

ТЕКТОНИКА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АРКТИКЕ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Л.И. Лобковский

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия

Обсуждаются трудности и противоречия классической концепции тектоники плит. Проанализированы ее исходные положения (постулаты). Показано, что постулат о твердотельном вращении плит на поверхности Земли (так называемая теорема Эйлера), на котором основаны кинематические построения тектоники плит, далеко не всегда применим, в частности, при анализе меловых реконструкций Северной Атлантики и Арктики. Также не выполняется исходное положение о полной механической обособленности литосферных плит, эквивалентное допущению о замкнутости всех их границ. Предлагается обобщение классической теории тектоники плит, в котором последние рассматриваются как деформируемые тела — тектоника деформируемых литосферных плит. Обосновывается новая региональная геодинамическая модель, описывающая меловую и кайнозойскую эволюцию литосферы Арктики и Северо-Восточной Азии. Модель основывается на представлении о существовании горизонтально протяженной конвективной ячейки в верхней мантии, сопряженной с конвейерным механизмом субдукции тихоокеанской литосферы. В рамках предложенной модели находят свое естественное физическое объяснение такие известные тектономагматические процессы, как отступление островных дуг в сторону океана с образованием задуговых бассейнов, возникновение континентальных рифтовых зон и магматических провинций на значительных (более 1000 км) расстояниях от зон субдукции и т.д.

Постулаты тектоники плит, теорема Эйлера, деформируемые плиты, эволюция Арктики и Северо-Восточной Азии в мелу и кайнозое, верхнемантийная конвекция, сопряженная с субдукцией.

DEFORMABLE PLATE TECTONICS AND REGIONAL GEODYNAMIC MODEL OF THE ARCTIC REGION AND NORTHEAST ASIA

L.I. Lobkovsky

The difficulties and contradictions of the classical concept of plate tectonics are discussed. It was shown the postulate of rigid plates and Euler's theorem on the motion of rigid body with one fixed point, which is the basis of the kinematic description of plate tectonics, cannot be universally applied, e.g., to the analysis of Cretaceous reconstructions of the North Atlantic and Arctic. The second postulate of the existence of lithosphere as separate and distinct tectonic plates, which is equivalent to the assumption on the continuity of all plate boundaries, is not satisfied. This study provides a generalization of the theory of classical plate tectonics, in which plates are treated as deformable bodies, the concept of deformable plate tectonics. The study also discusses a new regional geodynamic model for the Cretaceous and Cenozoic evolution of lithosphere beneath Arctic and Northeastern Asia. The model is based on the assumption of a laterally extended convection cell in the upper mantle driven by a conveyor-belt-like process of subduction of the Pacific plate. The proposed model provides a physically sound explanation for the standard tectonomagmatic processes, such as island arc roll-back and opening of back-arc basins, formation of continental rift zones and igneous provinces at great distances (over 1000 km) from subduction zones, etc.

Postulates of plate tectonics, Euler's theorem, deformable plates, Cretaceous and Cenozoic evolution of the Arctic and Northeast Asia, subduction-induced upper mantle convection

ВВЕДЕНИЕ

Исходные положения (постулаты) тектоники литосферных плит

Тектоника литосферных плит как логически целостная концепция оформилась в конце 60-х годов прошлого столетия, когда были сформулированы ее основные исходные положения. Среди них особое значение имел постулат о жесткости литосферных плит, который позволил использовать так называемую теорему Эйлера для расчета кинематики движения плит по поверхности Земли. С тех пор на протяжении более сорока лет многие геологи и геофизики из разных стран широко применяли кинематический аппарат тектоники плит для расчетов как современных горизонтальных движений литосферы,

так и в целях построения кайнозойских и мезозойских реконструкций расположения материков и океанов на поверхности Земли, а также составляющих их блоков океанической и континентальной коры.

Несмотря на полный триумф концепции тектоники плит, которая на протяжении почти полувековой истории своего развития постоянно получала новые подтверждения справедливости основных положений и выводов, она часто подвергалась критике, как правило, малообоснованной и неконструктивной, но тем не менее поднимающей острые вопросы, требующие находить на них удовлетворительные ответы.

Следует заметить, что тектоника плит, как и любая теория, безусловно, имеет свои ограничения и не может объяснить абсолютно все наблюдаемые факты. Более того, существует фундаментальный принцип неполноты любой теории (например, в математике известная теорема Геделя), который критики тектоники плит обычно не учитывают при выдвигании различных новых альтернативных или обобщающих концепций. В качестве примеров таких новых тектонических и геодинамических концепций, появившихся в российской литературе последнего десятилетия, приведем «вихревую тектонику» Е.Г. Мирлина [2006], геодинамику Ю.В. Баркина [2007], обусловленную колебаниями ядра Земли, «галактоцентрическую» геодинамику А.А. Баренбаума [2010], «тектонику мантийных течений» В.Г. Трифонова и С.Ю. Соколова [2015]. Отмеченные здесь альтернативные или обобщающие концепции объединяет одна характерная черта — они не содержат какого-либо критического анализа исходных положений (постулатов) классической тектоники плит, без чего совершенно невозможно понять, какие базовые положения этой теории сегодня ставятся под сомнение и, возможно, нуждаются в модификации, а какие — сохраняют свое значение.

Чтобы разобраться в этих вопросах и определить правильный вектор развития (обобщения) классической теории тектоники плит, необходимо оценить степень адекватности ее исходных положений по отношению к современному уровню знаний в области наук о Земле. Напомним основные принципы классической тектоники плит, наиболее четко сформулированные в книге В.Е. Хаина и М.Г. Ломизе [2005]: 1) поверхностная оболочка Земли в первом приближении состоит из двух слоев, различающихся по реологическим свойствам: верхней жесткой и хрупкой литосферы и подстилающей ее текучей вязкой астеносферы; 2) литосфера представляет собой иерархическую систему, состоящую из ряда крупных (несколько тысяч км в поперечнике), средних (около тысячи км) и мелких (первые сотни км) плит; 3) существуют три типа границ плит: а) дивергентные, на которых происходит раздвижение (спрединг) литосферы с наращиванием океанской коры, б) конвергентные, где имеет место сближение плит за счет поддвига одной из них под другую с последующим погружением литосферы в мантию (субдукция) или коллизия плит, в) трансформные — вдоль них происходит горизонтальное скольжение плит; 4) горизонтальное движение плит описывается как вращение абсолютно твердых тел по сферической поверхности Земли вокруг определенных полюсов вращения (теорема Эйлера) — такая кинематика применима как при анализе современных горизонтальных движений литосферы, так и для реконструкции плит в прошлые геологические эпохи; 5) наращивание океанической коры в зонах спрединга компенсируется ее поглощением в зонах субдукции, что эквивалентно утверждению о постоянстве (в первом приближении) объема и поверхности Земли с течением времени; 6) причиной движения литосферных плит является мантийная конвекция, связанная с тепловыми и химическими неоднородностями недр Земли.

Указанные исходные положения (постулаты) тектоники плит многократно обсуждались и проверялись с помощью различных геолого-геофизических данных и неизменно получали принципиальное подтверждение. Например, результаты глубоководного бурения океанского дна показали справедливость представлений о спрединговой природе образования океанической литосферы, данные сейсмической томографии подтвердили явление субдукции литосферы, данные космической геодезии продемонстрировали принципиальное сходство картины сегодняшних горизонтальных смещений поверхности Земли с кинематическими расчетами движения плит, полученными задолго до наступления эры дистанционного зондирования Земли из космоса и т.д.

Отметим, что некоторые из перечисленных выше исходных положений носят характер «первого приближения», т. е. должны рассматриваться как естественное упрощение или схематизация реальных природных объектов или явлений, позволяющих добиваться адекватного их описания с достаточной степенью точности. Касаясь 1-го исходного положения, заметим, что реальная реологическая стратификация верхней оболочки Земли более сложная, чем выделенные слои литосферы и астеносферы. Например, хорошо известно, что континентальная литосфера сама реологически неоднородна, включая верхнекоровый жесткий и нижнекоровый пластичный слой и т. д. Далее при делении литосферной оболочки на плиты в рамках 2-го постулата возникает целый ряд вопросов, в частности, до каких минимальных линейных масштабов можно выделять плиты и микроплиты. Очевидно, что понятие литосферной плиты предполагает ее минимальный горизонтальный размер, превышающий в несколько раз толщину литосферы. Это условие не всегда выполняется, например, при рассмотрении ансамбля микроплит в коллизионном Альпийско-Гималайском поясе, с чем было связано введение в геодинамический анализ

коровых микроплит в концепции двухъярусной тектоники плит [Лобковский, 1988]. Если обратиться к 3-му исходному положению, то уже достаточно давно выяснилось, что наряду с «чистыми» дивергентными и конвергентными границами плит существуют более сложные дивергентно-сдвиговые и конвергентно-сдвиговые границы плит, называемые зонами транстенсии и транспрессии. Заметим, что 5-й постулат о постоянном радиусе Земли на протяжении ее эволюции можно также рассматривать как первое приближение. Наконец, 6-е положение о конвективном механизме движения плит сегодня представляется самоочевидным, при этом остается открытым вопрос о характере и форме мантийной конвекции.

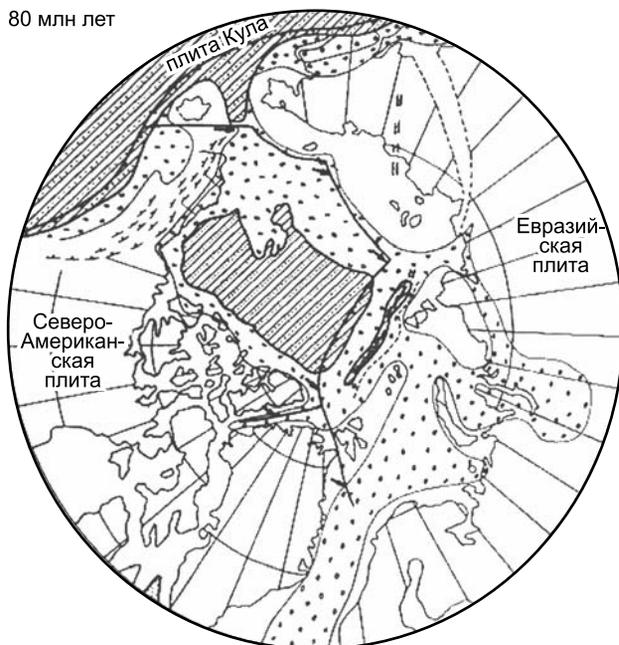
Серьезной проблемой основ тектоники плит является допущение о полноте структурной делимости литосферной оболочки на плиты (2-й постулат), эквивалентное утверждению, что все границы плит замкнуты, т. е. все линии границ доходят до их краев, плавно переходя в области внутриплитных деформаций, иногда называемых диффузными границами. Ярким выражением незамкнутости границ плит может служить явление продвижения (пропагейтинг) рифтовых и спрединговых зон, отражающее процесс постепенного разрушения литосферной оболочки и формирования новых границ плит. Обычно данный постулат о полноте делимости литосферы и замкнутости границ плит не формулируется в явном виде при анализе основ тектоники плит. Однако он по умолчанию подразумевается, поскольку без него теряет смысл описание относительного движения плит с помощью теоремы Эйлера. Этот момент как-то ускользал от внимания исследователей.

Специального анализа заслуживает 4-й постулат о твердотельном движении литосферных плит вокруг полюсов вращения (теорема Эйлера). Принято считать, что этот постулат, по крайней мере, в первом приближении надежно работает, о чем казалось бы свидетельствуют убедительные результаты расчетов глобальной кинематики литосферных плит [DeMets et al., 2010]. При этом в получаемой самоогласованной картине мгновенных скоростей движения литосферных плит выделяются области так называемых внутриплитных деформаций и диффузных границ плит, которые рассматриваются как допустимые отклонения (порядка 10 %) от идеальной картины движения абсолютно жестких (недеформируемых) плит. Следует отметить, что вера в справедливость теоремы Эйлера среди сторонников тектоники плит никогда не подвергалась сомнению, что в психологическом плане естественно объясняется чрезвычайно эффективным и простым аппаратом кинематического описания движения литосферных плит, не требующим какого-либо знания о характере конвекции в мантии. Это видно из современных руководств по тектонике и геодинамике, где подробно анализируются обобщения и усложнения всех исходных положений классической тектоники плит, за исключением теоремы Эйлера, которая всегда оставалась неприкасаемым постулатом данной парадигмы [Хаин, Ломизе, 2005; Добрецов, 2011].

