УДК 551.24

АТЛАНТИКО-АРКТИЧЕСКАЯ РИФТОВАЯ СИСТЕМА: ПОДХОД К ГЕОДИНАМИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ И СЕЙСМИЧНОСТИ

© 2017 С.Ю. Соколов

Геологический институт РАН, Москва, 119017;
e-mail: sysokolov@yandex.ru

Атлантико-Арктическая рифтовая система представляет собой сегментированную структуру длиной 18 тыс. км с разновозрастным началом спрединговых процессов, но с общей тенденцией их омоложения и проградации в северном направлении. Томографическое отображение мантии под рифтовой системой показывает преобладание «холодного» состояния для более древних сегментов. Ряд характеристик указывает на независимое движение фрагментов плит, обрамляющих сегменты рифтовой системы, что указывает на отсутствие замкнутой конвективной ячейки вдоль дивергентной границы и на наличие дополнительного геодинамического фактора с тангенциальным действием. Пространственное распределение сейсмичности показывает, что действие дополнительного фактора может быть выражено в центробежной тенденции движения плит от полюсов, которое освобождает пространство для проградации рифтовой системы по сложной траектории с тенденцией на заложение трансформных зон. Продвижение головной части рифта осложнено структурными неоднородностями Северо-Восточной Евразии. Рифтогенез является откликом на дрейф плит, а не его причиной.

Ключевые слова: сегментация, рифтовая система, отношение Vp/Vs, сейсмичность, начало спрединга.

ВВЕДЕНИЕ

Атлантико-Арктическая рифтовая система (ААРС) представляет собой крупнейшую структуру этого типа суммарной длиной не менее 18 тыс. км, включающую Срединно-Атлантический хребет (САХ) и хребет Гаккеля (рис. 1 на 4 стр. обложки). Она является дивергентной границей при отсутствии замкнутой конвективной ячейки, охватывающей всю мантию, что следует из данных сейсмотомографии (Grand et al., 1997; Lebedev, Van Der Hilst, 2008; Van der Hilst et al., 1997). Возраст начала спрединговых процессов в разных сегментах ААРС колеблется от 170 млн лет в центральном, 59 млн лет в северном и до 54 млн лет в Арктическом сегменте системы. Общий тренд развития ААРС имеет направленность с юга на север через полюс и приводит к торцевому сочленению растущей зоны растяжения хребта Гаккеля с континентальным массивом северо-восточной Евразии. Фундаментальной гипотезой, объясняющей подобное протекание тектогенеза вдоль этой системы, является рифтогенез как отклик на дрейф плит, образующий в разное время и в разном месте пространство для развития спрединговых процессов и формирования океанических бассейнов. Кроме этого, растяжение может охватывать прилегающие континентальные блоки с формированием неокеанических осадочных бассейнов на существующем фундаменте. Отказ от дополнительных факторов тектогенеза в обосновании глобальных тектонических процессов, кроме тепломассопереноса в мантии, создает методическую ловушку, не позволяющую максимально правдоподобно интерпретировать фактурную базу. Проградация рифтовой системы сопровождается образованием недоразвитых ветвей, по которым процесс раскалывания континента застопорился без формирования больших бассейнов. Российский сегмент Арктики содержит два района, где имеет место взаимодействие рифта со структурным континентальным барьером — море Лаптевых и архипелаг Земли Франца-Иосифа. В контексте развития ААРС оба района имеют значения как феномены риф-

