих плит [Herron et al., 1974]. До этого времени между плитами происходил длительный период рифтогенеза, который начался еще в позднем карбоне-перми [Mjelde et al., 1998; Faersth, Lien, 2002].

- Выполнены первые серии численных расчетов распределенных напряжений и деформаций литосферы арктического региона, исходя из геодинамической модели взаимодействия литосферы с мантийными течениями с учетом реальной конфигурации палеозон субдукции и областей плюмов для мезо-кайнозойского периода. Полученные результаты в целом объясняют главные закономерности образования и эволюции основных тектонических структур Арктики и могут рассматриваться как фундаментальная основа для интерпретации разнообразных геолого-геофизических данных и дальнейшего уточнения и совершенствования модели эволюции арктического региона.

#### Благодарности.

Настоящие исследования выполняются в рамках Государственного контракта «Построение литотектонических реконструкций и модели напряженного состояния литосферы арктического региона в связи с проблемой расширения внешней границы континентального шельфа РФ» при поддержке Программы №9 ОНЗ РАН, РФФИ (гранты №№ 08-05-00547, 10-05-00550) и Грантом Президента РФ «Ведущие научные школы» (НШ-7091.2010.5)

#### Список литературы

- Богданов Н.А. Тектоника Арктического океана // Геотектоника. 2006. №4. С. 21–42.
- Гуревич Н.И., Меркурьев С.А. Эволюция северной части Американо-Северного бассейна, СЛО, по геофизическим данным // Геология океанов и морей: Тезисы докладов XVII Международной Школы по морской геологии. Т.IV.-М.: 2007. с. 62–64.
- Деменецкая Р.М. Кора и мантия Земли. 2-е изд. М., Недра, 1975.
- Драчев С.С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. 2000. №6, с. 43–58.
- Заманский Ю.Я., Иванова Н.Н., Лангинен А.Е., Сорокин М.Ю. Сейсмические исследования в экспедиции «Арктика-2000» // Геолого-геофизические характеристики литосферы арктического региона – СПб., ВНИИ Океангеология, 2002, Вып. 4., с. 11–24.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990; книга 1–328 с., книга 2–334 с.
- Зоненшайн Л.П., Натанов Л.М. Тектоническая история Арктики // Актуальные проблемы геотектоники. М.: Наука, 1987. С. 31–57.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Гунбина Л.В., Макки К., Фуджита К. Сейсмичность и современные границы плит и блоков северо-восточной Азии // Геотектоника. 2000. №5. С. 44–51.
- Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Иванов В.Н., Петрова В.И. О геотектонической природе системы Центрально-арктических морфоструктур и геологическое значение донных осадков в ее определении // Геотектоника. 2004. №6. С. 33–48.
- Карасик А.М. Аномальное магнитное поле Евразийского суббассейна Северного Ледовитого океана // Докл. АН СССР, 1973, 211, №1.
- Карасик А.М. Евразийский бассейн Северного Ледовитого океана с позиций тектоники плит // В кн.: Проблемы геологии полярных областей Земли. Л., НИИГА, 1974
- Катков С.М., Стрикленд А., Миллер Э.Л., Торо Дж. О возрасте гранитных интрузий Анюйско-Чукотской складчатой системы // Доклады РАН. 2007. Том 414. № 2. С. 219–222.
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаининского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 года: существует ли плита Берингия? // Геодинамика и прогноз землетрясений. Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1994. Вып. 26. С. 103–122.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. - М.: Научный мир, 2004. - 612 с.
- Океанология. Геофизика океанского дна. Под редакцией Ю.П. Непрочнова.- М: Наука, 1979.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. (ред.) Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001, 571 с.
- Поселов В.А., Грамберг И.С., Мурзин Р.Р., Буценко В.В., Каминский В.Д., Сорокин М.Ю., Погребницкий Ю.Е. Структура и границы континентальной и океанической литосферы арктического бассейна // Российская Арктика: геологическая история, минералогия, геоэкология (Главные редакторы Д.А. Додин, В.С. Сурков). СПб, ВНИИОкеангеология. 2002. С. 121–133.
- Пуцаровский Ю.М. Тектоника Северного Ледовитого океана // Геотектоника. 1976. № 2. С. 3–14.
- Ставский А.П. Нижнеиндигирская рифтовая зона – новый элемент структуры Северо-Востока СССР // Доклады АН СССР. 1982. Том 262. № 6. С. 1443–1446.
- Трунилина В.А., Роев С.П., Орлов Ю.С., Оксман В.С. Магматизм различных геодинамических обстановок (зона сочленения Верхоянской окраины Сибирского континента и Колымо-Омолонского микроконтинента). Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. 158 с.
- Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Океаны. Синтез. - М.: Недра, 1985. 292 с.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). - М.: Научный Мир, 2001. 606 с.
- 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. Москва. Наука. 2009. 227 с.