ТРУДНОСТИ И ПРОТИВОРЕЧИЯ ТЕКТОНИКИ ПЛИТ В КОНТЕКСТЕ АНАЛИЗА СОВМЕСТНОЙ ЭВОЛЮЦИИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ И АРКТИКИ

В недавней серии работ Л.И. Лобковского с соавторами [Лобковский и др., 2010, 2011; Лобковский, 2013] были выявлены серьезные трудности и противоречия, возникающие при применении эйлеровой кинематики плит для описания меловых реконструкций Арктического региона, увязанных с раскрытием Северной Атлантики. Напомним кратко суть этих противоречий. Согласно традиционному плитотектоническому подходу, эволюция литосферы Арктики в мезозое и кайнозое должна определяться взаимодействием Евразийской и Северо-Американской литосферных плит. Расчеты движения этих плит с использованием теоремы Эйлера показали, что при раскрытии Северной Атлантики в меловой период в Арктике должна была иметь место значительная конвергенция плит на величину порядка 1000 км [Pitman, Talwani, 1972; Herron et al., 1974; Зоненшайн, Натапов, 1987], при этом полюс относительного вращения Северо-Американской и Евразийской плит в период от 110 до 55 млн лет находился в районе о. Элсмир вблизи северной оконечности Гренландии. Таким образом, в течение позднего мела—палеоцена в Арктике должны были существовать геотектонические структуры, порожденные конвергенцией Северной Америки и Евразии. К ним, в частности, естественно отнести складчатый фронт, протягивающийся от хр. Брукса до о. Геральда и о. Врангеля. В Амеразийском бассейне Северного Ледовитого океана основными структурами, отражающими условия конвергенции плит, по мнению авторов плитотектонических реконструкций [Herron et al., 1974; Зоненшайн, Натапов, 1987; Scotese, 2011; Golonka, 2011], являются подводные поднятия Альфа и Менделеева, трактуемые как геоморфологические проявления позднемеловой вулканической дуги, к которой была приурочена зона субдукции, где происходило поглощение значительной области океанической коры Канадского бассейна (с линейным размером около 1000 км). В свою очередь, субдукция литосферы Канадского бассейна под вулканическую дугу Альфа—Менделеева в условиях миграции дуги в сторону Канадской котловины (в соответствии с известным явлением «roll back» отступления зоны субдукции в сторону движущейся к ней литосферы) могла привести к образованию задуговых бассейнов Макарова и Подводников (рис. 1).

80 млн лет



65 млн лет

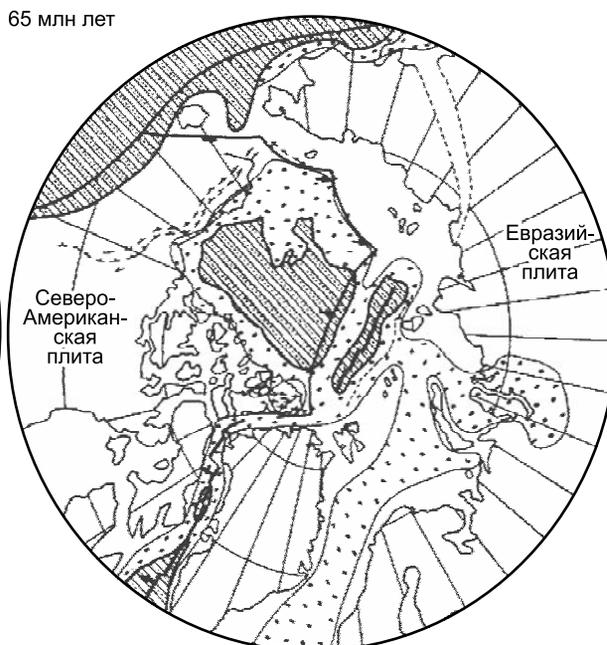


Рис. 1. Плитотектонические реконструкции Арктического региона [Зоненшайн, Натапов, 1987].

Представленная плитотектоническая реконструкция Арктики в эпоху позднего мела—палеоцена до сих пор рассматривается в работах ряда известных авторов [Scotese, 2011; Golonka, 2011] как вполне реалистичная картина ее эволюции, несмотря на имеющиеся сегодня многочисленные фактические данные, противоречащие основным ее выводам. Прежде всего, это касается вывода о субдукционной природе поднятий Альфа и Менделеева. Дело в том, что данные по магматизму поднятия Альфа не подтверждают известково-щелочной состав магматических пород, свойственный островным дугам субдукционной природы [Jokat et al., 2013; Добрецов и др., 2013; Shokalsky et al., 2014; Верниковский и др., 2014]. Отсутствуют также какие-либо следы поглощения океанской коры у подножий хребтов Альфа и Менделеева в структуре осадочной толщи [Hutchinson et al., 2011]. В целом геолого-геофизические данные, полученные в последние годы в ходе морских и сухопутных исследований Арктического региона, включая шельф, острова, глубоководные участки Северного Ледовитого океана, а также примыкающие области суши, свидетельствуют о том, что вся литосфера Арктики в меловой период испытывала региональное субширотное растяжение рифтогенного типа [Miller, Verzhbitsky, 2009; Казмин и др., 2014] (рис. 2) и, следовательно, не могла в то же самое время значительно сокращать свою площадь, как этого требует кинематика плитотектонического анализа.

Получается, что вращение Северо-Американской плиты относительно Евразийской, удовлетворительно описывающее раскрытие Атлантики в позднем мелу, не распространяется на Арктический регион, где участки этих плит испытывали смещения, противоположные тем, которые должны были возникнуть, исходя из применения теоремы Эйлера. Неприменимость теоремы Эйлера в данном случае означает, что либо плиты нельзя рассматривать (даже в первом приближении) как твердые недеформируемые тела, либо принятое разбиение литосферы на Северо-Американскую и Евразийскую плиты в регионе, включающем Северную Атлантику и Арктику, не отражает геодинамическую реальность.

В действительности оба необходимых условия для применимости теоремы Эйлера (недеформируемость плит и их полная механическая обособленность, т. е. наличие замыкающих границ между ними) в рассматриваемом случае меловой эволюции Северной Атлантики и Арктики не выполняются. Это утверждение становится абсолютно понятным, если принять во внимание, что раскрытие Атлантического океана в позднем мезозое и кайнозое проходило в условиях продвигающейся на север рифтовой зоны, переходящей в спрединговую границу плит, как это показано в известных реконструкциях распада позднемеловой Пангеи [Scotese, Golonka, 1993] (рис. 3). Действительно, при продвижении рифтовой, а затем и спрединговой границы на север и постепенном раскрытии Атлантического океана Северо-Американская и Евразийская плиты не могут считаться полностью обособленными, так как представляют единый континентальный массив в области, куда еще не дошел фронт продвигающегося рифта (см. рис. 3). Следовательно, описание меловой эволюции Арктики на основе классической эйле-

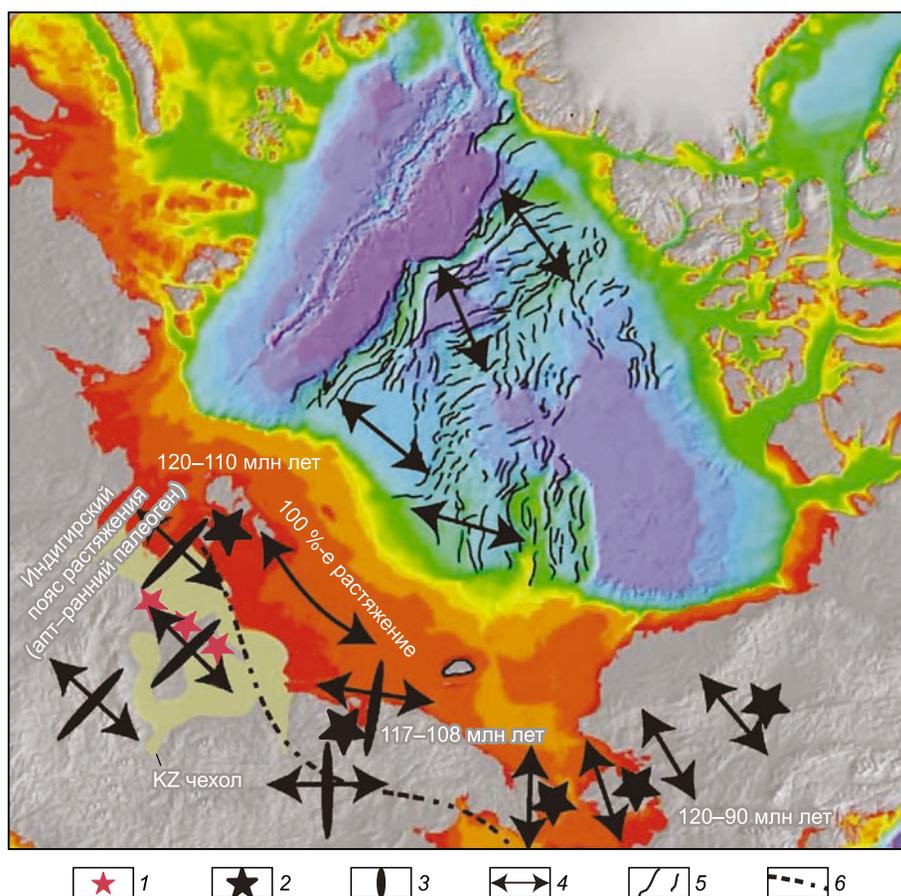


Рис. 2. Модель раскрытия бассейна Макарова в апт-альбское время, основанная на результатах геохронологических и структурных исследований, по [Miller, Verzhbitsky, 2009] с дополнениями по [Тектоника..., 2001].

1 — Северный батолитовый пояс; 2 — области постколлизиионной магматической активности, цифры соответствуют ее датировкам; 3 — усредненное простирание даек и других структур растяжения; 4 — направление постколлизиионного растяжения; 5 — предполагаемые сбросы в пределах хребтов Ломоносова, Альфа, Менделеева и Чукотского бордерленда; 6 — положение Южно-Аннуйской сутуры.

ровой кинематики плит является неправомерным. Этим и объясняется полное несоответствие результатов плитотектонических расчетов и геолого-геофизических данных, о чем речь шла выше.