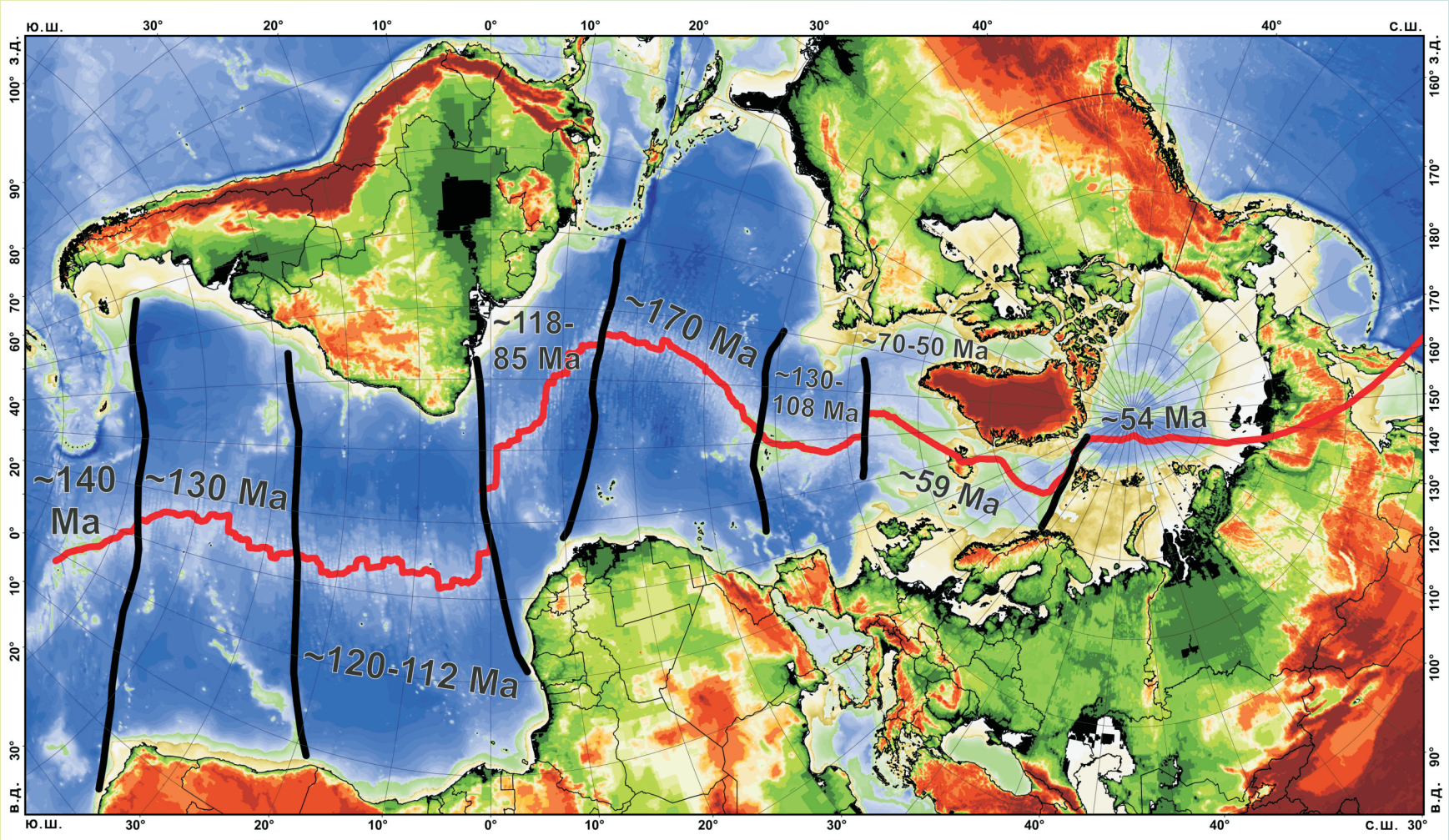

Рис. 1. Положение профиля ААРС (осевая линия САХ), вдоль которого рассчитан разрез атрибута *Vp*/*Vs* (рис. 2), и сегментация ААРС на разновозрастные блоки (время начала спрединга указано цифрами) по демаркационными разломам (линии ортогональные САХ). Для моря Лабрадор указан временной интервал начала и конца функционирования спрединга.

тового тектогенеза, завершившегося в нижнем мелу, и современного, траектория которого через северо-восток России еще не определилась во взаимодействии с континентальной литосферной плитой. Задачей работы является выявление и анализ особенностей ААРС и сопоставление их с разрезом атрибута отношения *Vp/Vs* в мантии по данным сейсмотомографии (рис. 2), имеющим геодинамическую интерпретацию подвижности среды (Соколов, 2014), а также выработка подхода к определению дополнительных факторов тектогенеза и интерпретации данных вдоль этой структуры.

ОБОСНОВАНИЕ ПОИСКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ТЕКТОГЕНЕЗА

В основу рабочей геодинамической модели заложена тепловая конвекция в мантии, при которой главными силами, ответственными за приповерхностную динамику литосферных масс являются: давление хребта (ridge push) при растяжении вдоль его оси, затягивание субдуцируемой плиты (slab pull) в мантию и перенос плит подлитосферным течением в астеносфере, являющимся следствием конвекции. Существующие факты указывают на отсутствие или малую эффективность в ААРС основных движущих сил дрейфа плит: давления хребта — осевая «горячая» аномалия по томографии не более 250 км (Lebedev, Van Der Hilst, 2008); затягивание слэба — почти полностью отсутствуют зоны субдукции с наклоном от оси рифтовой системы; подлитосферное течение – нет признаков динамического рельефа около оси рифта (Kaban et al., 2003). Отмеченные силы и механизм их энергообеспечения не объясняют возникновение существующих тектонических структур при перемещении плит: из-за дефицита физической обоснованности для реальной (не модельной) горизонтальной компоненты движения, в том числе ориентированной неортогонально САХ; из-за сложности с обоснованием наличия полных конвективных ячеек по данным сейсмотомографии; из-за отсутствия увязки дискретного характера параметров магматических процессов вдоль САХ (Дмитриев и др., 1999) с представлением о существовании сплошного восходящего потока вещества вдоль дивергентной границы плит. Изучение ААРС с хребтом Гаккеля как головной части рифтовой системы (рис. 1) в указанном контексте должно определить подход к поиску дополнительных факторов тектогенеза, обеспечивающих протекание рифтогенеза.