- Шуилов Э.В. К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин Арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника. 2004. №5. С. 26–52.
- Шуилов 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.
- Шрейдер А.А. Линейные магнитные аномалии Северного Ледовитого океана // Океанология. 2004. Т. 44. С. 7668–777.
- Alvey A., Gaina C., Kuszniir N.J., Torsvik T.H. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic // Earth and Planetary Science Letters, 2008, V. 274, p. 310–321.
- Drachev S.S., Savostin L.A., Groshev V.G., Bruni I.E. Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic // Tectonophysics. 1998. V. 298, p. 357–393.
- Faereth R.B., Lien T. Cretaceous evolution in the Norwegian Sea – a period characterized by tectonic quiescence // Marine Petrol. Geol. 2002. V.19. P. 1005–1027.
- Fukao Y., Maruyama S., Obayashi M., Inoue H. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography. Jour. Geol. Soc. Japan, 1994, v. 100, N 1, p. 4–23.
- Gaina C., Roest W.R., Muller R.D. Late Cretaceous-Cenozoic deformation of northeast Asia // Earth Planet Sci Letters. 2002. V.197, p. 273–286.
- 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 // Geological Society of America Bulletin, 1998, 110, 801–820.
- Herron E.M., Dewey J.F., Pitman W.C. Plate tectonic model for the evolution of the Arctic // Geology, 1974, V.2, p. 377–380.
- Itasca Consulting Group, Inc. 2006. FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Ver. 3.1, User's Manual. Minneapolis: Itasca.
- Jokat W. Seismic investigations along the western sector of Alfa Ridge, Central Arctic Ocean // Jeophys. J. Int. 2003. Vol. 152. P. 185–201.
- Jokat W., O'Connor J, Muhe R. Alpha-Mendeleev Ridge: An oceanic Cretaceous large igneous province? // Fifth International Conference on Arctic Margins. Tromso, Norway (3-7 September, 2007). Abstracts and Proceedings. P. 47.
- Lebedeva-Ivanova, N. N., Zamansky, Y. Y., Langinen, A. E., and Sorokin, M. Y. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82° N: Evidence of continental crust, Geophys. J. Int., 165, 527–544, 2006.
- Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V. et al. Seismicity of the Bering Strait region: Evidence for a Bering block // Geology. 1997. V. 64. № 6. P. 467-471.
- Mjelde R., Digranes P., Shimamura H. et al. Crustal structure of the northern part of the Voring Basin, mid-Norway margin, from wide-angle seismic and gravity data // Tectonophysics. 1998. V. 293. P. 175–205.
- 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 // Editor(s): D. B. Stone, K. Fujita, P. W. Layer, E. L. Miller, A. V. Prokopiev, and J. Toro, Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov, EGU Stephan Mueller Publication Series, 2009. V.4. P. 223-241. (www.stephan-mueller-spec-publisher.net/4/223/2009/)
- Miller, E. L., Soloviev, A., Kuzmichev, A., Gehrels, G., Toro, J. and Tuchkova, M. Jura–Cretaceous foreland basin deposits of the Russian Arctic: Separated by birth of Makarov Basin? // Norwegian Journal of Geology, 88, 227–250, 2008.
- Miller, E. L., Toro, J., Gehrels, G., Amato, J. M., Prokopiev, A., Tuchkova, M. I., Akinin, V. V., Dumitru, T. A., Moore, T. E., and Cecile, M. P. New Insights into Arctic paleogeography and tectonics from U-Pb detrital zircon geochronology, Tectonics., 25, TC3013, doi:10.1029/2005TC001830, 2006.
- Rowley D.B. and Lottes A.L. Plate-kinematic reconstructions of the North Atlantic and Arctic: Late Jurassic to Present // Tectonophysics. 1988. V.155, p. 73–120.
- Scotese C.R., Nohleberg W.J., Monger J.W.H. et al. Dynamic Computer Model for the Metallogensis and Tectonics of the Circum-North Pacific // U.S. Geol. Surv. Open-File Report 01-261, Version 1.0. 2001
- Sokolov S.D., Bondarenko G.Ye, Morozov O.L. et al. Souyh Anyui suture, northeast Arctic Russia: Facts and problems // in Miller E.L., Grantz A, and Klempere S.L. (eds), Tectonic evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Ajaent Landmasses: Boulder, Colorado, GSA Special Paper 360. 2002. p.209–224.
- Sokolov, S. D., G. Ye. Bondarenko, P. W. Layer, and I. R. Kravchenko-Berezhnoy. South Anyui suture: tectonostratigraphy, deformations, and principal tectonic events // in D. B. Stone, K. Fujita, P. W. Layer, and E. L. Miller, A. V. Prokopiev, and J. Toro (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.
- Taylor, P.T., L.C. Kovacs, P.R. Vogt and G.L. Johnson. Detailed aeromagnetic investigations of the Arctic Basin // Jour. Geophys. Res., 1981, 86,6323-6333.
- Weber, J. R., and Sweeney. Ridges and basins in the Arctic Ocean // in The Geology of North America, v. L, The Arctic Ocean Region, edited by A. Grantz, L. Johnson and J.F. Sweeney, 1990. pp. 305-336, Geol. Soc. America, Boulder, CO.