Неправомерность описания эволюции Арктики на основе эйлеровой кинематики относительного вращения Северо-Американской и Евразийской плит относится не только к меловому и кайнозойскому этапам, но и к современности. Это связано с тем обстоятельством, что современная картина делимости литосферы в зоне сочленения Евразии и Северной Америки в полярной области не позволяет замкнуть границы между плитами. Например, до сих пор остается невыясненным вопрос: каким образом Арктическая ветвь границы Северо-Американской плиты, представленная хр. Гаккеля в Северном Ледовитом океане, соединяется с Тихоокеанской ветвью границы, представленной Алеутской зоной субдукции? На самом деле здесь мы наблюдаем постепенный переход спрединговой границы хр. Гаккеля через рифтовую систему моря Лаптевых в область внутриплитных деформаций северо-восточной части евразийской литосферы, которую часто трактуют как диффузную границу плит (рис. 4). В пределах этой диффузной зоны существуют различные варианты проведения линейных траекторий границы, которые предлагались разными авторами [Грачев, 1973; Зоненшайн и др., 1990; Грамберг и др., 1990]. По одному варианту рифтовая зона моря Лаптевых соединяется с грабеном устья р. Лена и далее продолжается под Верхоянским хребтом. По другому — эта граница проходит восточнее, через устье р. Индигирка, а затем продолжается через Момский рифт, подходя к зал. Шелехова в Охотском море. Обсуждались и другие возможные трассы границы плит, соединяющие хр. Гаккеля с шельфом Охотского моря и Камчаткой. В любом случае для замыкания границы между Северо-Американской и Евразийской плитами ее необходимо протягивать на восток и соединять с Командорским сдвигом и Алеутской зоной субдук-

ции. Однако здесь возникают трудности обоснования проводимой границы существующими геолого-геофизическими данными. Например, не установлено пересечение Охотско-Чукотского вулканического пояса кайнозойскими разломами северо-западного простирания, чего следовало бы ожидать как проявление границы плит. То же относится к Центрально-Камчатской рифтовой зоне и миоценовому вулканическому поясу Срединно-Камчатского хребта: в пределах этих зон также отсутствуют следы кайнозойских структур, секущих их под прямым углом, что можно было бы связать с межплитной границей, пересекающей Камчатку в поперечном направлении. Надо сказать, что предлагались и совершенно иные трассы проведения границы раздела между плитами: например, вариант северной трассы границы, идущей вдоль цепочки кайнозойских рифтов, расположенных в шельфовых областях Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей [Богданов и др., 1995], или противоположный вариант южной трассы, когда граница между плитами протягивается на юг вдоль меридиональных разломов о. Сахалин с продолжением до места сочленения Японского и Идзу-Бонинского желобов Тихого океана.

Большое разнообразие виртуальных вариантов проведения линейной границы между Северо-Американской и Евразийской литосферными плитами в области сочленения Арктики и Северо-Восточной Азии может свидетельствовать только об одном: о несправедливости постулата тектоники плит, касающегося полноты механической делимости литосферы на плиты. Другими словами, Евразийская и Северо-Американская плиты не являются полностью обособленными друг от друга. Они отделены одна от другой лишь частично (по дивергентной границе в Северной Атлантике и Евразийском бассейне Арктики) и представляют собой единый еще не разрушенный массив литосферы на значительной территории северо-востока Азии.

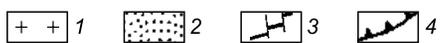
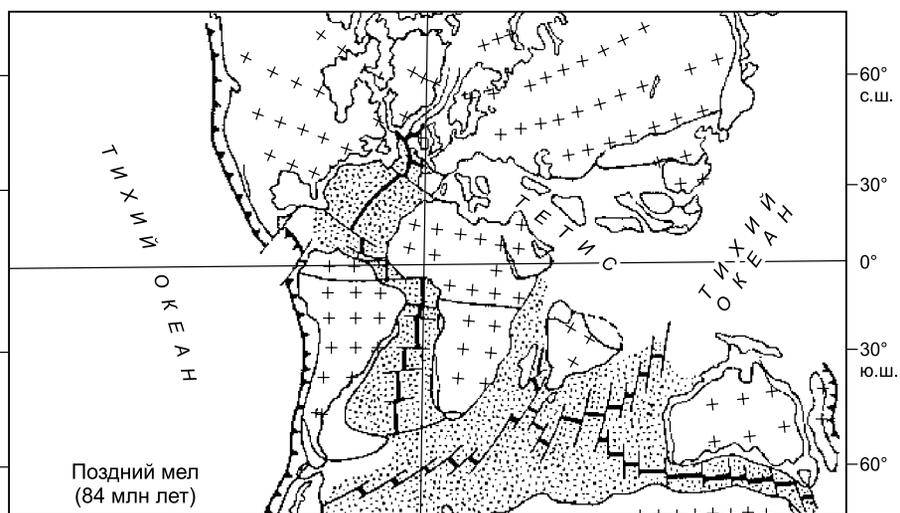
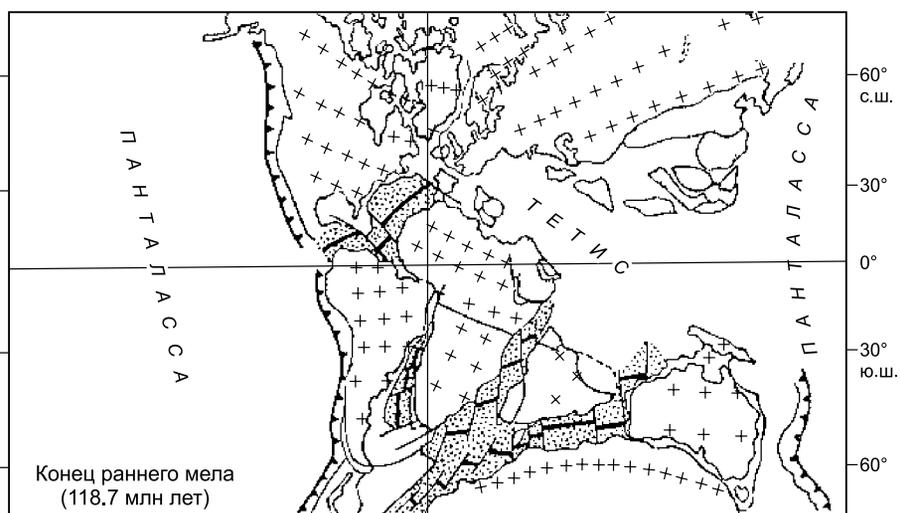
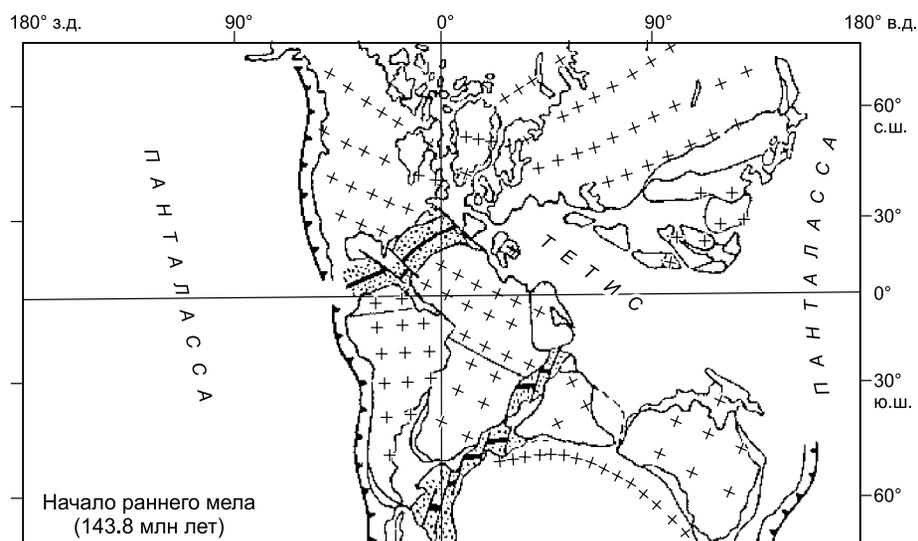
КОНЦЕПЦИЯ ТЕКТОНИКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Описанные трудности и противоречия традиционной тектоники плит не могут быть преодолены в рамках данной парадигмы, поскольку речь здесь идет о неадекватности некоторых ее исходных положений, а именно о полной делимости литосферы на отдельные плиты и о недеформируемости (в первом приближении) литосферных плит и применимости теоремы Эйлера для описания их горизонтальных движений. Исходя из этих соображений, в работах [Лобковский и др., 2010, 2011; Лобковский, 2013] была сформулирована обобщающая тектонику плит концепция, получившая название тектоники деформируемых литосферных плит. В ней подчеркивается полная преемственность предлагаемой новой концепции по отношению к классической парадигме тектоники плит. В то же время содержится указание на очевидный путь расширения этой парадигмы, выраженный ключевым словом «деформируемых».

Суть предложенной новой концепции состоит в том, что вместо методологии кинематического описания вращения абсолютно твердых плит на сфере с использованием эйлеровых полюсов вращения вводится количественный анализ распределенных упругопластических деформаций литосферы, совмещенный с математическим описанием вязких подлитосферных мантийных течений. Естественно, что переход от классической парадигмы к тектонике деформируемых литосферных плит существенно усложняет количественное описание движения литосферы. Заметим, что здесь нет нужды специально выделять тектонику мантийных течений в качестве самостоятельной обобщающей тектонической концепции, как это предлагается в работе [Трифонов, Соколов, 2015], поскольку эти течения являются элементом мантийной конвекции, количественное описание которой с учетом данных сейсмической томографии совершенно необходимо, так как задает граничные условия на подошве деформируемых плит.

Предлагаемая концепция тектоники деформируемых литосферных плит позволяет по-новому взглянуть на некоторые устоявшиеся представления о соотношении тектонических процессов, развивающихся на границах и во внутренних частях плит. В классической тектонике плит их принято противопоставлять друг другу, считая, что деформации на границах плит на порядок и более превышают внутриплитные деформации. Однако фактические данные свидетельствуют, что такое соотношение далеко не всегда и не везде выполняется. Например, скорость раздвига Восточно-Африканской рифтовой системы, откалывающей Сомалийскую плиту от Африканской литосферной плиты, составляет порядка 1 см/год, что сопоставимо со скоростями спрединга в Красном море и в хр. Гаккеля Евразийского бассейна, т. е. интенсивность внутриплитных и межплитных деформаций сопоставима для континентальных областей (рис. 5).

Можно предложить следующую классификацию современных плит по трем категориям в соответствии со степенью их обособленности, подвижности и стесненности. К первой категории отнесем наиболее обособленные и подвижные чисто океанические плиты (Тихоокеанская, Наска, Кокос), имеющие по всему периметру четко выраженные границы, вдоль которых эти плиты легко могут наращиваться, субдуцироваться или горизонтально скользить (см. рис. 5).



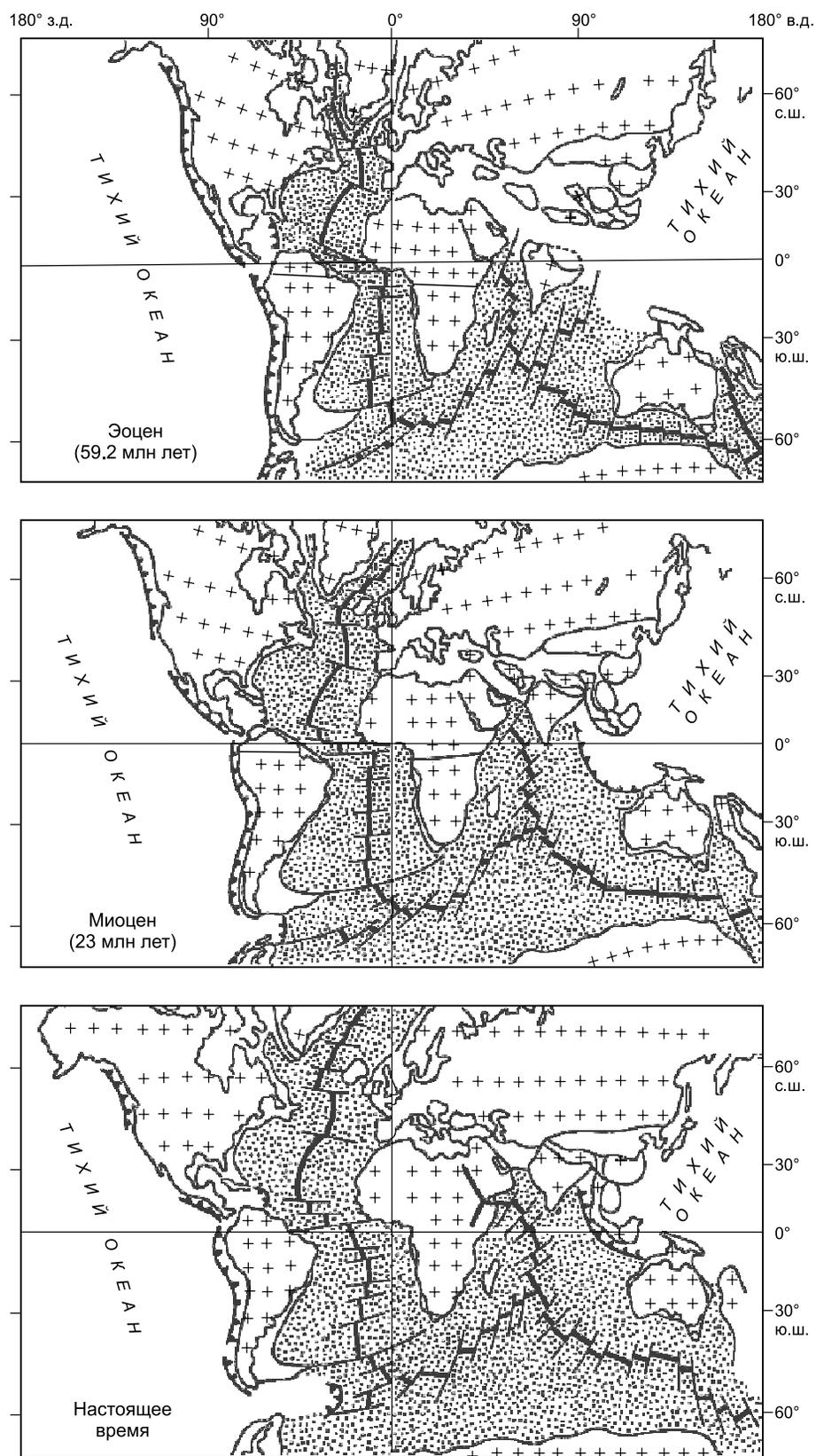


Рис. 3. Последовательный распад позднепалеозойской Пангеи, по [Scotese, Golonka, 1993] с изменениями.