Главным подтверждением наличия конвекции в мантии должна была быть сейсмотомография, но она показала наличие вертикальных прогретых областей, имеющих конфигурацию,

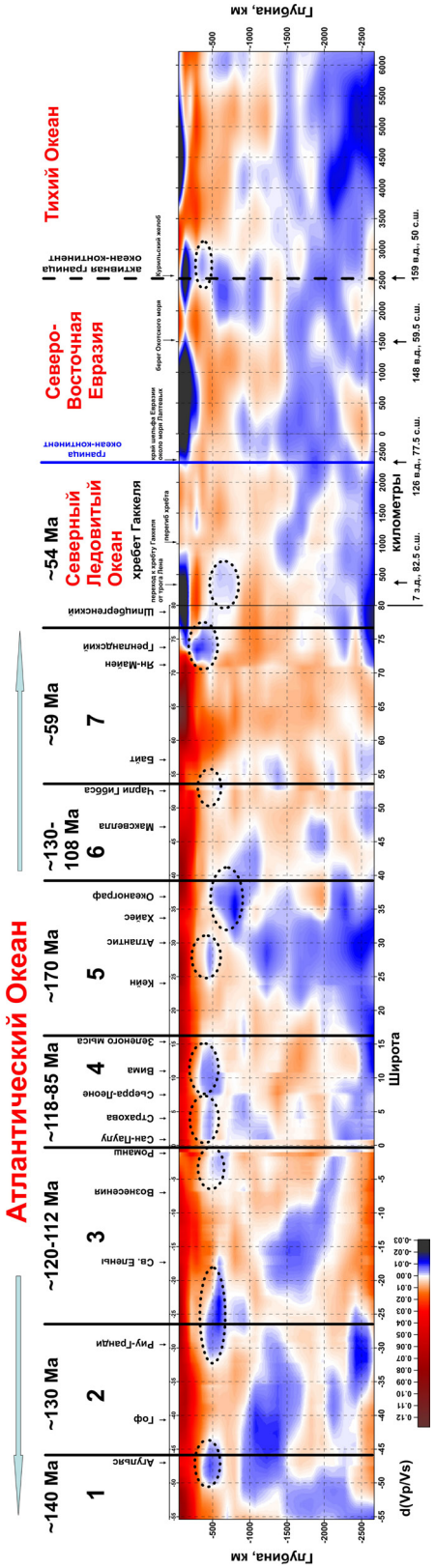

Рис. 2. Разрез вдоль ААРС атрибута δ(*Vp/Vs*), рассчитанного по данным (Grand et al., 1997; Van der Hilst et al., 1997) по методике (Соколов, 2014). Положение профиля ААРС представлено на рис.1. Разрез от 55°ю.ш. до 80°с.ш. показан в проекции на ось широт, далее через полюс разрез показан вдоль линии профиля с горизонтальной координатой, измеряемой в километрах. Сверху разреза подписаны названия основных разломов, пересекающих САХ, и морфологических районов, через которые проходит профиль. Пунктиром обведены области резкого усиления «холодных» аномалий на разрезе атрибута по сравнению с холодными аномалиями на исходном разрезе S-волн. Вертикальными линиями разграничены блоки между демаркационными разломами (рис. 1) с указанием времени начала спрединговых процессов и порядковым номером сегмента, имеющим описательный смысл.

отличную от замкнутой системы ячеек, охватывающих мантию. Вместо конвективных ячеек были обнаружены ветвящиеся плюмы, восходящие к поверхности от двух суперплюмов — Африканского и Тихоокеанского. При этом, структуры САХ, где должны были фиксироваться глубинные восходящие потоки конвекционных ячеек, в томографии не прослеживаются глубже 250 км. Считается, эта прогретая зона инициирует раздвигание плит с суммарным линейным размером до 15000 км. Таким образом, в зоне САХ не наблюдается аномалии прогретого вещества, сопоставимой по масштабу с движимыми плитами и непонятно, каким образом этот слой формирует усилие по расталкиванию литосферных плит на базе почти в 15 тыс. километров (расстояние между внешними границами континентов обрамления Атлантики). Данное обстоятельство проиллюстрировано на примере трансатлантического профиля включающего северную Америку и Африку (рис. 3). Сопоставимыми по интенсивности аномалиями являются плюмы, но они точечно проникают через литосферу и не являются причиной ее движения. В случае особо крупных размеров верхних частей плюмов формируются локальные течения, способные формировать значительный латеральный перенос литосферных блоков (Трифонов, Соколов, 2015), но не плит в целом. Затягивание субдуцируемой плиты (slab pull) для Атлантики как фактор тектогенеза не актуально из-за отсутствия зон субдукции с падением от САХ (Малая Антильская дуга и море Скоша не в счет, так как они на порядок меньше размеров Атлантики), затягивание в которые могло бы осуществить раскрытие этого океана. Остающееся подлитосферное течение в астеносфере в случае своего наличия в природе должно было бы создать хорошо распознаваемый динамический рельеф, увязанный с САХ. Но, по данным (Kaban et al., 2003), динамический рельеф, являющийся частью остаточного рельефа, в котором удалено изостатическое влияние литосферных масс, увязан не с системой САХ, а с системой восходящих плюмов. Аномалии рельефа, связанные с динамическим напором, наблюдаются только в тех участках САХ, которые интерферируют с ответвлениями плюмов (Исландия, Азорские острова, район Буве). Кроме того, неясно как течение – явление имеющее зону повышенных значений скорости с шириной много меньшей длины, на которой оно проявляется, — может иметь обратное сочетание размеров: длину сопоставимую или меньшую чем ширина, в данном случае размер САХ около 15 тыс. км.