1 — континентальная литосфера Пангеи, обозначено положение современной градусной сетки; 2 — океанская литосфера, новообразованная при распаде Пангеи; 3 — активные зоны спрединга; 4 — зоны субдукции.

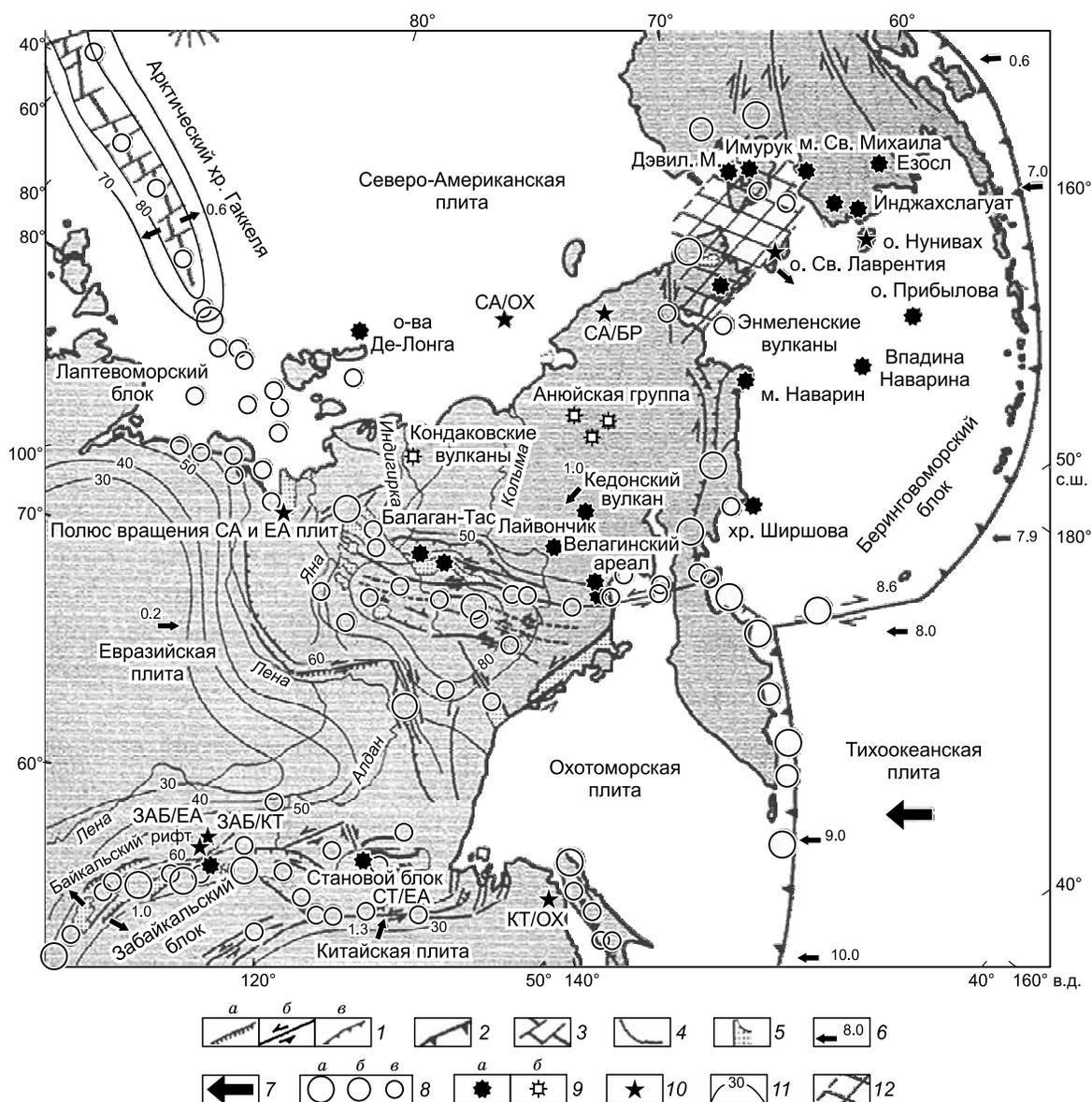


Рис. 4. Схема современной геодинамики северо-востока Азии и Аляски [Коваленко и др., 2010].

1 — активные разломы: сбросы (а), сдвиги (б), надвиги (в); 2 — границы литосферных плит; 3 — осевая зона спредингового хр. Гаккеля; 4 — пассивные разломы; 5 — кайнозойские впадины; 6 — направление и скорость движения отдельных блоков (см/год); 7 — направление движения литосферной плиты; 8 — землетрясения с магнитудой более 7.0 (а), 6.0—6.9 (б), до 6.0 (в); 9 — проявления кайнозойского вулканизма: основные и ультраосновные лавы преимущественно щелочного ряда (а), основные лавы субщелочного ряда (б); 10 — полюсы вращения плит и блоков: БР — Берингоморской блок, ЗАБ — Забайкальский блок, СТ — Становой блок, КТ — Китайская плита, ЕА — Евразийская плита, ОХ — Охотоморская плита, СА — Северо-Американская плита; 11 — тепловой поток (мВт/м²); 12 — рифт Берингова моря.

Ко второй категории будем относить смешанные континентально-океанические плиты, включающие океанические и континентальные области коры. Плиты этой категории, как правило, являются лишь частично обособленными, так как разделены границами не по всему периметру и имеют общие консолидированные области. Примером являются упомянутые выше Северо-Американская и Евразийская плиты с общей консолидированной областью между хр. Гаккеля и Алеутской зоной субдукции. Другой пример — отсутствие границы и, следовательно, общая консолидированная область Евразийской и Африканской плит в Атлантике в районе Азорского архипелага и Гибралтара. Не проявлена граница между Северо-Американской и Южно-Американской плитами к северу от Антильской дуги (см. рис. 5). Невозможно провести границу между Евразийской и Индо-Австралийской плитами, поскольку вся область Передней и Центральной Азии охвачена диффузной сейсмичностью. Во всех перечислен-

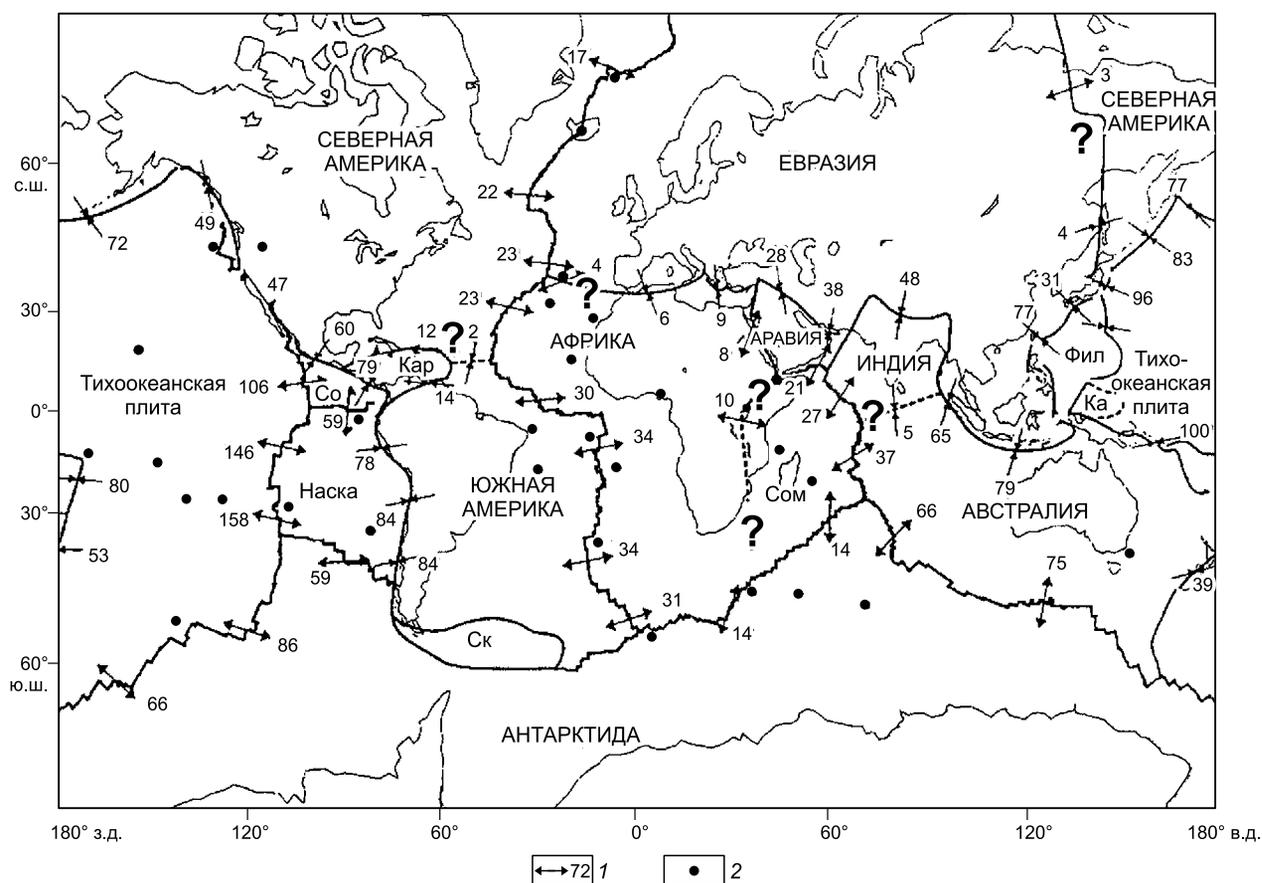


Рис. 5. Современные литосферные плиты и их кинематика [Lallemand, 1995].

1 — скорости смещения плит (мм/год), 2 — горячие точки. Малые плиты: Со — Кокосовая, Кар — Карибская, Ка — Каролинская, Ск — Скотия, Сом — Сомалийская, Фил — Филиппинская.

ных случаях отсутствие четко выраженных узких границ между континентально-океаническими плитами второй категории означает, что они не являются полностью обособленными друг от друга и имеют достаточно протяженные общие консолидированные области.

К третьей категории плит относятся чисто континентальные крупные, средние и малые плиты. Самой крупной является Евразийская мегаплита, средней — Аравийская. К малым плитам третьей категории относятся мезо- и микроплиты Альпийско-Гималайского коллизионного пояса, такие как Иранская, Лутская, Афганская, Синайская, Пиренейская, Альпийская, Карпато-Паннонская, Мизийская, Южно-Каспийская, Греческая и другие микролиты. Причем большая часть этих микролитов в структурном отношении, по всей видимости, является коровыми образованиями, способными совершать горизонтальные перемещения по нижнекоровому пластичному астенослою [Лобковский, 1988]. К этой же третьей категории малых плит относятся Китайская, Амурская, Охотоморская и другие плиты востока и северо-востока Евразии, расположенные в смежной области между крупнейшими Тихоокеанской и Евразийской мегаплитами.

Предложенная классификация относится к кайнозойскому периоду. Ясно, что конфигурация плит, их обособленность, стесненность будут иными для мезозоя и других этапов эволюции Земли.

МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ (ДЛЯ АРКТИКИ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ), ОСНОВАННАЯ НА ВЕРХНЕМАНТИЙНОЙ КОНВЕКЦИИ, СОПРЯЖЕННОЙ С СУБДУКЦИЕЙ ТИХООКЕАНСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ

Развиваемый подход к анализу тектонических и геодинамических процессов на основе концепции тектоники деформируемых литосферных плит, как уже отмечалось выше, означает переход к совместному количественному описанию глубинных (мантийных) и поверхностных (литосферно-коровых) процессов. Заметим, что в течение длительного периода (с конца 60-х годов прошлого столетия до на-

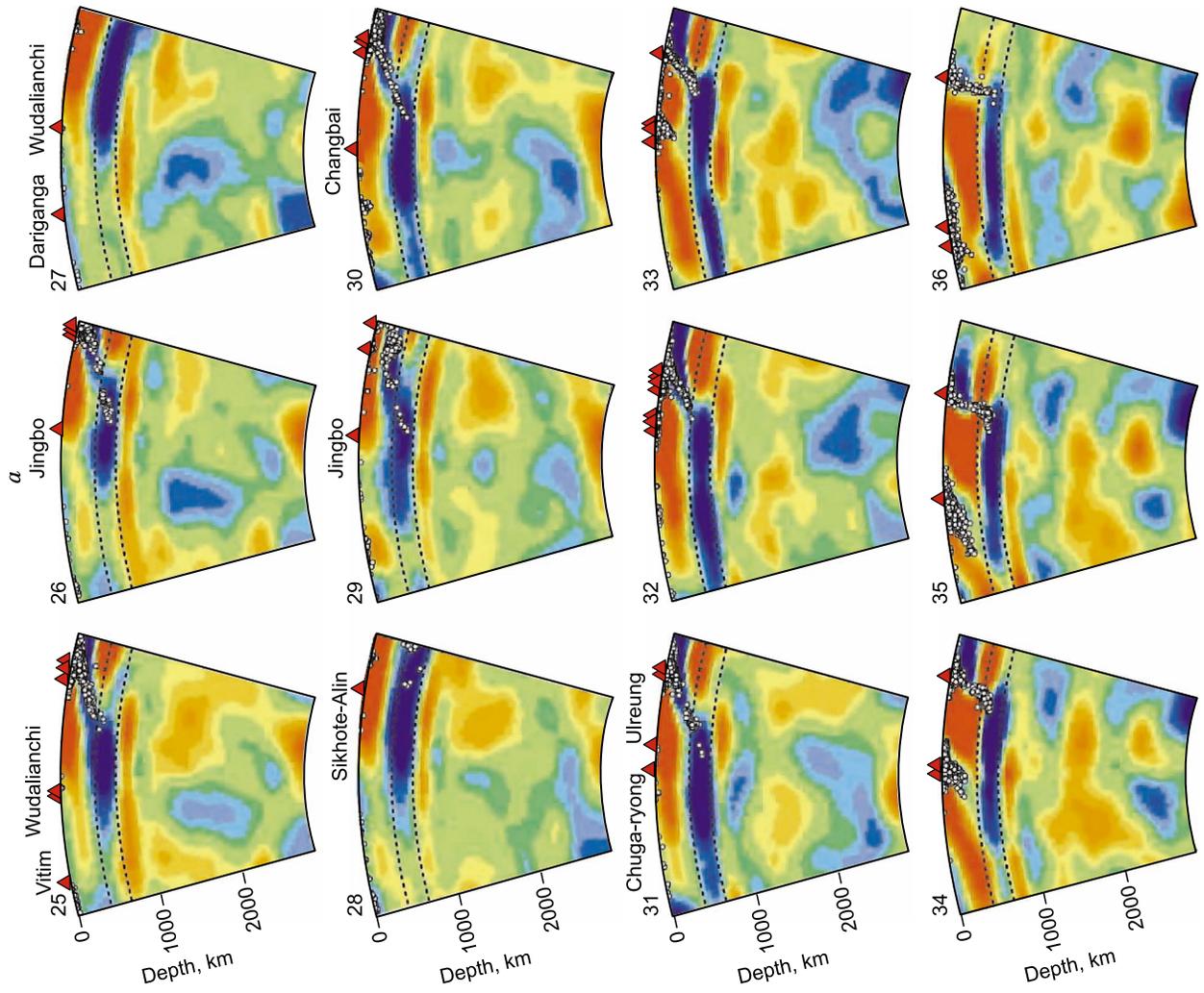
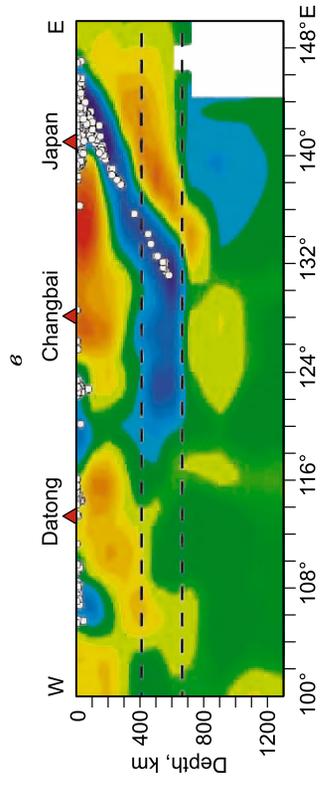
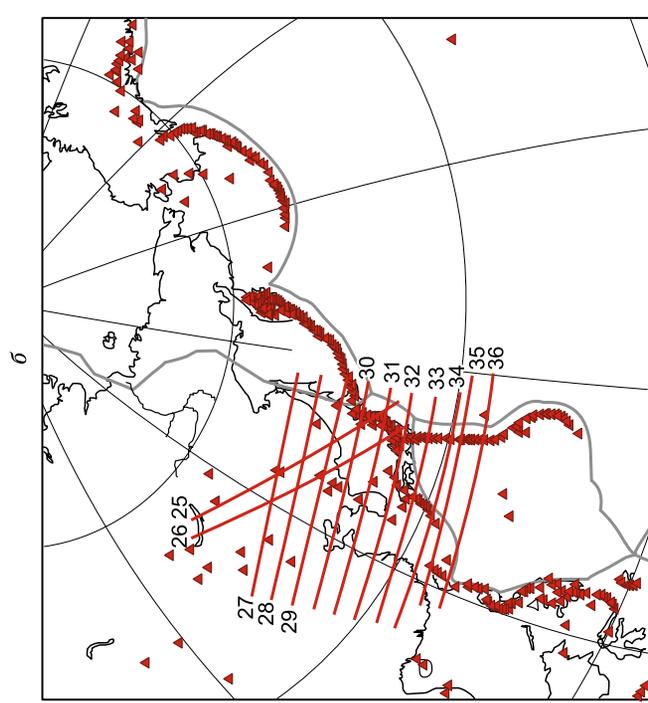


Рис. 6. Вертикальные разрезы мантии в виде сейсмотомограмм в продольных волнах вдоль профилей (а), показанных на карте-врезке (б), вертикальный разрез мантии под Восточной Азией в направлении восток—запад в виде регионального томографического изображения в продольных волнах (в), по [Жао Дапенг и др., 2010] с изменениями.

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

чала нынешнего века) математическое моделирование глубинных процессов (мантийная конвекция, гидродинамика плюмов) в основном развивалось независимо от математического моделирования поверхностных процессов (тектоника плит, коровые процессы) при очевидной ущербности и неполноте такого подхода. Причины такого неадекватного описания природных процессов главным образом были обусловлены следующими тремя обстоятельствами: 1) отсутствием универсальной модели геосреды, позволяющей одновременно описывать глубинные мантийные течения с вязкой реологией и поверхностные деформации и разрушение литосферы с нелинейной упругопластической реологией; 2) неполнотой наших знаний о глубинном строении Земли и реальном движении составляющих ее частей; 3) недостаточным уровнем развития компьютерных технологий и численных методов моделирования сложных трехмерных движений и деформаций геосреды.

Ситуация существенно изменилась в последнее время благодаря большому прогрессу, достигнутому в изучении внутреннего строения Земли с помощью методов сейсмической томографии. Сегодня для целого ряда крупных регионов Земли построены высокоразрешающие сейсмотомографические картины внутреннего строения недр, позволяющие «увидеть» структуру мантийной конвекции, что является совершенно необходимым для правильной постановки задачи моделирования региональных геодинамических процессов.

Наиболее впечатляющие результаты по сейсмотомографическому просвечиванию мантии недавно были опубликованы в серии работ японских геофизиков [Zhao, 2009; Zhao et al., 2009; Жао Дапенг и др., 2010] для Северо-Восточной и Восточной Азии с прилегающими окраинными морями северо-западной части Тихого океана. Из полученных разрезов мантии видно, как погружающееся в зону субдукции холодное вещество, достигая переходной зоны между верхней и нижней мантией, меняет направление своего движения и далее трансформируется в протяженный горизонтальный слой холодного мантийного вещества, который распространяется далеко (на первые тысячи километров) под Евразийский континент (рис. 6).

С точки зрения гидродинамики такая картина достаточно ясно указывает на развитие ячейки верхнемантийной конвекции, нижняя горизонтальная ветвь которой течет под континент вдоль переходной зоны между нижней и верхней мантией, а верхняя ветвь формирует возвратный поток вещества под литосферой в сторону Тихоокеанской зоны субдукции, приводя к растяжению континентальной литосферы, рифтогенезу и связанному с ним магматизму (рис. 7). Данная «динамическая» трактовка томографической картины мантии физически вполне обоснована в отличие от «статической» интерпретации этой картины, исходящей из представления о «стагнирующей» литосферной плите, застрявшей в переходной мантийной зоне [Zhao et al., 2009; Жао Дапенг и др., 2010].

Полученные результаты дают основание сформулировать следующую модель мантийной конвекции, сопряженной с зоной субдукции. Она представляет собой вытянутую в горизонтальном направлении конвективную ячейку, расположенную в верхней мантии под континентальной литосферой Северо-Восточной и Восточной Азии, которая является частью глобальной системы конвекции, причем в рассматриваемом регионе, как это видно из разрезов сейсмотомографии, циркуляция вещества в ячейке обусловлена непрерывным конвейерным погружением тихоокеанской литосферы в зоны субдукции (см. рис. 7). 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 заставляет погружающиеся массы растекаться вдоль этой границы. Движение самой тихоокеанской литосферы отражает устойчивый процесс развития общемантийной конвекции в тихоокеанском сегменте Земли. Последняя 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 (см. рис. 7).

Рассматриваемая верхнемантийная конвекция является существенно нестационарной, поскольку в континентальную область ячейки поступает все время новый материал, расширяя эту область как за счет продвижения фронта ячейки в

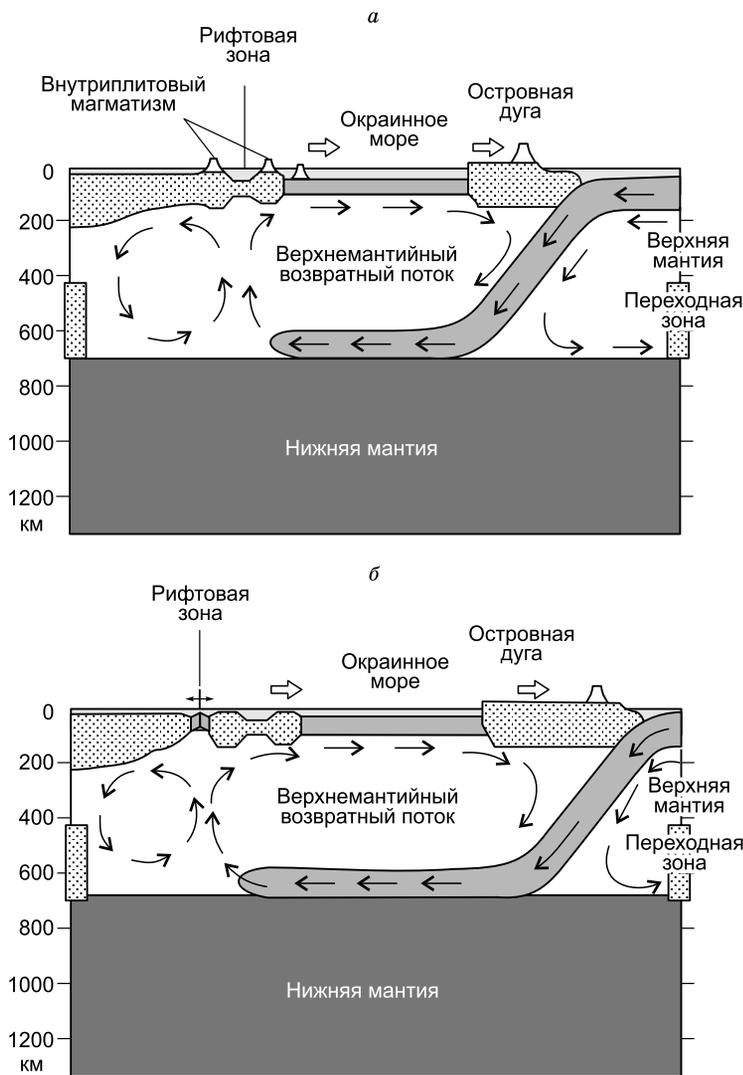


Рис. 7. Модель верхнемантийной конвекции под восточной частью Евразийского континента, вызванной процессом субдукции тихоокеанской литосферы [Лобковский, 2013].

a — первая стадия: формирование конвективной ячейки; *b* — вторая стадия: расширение конвективной ячейки в глубь континента с миграцией островной дуги в сторону океана.

глубь материка, так и благодаря горизонтальному расширению ячейки в направлении Тихого океана, приводящему к широко распространённому явлению отодвигания зон субдукции вместе с островными дугами от края материка и образованию в их тылу окраинных бассейнов (см. рис. 7).

Таким образом, мы приходим к физически ясному механизму «отступления» зон субдукции и образования окраинных бассейнов за счет непрерывного нагнетания субдуцируемого вещества в верхнемантийную ячейку, повышения в ней динамического давления, приводящего к отодвиганию наклонных плит в сторону океана. Обратный процесс приближения зон субдукции к краю континента и закрытия окраинных бассейнов может возникать в следующих случаях: 1) при падении динамического давления в верхнемантийной ячейке под континентом, связанным с прорывом вещества верхней

мантии в нижнюю; 2) в случае прекращения нагнетания субдукционного вещества в континентальную ячейку при вертикальном погружении литосферы в зоне субдукции; 3) в результате горизонтального оттока верхнемантийного материала из ячейки в направлении, субпараллельном простиранию островной дуги.

На основе предложенной модели нестационарной горизонтально расширяющейся верхнемантийной ячейки, примыкающей к зоне субдукции (или коллизии) литосферных плит, естественным образом объясняется целый комплекс тектонических проблем, связанных с явлением растяжения областей континентальной литосферы, расположенных достаточно далеко за фронтом субдукции или коллизии плит. В частности, возникновение рифтовых зон на востоке и юго-востоке Северной Азии, включая Байкальскую рифтовую зону и рифты Китая, хорошо объясняется развитием расширяющейся верхнемантийной ячейки под Евразийским континентом за счет нагнетания под него субдукционного вещества Тихоокеанской плиты. Возвратный подлитосферный поток вызывает растяжение и рифтогенез литосферы, сопровождаемый внутриплитным магматизмом (см. рис. 7).

Остановимся несколько подробнее на проблеме происхождения внутриплитного магматизма, тесно связанной с современной концепцией мантийных плюмов. Последняя, как принято считать, является необходимым дополнением к теории тектоники плит, позволяющим рассматривать геодинамику Земли в целом. Следует отметить, что тектоника плюмов, представлявшая необычайно популярное в 80-х и 90-х годах прошлого столетия направление в геодинамике, в последние годы переживает определенный кризис, подвергаясь серьезной критике по многим исходным позициям [Пучков, 2009]. Действительно, в целом ряде появившихся публикаций ставятся под сомнение такие базовые представления плюм-тектоники, как зарождение плюмов на границе ядра и мантии, их характерная геометрия в виде «широкой шляпы на тонкой ножке» и т.д. [Ernst, Buchan, 2003; Kerr, 2006; Foulger, 2007]. Также оказались сомнительными представления о неподвижной системе координат, связанной с плюмами, относительно кото-

рой якобы можно построить схему абсолютных перемещений литосферных плит [Davaille et al., 2002; O'Neil et al., 2003; Sager, 2007]. Отмечаются трудности при обосновании значительного магнообразования в «сухих» условиях мантийных плюмов [Рябчиков, 2003]. Наконец, данные сейсмотомографии показывают разрывы и смещения верхних «плюмовых» зон относительно нижних [Gorbatov et al., 2001; Zhao, 2004]. Наряду с критическими статьями по отношению к плюмовому направлению в литературе по геодинамике существуют работы, предлагающие альтернативные механизмы объяснения внутриплитного магматизма и сопутствующих ему явлений [Anderson, 2005, 2007; Foulger, 2007; Ballmer et al., 2008].

С точки зрения развиваемого нами подхода, основанного на совместном описании движения деформируемых литосферных плит и верхнемантийных течений, нет необходимости выделять в качестве самостоятельного направления плюм-тектонику, так как она в любом случае является формой мантийной конвекции, обуславливающей характер верхнемантийных течений, а последние, в свою очередь, во многом определяют деформации вышележащей литосферы. Такой более общий взгляд на геодинамику дает возможность примирить сторонников и противников плюмовой тектоники, поскольку предмет ожесточенного спора растворяется в технической проблеме моделирования трехмерных мантийных течений, согласованных с данными сейсмотомографии о современном глубинном строении Земли, которые можно с допустимой точностью использовать и для прошлых геологических эпох в пределах мезозойской эры. На качественном уровне подобный подход был использован в работе [Коваленко и др., 2010], посвященной связи новейшего вулканизма с глубинной геодинамикой.

Возвращаясь к модели вынужденной конвекции в верхней мантии под континентом с возвратным потоком в сторону зоны субдукции (см. рис. 7), заметим, что она естественным образом ассимилирует альтернативные по отношению к плюм-тектонике модели Фулджер [Foulger, 2007] и Андерсона [Anderson, 2005, 2007], в первой из которых внутриплитный магматизм объясняется пассивным растяжением литосферы, декомпрессией и наличием обогащенных относительно легкоплавких участков мантии и коры, а во второй — образование легкоплавких участков мантии связывается с наличием эклогитов, попавших в мантию в процессе даламинации утолщенной континентальной коры. Действительно, в нашей модели (см. рис. 7) присутствуют как механизм пассивного растяжения литосферы за счет возвратного подлитосферного мантийного течения, так и обогащенные водой относительно легкоплавкие эклогиты, попадающие в верхнюю мантию через зону субдукции при погружении содержащей воду базальтовой коры, испытывающей фазовый переход габбро-эклогит на глубинах порядка 100 км.

Рассматриваемая нами модель в целом согласуется с качественными представлениями авторов работ [Зорин, Турутанов, 2005; Зорин и др., 2006] о механизме верхнемантийных кайнозойских плюмов и связанного с ними магматизма в обширной провинции, включающей Прибайкалье, Монголию, Северо-Восточный Китай. Однако последние были подвергнуты критике в работе [Коваленко и др., 2010], где было указано, что эти представления не объясняют постоянство состава и характера вулканизма отмеченных областей в течение 150 млн лет его существования на фоне значительных изменений положения зон субдукции на востоке Азии, в частности, их отступления более чем на 1500 км на восток от района хр. Малый Хинган (ранний мел) до Японских островов (современное положение).

С точки зрения описанной выше гидродинамической модели нестационарной верхнемантийной ячейки основная неустойчивость, обуславливающая периодическое расширение и сжатие ячейки, связана с горизонтальной подвижностью зоны субдукции, в то время как фронтальная восходящая область ячейки под континентом, которую можно трактовать как верхнемантийный плюм (или серию более локальных плюмов), является относительно стабильной. Этим, вероятно, можно объяснить отмеченное в работе [Коваленко и др., 2010] постоянство состава и типа вулканизма с раннего мела и до современности в областях Прибайкалья, Монголии и Северо-Восточного Китая на фоне значительных горизонтальных перемещений зон субдукции тихоокеанской литосферы.

Еще одно обстоятельство, которое следует учитывать при анализе тектонической эволюции данного региона, заключается в том, что в поздней юре и раннем мелу имели место неоднократные перестройки плитных ансамблей в области Центральной и Северо-Восточной Азии, а также в прилегающей переходной зоне Тихого океана. При этом, как показывают палинспастические реконструкции на период девон—неоген, выполненные в 90-х годах прошлого века большим коллективом авторов по инициативе Л.П. Зоненшайна [Палеогеографический атлас..., 1998], эти перестройки происходили на фоне постоянной субдукции Тихоокеанской плиты под Евразийский континент, что, с нашей точки зрения, свидетельствует в пользу рассматриваемой выше картины конвекции в верхней мантии, сопряженной с конвейерным механизмом субдукции.

Описанная модель верхнемантийной конвекции, действующей в переходной области между Тихим океаном и Евразийским континентом, носит универсальный характер и может быть положена в основу геодинамического механизма, управляющего движением и деформациями литосферы Арктического региона. Это вытекает из аналогии между современной геодинамической обстановкой взаимодей-

твия тихоокеанской литосферы с окраинами Евразии и палеогеодинамикой взаимодействия литосферы Пасифики (Палео-Тихого океана) и Арктики в мезозое. Эта аналогия в целом подтверждается результатами исследований сибирских ученых структуры верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмотомографии [Яковлев и др., 2012; Верниковский и др., 2013].

Рассмотрим теперь основные следствия модели верхнемантийной конвекции в Арктическом регионе, сопряженной с субдукцией литосферы Палео-Тихого океана, применительно к анализу фактических данных о строении и эволюции структур Американо-Тихоокеанского бассейна в апт-альбский и более поздние периоды эволюции Арктики. Первый и основной вывод из данной модели состоит в том, что получает естественное объяснение общее состояние регионального субширотного растяжения литосферы Арктики, начиная с нижнего мела (апт—альб) и в более поздний кайнозойский период вплоть до современности, о чем свидетельствуют многочисленные геолого-геофизические данные [Miller, Verzhbitsky, 2009; Казмин и др., 2014] (см. рис. 2). Это растяжение возникает в результате возвратного течения вещества верхнемантийной ячейки, направленного в сторону зоны субдукции Палео-Тихого океана, которое благодаря вязкому сцеплению с подошвой литосферы Арктики смещает ее в том же направлении (рис. 8).

Второе важное следствие модели заключается в объяснении феномена так называемого Арктического плюма. Дело в том, что восходящая ветвь рассматриваемой верхнемантийной ячейки приходится на фронтальную зону ее взаимодействия с литосферой Баренцево-Карской окраины. Поднимающееся вещество ячейки верхней мантии, содержащее гидратированные породы, на небольших глубинах вследствие эффекта декомпрессии будет плавиться, приводя к интенсивным магматическим проявлениям на поверхности литосферы, которые хорошо известны в литературе под общим названием феномена Арктического плюма. Следует отметить, что под термином «Арктический плюм» большинство исследователей понимает популярную схему вертикального потока вещества из нижней мантии, зарождающегося на границе с ядром Земли [Добрецов и др., 2001; Пучков, 2009; Kuzmin et al., 2010]. Однако в

последнее время появляется все больше сомнений в реальности схемы нижнемантийного плюма в Арктике, не имеющей фактических подтверждений по данным сейсмической томографии, в отличие от обсуждаемой модели верхнемантийной конвекции, связанной с субдукционным процессом. Поэтому данную схему, на наш взгляд, вполне можно заменить на более реалистичную модель восходящего потока вещества верхней мантии, являющегося частью конвективной системы верхнемантийной ячейки. Учитывая, что нижний горизонтальный поток конвективной ячейки, текущий от зоны субдукции к Баренцево-Карской окраине, несет гидратированное вещество погружающейся океанской литосферы, кото-

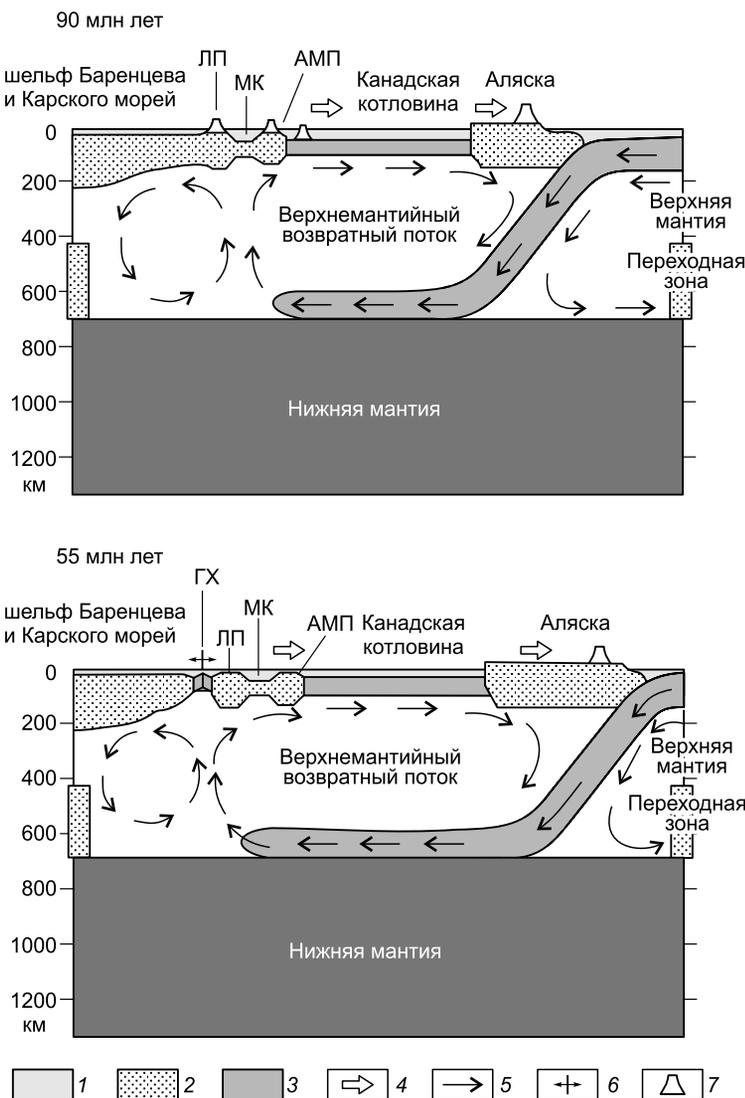


Рис. 8. Модель верхнемантийной ячейки под Арктическим регионом, вызванной процессом субдукции тихоокеанской литосферы [Лобковский, 2013].

1 — водная толща океана; 2 — континентальная литосфера; 3 — океаническая литосфера; 4 — вектор движения континентальных блоков в направлении Тихоокеанской зоны субдукции благодаря возвратной ячейке верхнемантийной конвекции; 5 — направление потоков в верхней мантии и переходной зоне; 6 — спрединг в Евразийской котловине; 7 — проявления магматизма. АМП — поднятия Альфа и Менделеева, ГХ — хр. Гаккеля, ЛП — поднятие Ломоносова, МК — котловина Макарова.

рое в результате циркуляции попадает в зону восходящего потока, в нем возникают наиболее благоприятные условия для интенсивного плавления и магмообразования (см. рис. 8).

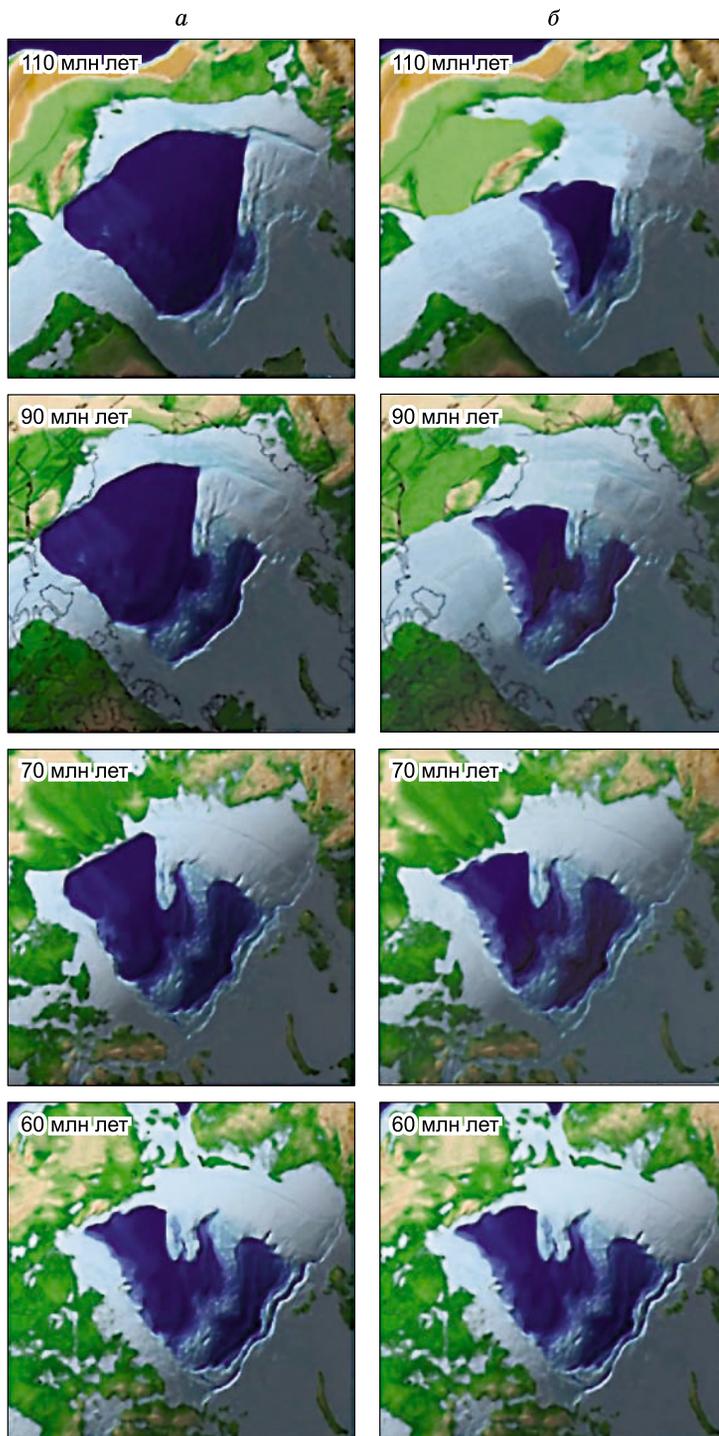
Таким образом, можно утверждать, что так называемая провинция HALIP (т. е. большая арктическая провинция изверженных пород), характеризующаяся интенсивными магнитными аномалиями изометричной формы и общим хаотическим рисунком, а также щелочным магматизмом континентально-рифтогенного типа, обязана своим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

Восходящий поток мантийной ячейки ослабляет прочность литосферы и под действием растягивающих напряжений, вызванных «волокущей» силой сцепления возвратного потока с подошвой литосферы, происходит механический отрыв от Баренцево-Карской окраины «первой меловой полосы» блоков в виде хребтов Альфа и Менделеева с образованием утоненных областей континентальной коры в их тылу, формирующих котловины Макарова и Подводников. Процесс отрыва и последующего отодвигания хребтов Альфа и Менделеева от Баренцевоморской окраины, сопровождаемый рифтогенным расширением бассейнов Макарова и Подводников, происходил в интервале времени от 110 до 60 млн лет [Лобковский и др., 2010, 2011; Лаверов и др., 2013]. В течение этого периода, в силу непрерывного поступления нового материала океанской литосферы из зоны субдукции в область верхнемантийной ячейки под литосферу Арктики, горизонтальный размер ячейки увеличивался как за счет отступления зоны субдукции в сторону Тихого океана, так и благодаря продвижению фронта ячейки в глубь Баренцевоморской окраины. Последнее обстоятельство в конце концов привело к отрыву «второй кайнозойской полосы» тектонических блоков в форме линейного хр. Ломоносова от Баренцевоморской окраины и образованию в тылу отодвигающегося хребта в кайнозойский период Евразийского бассейна благодаря сначала утонению континентальной коры, а затем медленному спредингу с формированием котловин Амудсена и Нансена, разделенных хр. Гаккеля [Лобковский и др., 2010, 2011; Лаверов и др., 2013] (см. рис. 8).

Описанная здесь последовательность событий, сформировавших основные структуры Амеразийского и Евразийского бассейнов Северного Ледовитого океана, кинематически представлена в известных реконструкциях К. Скотиза [Scotese, 2011], опиравшегося на ранние работы Л.П. Зоненшайна и Л.М. Натапо-

Рис. 9. Палеогеодинамическая реконструкция раскрытия Амеразийского бассейна.

a — реконструкции Северного Ледовитого океана, по [Scotese, 2011]; *б* — реконструкции Северного Ледовитого океана [Казмин и др., 2014], выполненная в геометрическом стиле [Scotese, 2011].



ва [1987]. Однако в этих реконструкциях, как было отмечено выше, имеется внутреннее противоречие, связанное с принятым механизмом субдукции литосферы Канадской котловины под Баренцевоморскую окраину и затем под хребты Альфа и Менделеева в меловой период, поскольку никаких следов внутриарктической субдукции не существует. Очевидно, возникает необходимость в создании новых кинематических реконструкций Арктического региона, в которых отсутствует механизм внутриарктической субдукции и при этом сохраняются основные этапы образования структур Американо-Азиатского бассейна.

Такие новые реконструкции, недавно выполненные М.В. Кононовым и Л.И. Лобковским (см. работу [Казмин и др., 2014]), представлены на рис. 9, б. Главное их отличие от реконструкций К. Скотиза (см. рис. 9, а) состоит в том, что вместо сомнительной внутриарктической меловой субдукции под Баренцевоморскую окраину и хребты Альфа и Менделеева новые реконструкции основываются на общепринятых представлениях о субдукции литосферы Палео-Тихого океана под Аляску и Чукотку. Кроме того, они базируются на реалистичной геодинамической модели протяженной верхнемантийной ячейки, образующей с Тихоокеанской субдукцией единую конвективную систему.

В геометрическом плане кардинальное отличие наших построений от реконструкций К. Скотиза [Scotese, 2011] связано с условным «начальным» моментом времени около 110 млн лет, когда в арктической литосфере установились условия субширотного растяжения после закрытия Южно-Аннуйского палеоокеана и образования Канадской котловины. В варианте К. Скотиза Канадская котловина представляла собой на тот момент весьма значительный по размерам бассейн с поперечником более 2 тыс. км (см. рис. 9, а). В процессе реконструкций площадь Канадской котловины уменьшалась ровно на величину появляющейся новообразованной площади хребтов Альфа и Менделеева и котловин Макарова и Подводников, сохраняя при этом общий пространственный баланс площадей. В итоге к началу кайнозоя (60 млн лет) весь Американо-Азиатский бассейн занимал площадь, равную площади одной Канадской котловины на «начальный» момент времени ее образования около 110 млн лет.

В новых реконструкциях начальная площадь образованной Канадской котловины на момент 110 млн лет равна ее сегодняшней площади, т. е. примерно в 4 раза меньше начальной площади Канадской котловины, по К. Скотизу [Scotese, 2011] (см. рис. 9, б). В дальнейшем последовательное образование структур Американо-Азиатского бассейна, включая хребты Альфа и Менделеева вместе с котловинами Макарова и Подводников, происходило за счет непрерывного отступления в сторону Тихого океана зоны субдукции, расположенной на окраине арктической литосферы, что также обеспечивало общий баланс площадей. При этом подчеркнем, что в предложенных нами реконструкциях нет внутренних противоречий и они полностью отвечают всем имеющимся на сегодня геолого-геофизическим данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен строгий анализ аксиоматических основ классической теории тектоники плит, без которого невозможно определить правильный вектор дальнейшего развития этой количественной тектонической теории. Подтверждением этого тезиса являются постоянно возникающие разнообразные новые концепции, претендующие на обобщение тектоники плит или ее замещение. На взгляд автора, эти попытки останутся малопродуктивными, пока четко не будут указаны исходные положения «новых концепций», отличающиеся от основных положений тектоники плит. В данной статье предлагается вариант обобщения плитотектонической теории с указанием базовых принципов «новой концепции» — тектоники деформируемых литосферных плит, позволяющей преодолеть существующие трудности в классической плитотектонической парадигме. Предложена новая геодинамическая модель мезозойско-кайнозойской эволюции литосферы Арктики, Северо-Восточной и Восточной Азии, основанная на представлении о развитии нестационарной конвективной системы в верхней мантии, включающей горизонтально протяженную конвективную ячейку под евразийско-арктической литосферой, сопряженную с конвейерным процессом субдукции Тихоокеанской плиты. В этой модели популярные представления о нижнемантийных плюмах заменяются верхнемантийными восходящими потоками фронтальных областей конвективной ячейки. Данный подход не означает отрицания важной концепции нижнемантийных плюмов и основанных на ней представлений об эволюции горячих точек [Kuzmin et al., 2010]. Однако, на наш взгляд, в каждом конкретном случае рассмотрения геологических особенностей какого-либо региона необходимо обосновывать с помощью сейсмической томографии наличие именно нижнемантийного плюма в качестве геодинамической модели эволюции данного региона. При этом следует иметь в виду альтернативную возможность объяснения тектономагматических процессов с позиций верхнемантийной конвекции.

Автор считает своим долгом выразить большую благодарность В.В. Ярмолуку, М.И. Кузьмину и В.А. Верниковскому за ряд ценных и критических замечаний, учтенных при окончательной редакции статьи, что устранило некоторые неясности. На отдельные замечания автор не нашел возможности ответить, поскольку обоснованные ответы на них предполагают большую дискуссию о путях развития тектоники плит и геодинамики, выходящую за рамки настоящей работы.

Статья подготовлена в ходе выполнения проекта «Разработка новой геодинамической модели эволюции Арктического региона на основе представлений тектоники деформируемых литосферных плит», входящего в программу фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» на 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

Баренбаум А.А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. М., ЛИБРОКОМ, 2010, 544 с.

Баркин Ю.В. Механизм тектонической активности Земли: глубинная геодинамика, ее современные проявления // Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. 1. М., ГЕОС, 2007, с. 59—62.

Богданов Н.А., Хаин В.Е., Шипилов Э.В. Система кайнозойских рифтов Восточной Арктики и ее возможное значение // ДАН, 1995, т. 345, № 1, с. 84—86.

Грачев А.Ф. Момский материковый рифт // Геофизические методы разведки в Арктике, 1973, вып. 8, с. 56—75.

Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю. Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1083—1107.

Верниковский В.А., Морозов А.Ф., Петров О.В., Травин А.В., Кашубин С.Н., Шокальский С.П., Шевченко С.С. Новые данные о возрасте долеритов и базальтов поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // ДАН, 2014, т. 454, № 4, с. 431—435.

Грамберг И.С., Деменицкая Р.М., Секретов С.Б. Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающее звено рифтового пояса хребта Гаккеля—Момского рифта // Докл. АН СССР, 1990, т. 311, № 3, с. 689—693.

Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск, НГУ, 2011, 488 с.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 409 с.

Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В., Кораго Е.А., Симонов В.А. Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1126—1144.

Жао Дапенг, Пирайно Франко, Лиу Люси. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (9), с. 1188—1203.

Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М. Тектоническая история Арктики // Актуальные проблемы тектоники океанов и континентов. М., Наука, 1987, с. 31—57.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М., Недра, 1990, кн. 1, 328 с.; кн. 2, 334 с.

Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х. Плуомы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (7), с. 685—699.

Зорин Ю.А., Балк Е.В., Новоселова М.Р., Турутанов Е.Х. Толщина литосферы под Монголо-Сибирской горной страной и сопредельными регионами // Физика Земли, 2006, № 7, с. 32—42.

Казмин Ю.Б., Лобковский Л.И., Кононов М.В. Геодинамическая модель развития Американо-Арктического бассейна Арктики (к обоснованию принадлежности хребта Ломоносова, поднятия Менделеева и котловины Подводников к Российской материковой окраине) // Арктика: экология и экономика, 2014, № 4, с. 14—27.

Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатиков О.А. Новейший вулканизм и его связь с процессами межплитного литосферного взаимодействия и глубинной геодинамикой // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (9), с. 1204—1221.

Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Геотектоника, 2013, № 1, с. 3—35.

Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М., Наука, 1988, 252 с.

Лобковский Л.И. Успехи и трудности тектоники плит: обобщение классической парадигмы на примере Арктического региона // Мировой океан. Т. 1. М., Научный мир, 2013, с. 29—52.

Лобковский Л.И., Никишин А.И., Хаин В.И. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М., Научный мир, 2004, 612 с.

Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Кононов М.В., Вержбицкий В.Е., Котелкин В.Д. Тектоника деформируемых литосферных плит и геодинамическая эволюция Арктического региона в мезозое—кайнозое // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 2. М., ГЕОС, 2010, с. 8—40.

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.

Мирлин Е.Г. Проблема вихревых движений в «твердых» оболочках Земли и их роли в геотектонике // Геотектоника, 2006, № 4, с. 43—60.

Палеографический атлас Северной Евразии. Палеографические карты на палинспатических реконструкциях. 26 карт: девон—неоген (380.8—6.8 млн лет) / Под ред. В.Г. Казьмина, Л.М. Натапова. М., ИТЛП РАЕН, 1998, CD компакт-диск.

Пучков В.Н. «Великая дискуссия» о плюмах: так кто же все-таки прав? // Геотектоника, 2009, № 1, с. 3—22.

Рябчиков И.Д. Механизмы и условия магмообразования в мантийных плюмах // Петрология, 2003, т. 11, № 6, с. 548—555.

Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики САХА (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина. М., Маик «Наука/Интерпериодика», 2001, 571 с.

Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. На пути к постплейт-тектонике // Вестн. РАН, 2015, т. 85, № 7, с. 605—615.

Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 560 с.

Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика, 2012, т. 53(10), с. 1261—1272.

Anderson D.L. Large Igneous Province, delamination, and fertile mantle // Elements, 2005, p. 271—275.

Anderson D.L. The eclogite engine: chemical geodynamics as Galileo thermometer // Plates, plumes, and planetary processes / Eds. G.R. Foulger, D.M. Jurdy. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 430, 2007, p. 47—65.

Ballmer M.D., van Hunen J., Tackley P.J., Bianco T.A. Non-hotspot volcano chains from small-scale sublithospheric convection (a 3D-numerical study) // Geophys. Res. Abstracts, 2008, v. 10, EGU 2008-A-07167.

Davaille A., Girard F., le Bars M. How to anchor hotspots in a convective mantle? // Earth Planet. Sci. Lett., 2002, v. 203, № 2, p. 620—634.

DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. Geologically current plate motions // Geophys. J. Int., 2010, v. 181, p. 1—80.

Ernst R., Buchan K. Recognising mantle plumes in the geological record // Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 2003, v. 31, p. 459—523.

Foulger G.R. The «Plate» model for the genesis of melting anomalies // Plates, plumes, and planetary processes / Eds. G.R. Foulger, D.M. Jurdy. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 430, 2007, p. 1—29.

Golonka J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region // Arctic petroleum geology / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sorensen. Geol. Soc., London Memoir, 2011, v. 35, p. 79—129.

Gorbatov A., Fukao Y., Widiyantoro S., Gordeev E. Seismic evidence for a mantle plume oceanwards of the Kamchatka-Aleutian trench junction // Geophys. J. Int., 2001, v. 146, p. 282—288.

Herron E.M., Dewey J.F., Pitman W.C. Plate tectonics model for the evolution of the Arctic // Geology, 1974, v. 2, № 8, p. 377—380.

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

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

- Kerr R.A.** Rising plumes in earth's mantle: phantom or real? // *Science*, 2006, v. 313, p. 1726.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A.** Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth Sci. Rev.*, 2010, v. 102, № 1—2, p. 29—59.
- Lallemand S.** High rates of arc consumption by subduction processes: Some consequences // *Geology*, 1995, v. 23, p. 551—554.
- 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 // *Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov* / Eds. D.B. Stone, K. Fujita, P.W. Layer, E.L. Miller, A.V. Prokopiev, J. Toro. EGU Stephan Mueller Publication Series. 2009, v. 4, p. 223—241.
- O'Neil C.O., Muller D., Steinberger B.** Geodynamic implication of moving Indian Ocean hotspots // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 215, № 1—2, p. 151—168.
- Pitman W.C., Talwani M.** Sea-floor spreading in the North Atlantic // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1972, v. 83, № 3, p. 619—646.
- Sager W.W.** Divergence between paleomagnetic and hotspot model predicted polar wander for the Pacific Plate with implications for hotspot fixity frames // *Plates, plumes, and planetary processes* / Eds. G.R. Foulger, D.M. Jurdy. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 430, 2007, p. 335—359.
- Scotese C.R.** Paleogeographic reconstructions of the Circum-Arctic region since the Late Jurassic // Search and discovery article #30193. PALEOMAP Project, Arlington, TX. 2011.
- Scotese C.R., Golonka J.** PALEOMAP Paleogeographic Atlas. PALEOMAP Progress Report № 20. Department of Geology, University of Texas at Arlington, 1993, 28 maps.
- Shokalsky S.P., Morozov A.F., Petrov O.V., Kashubin S.N., Kremenetsky A.A., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Shatov V.V., Vinokurov I.Yu., Rekant P.V., Gusev E.A., Grikurov G.E.** New data on geology of the Central Arctic seafloor highs (results of analytical studies of bottom rock samples collected during the «Arctic-2012» cruise) // International conference «Geological structure and evolution problems of the Arctic basin in the context of submission on the outer limits of the continental shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean». Saint-Petersburg, Russia (May 27—28, 2014). 2014, Compact Disk.
- Zhao D.** Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Phys. Earth Planet. Int.*, 2004, v. 146, № 1, p. 3—34.
- Zhao D.** Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Res.*, 2009, v. 15, p. 297—323.
- Zhao D., Tian Y., Ley 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. Int.*, 2009, v. 173, p. 197—206.

*Рекомендована к печати 28 августа 2015 г.
М.И. Кузьминым*

*Поступила в редакцию
14 июля 2015 г.*