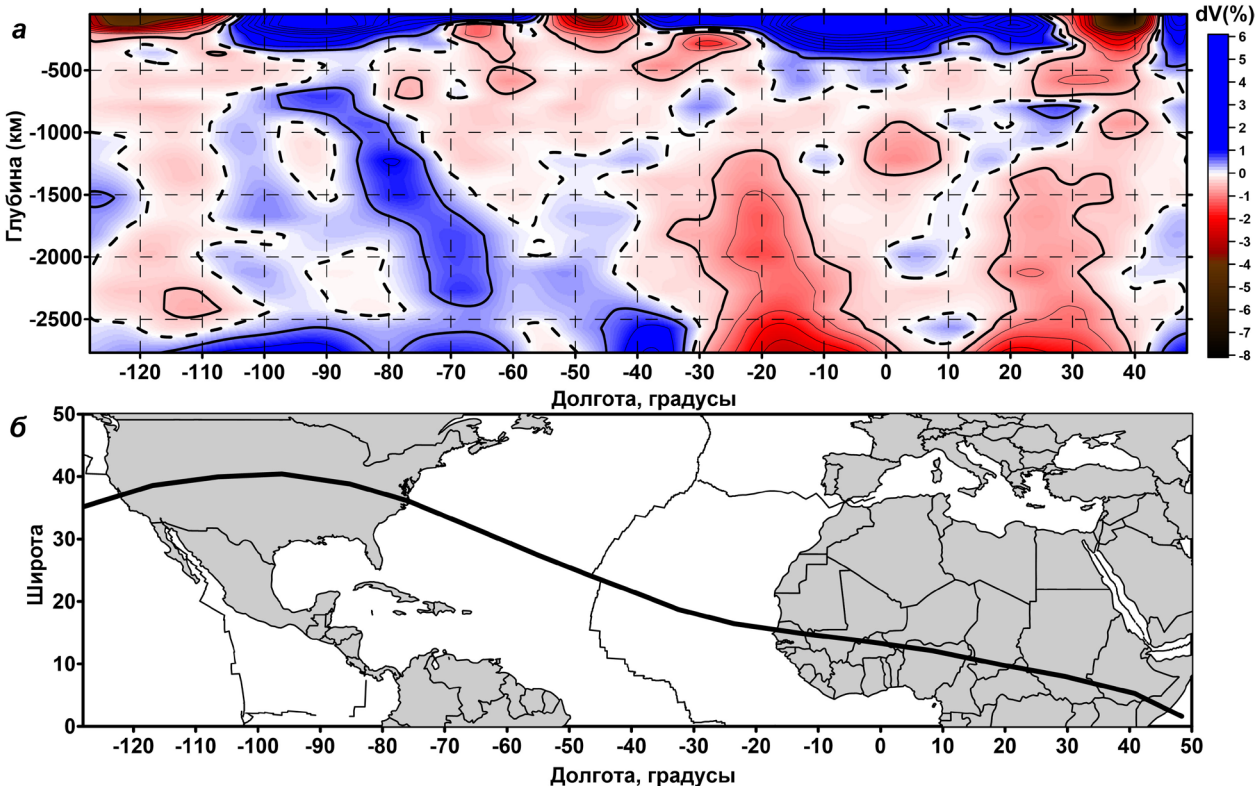

Рис. 3. Субширотный сейсмотомографический разрез мантии (*а*) в центральном сегменте Атлантики, рассчитанный по данным S-волн (Grand et al., 1997), пересекающий САХ по 24° с.ш. Пунктирная изолиния — нулевое значение, жирные сплошные изолинии — пределы ±0.5%, в которых сосредоточены компоненты вариаций, близкие к ошибке метода. Остальные изолинии показаны с шагом 0.5%. (*б*) — положение профиля, совпадающее с горизонтальной координатой разреза.

Таким образом, для получения наблюдаемого тектогенеза необходимо сочетание классических механизмов движения плит, генерируемых тепловой машиной в мантии, с чем-то еще. Одновременное существование конвективных ячеек и плюмов вызывает большие сомнения, но плюмы при этом являются реально наблюдаемым по сейсмотомографии явлением. Система срединно-океанических хребтов (СОХ) глобальна и непрерывна, а система плюмов дискретна. Это создает неопределенность в объяснении структурообразования СОХ за счет одного фактора и заставляет искать дополнительный. Для Атлантики основные объявленные механизмы тектогенеза, обеспечивающие горизонтальное перемещение литосферных плит, выглядят малозначащими. Дополнительным фактором может быть ротационный, формирующий объемные силы, действующие за счет тангенциальных компонент движения в системе вращающегося сфероида.

ГИПОТЕЗЫ С РОТАЦИОННЫМ ФАКТОРОМ ТЕКТОГЕНЕЗА

Под ротационным фактором тектогенеза понимается формирование сил, воздействующих на внешнюю оболочку Земли литосферу при изменениях режима вращения сфероида — положении оси вращения в теле Земли и вариациях угловой скорости. Эти силы являются объемными — действующими на каждый элементарный объем вещества — и в неинерциальной системе, которой является вращающийся сфероид с большим спутником, имеют компоненту, приводящую к тангенциальным смещениям подвижных литосферных масс, подстилаемых слоем с пониженной вязкостью. Эти силы никак не связаны с процессами тепломассопереноса в мантии, хотя последний может обеспечивать более оптимальные условия по трению для перемещения плит. Объемные тангенциальные силы, связанные с вращением, в классической теории тектоники плит не рассматриваются. По мнению автора это является упущением, поскольку примеры деформационных процессов во вращающихся системах с неравномерным распределением масс достаточно распространены, чтобы их не учитывать. Речь в данном случае идет не только о приливных явлениях, а о центробежных и других смещениях в условиях меняющихся параметров вращения.

Ротационному фактору посвящена обширная литература. Большинство российских авторов, развивавших эту тему, представлены в сборнике (Ротационные ..., 2007). Основу многих работ составляет построение векторов сил действующих на материальную точку, находящуюся на поверхности сфероида на разном расстоянии от оси вращения. Даже эта простая схема (Каримов, Усманов, 2007) обосновывает наличие силы с тангенциальной компонентой, способной вызвать горизонтальные смещения масс в нетвердом теле. Кроме этого, отметим следующие работы. Одной из первых попыток объяснить тектонические деформации ротационным фактором может считаться работа (Taylor, 1910). В ней в частности предполагается, что Альпийский складчатый пояс является следствием движения Евразии в сторону экватора под действием полюсобежных сил. В работе (Долицкий, 1985) исследуются глобальные ротационные поля напряжений, возникающие из-за вариаций режима вращения Земли. В работе (Филатьев, 2007) построена гипотеза о зависимости геодинамического режима литосферы от режима вращения Земли (замедление или ускорение), при которой оболочки Земли, имеющие различный момент инерции, по-разному реагируют на вариации параметров вращения. Это приводит к проскальзыванию оболочек друг относительно друга. Земля, в силу сохранения момента количества движения (MVR=const), компенсирует изменения в скорости орбитального движения изменением скорости собственного вращения. Таков основной механизм вековых (~200 млн лет) колебаний скорости вращения Земли. При постоянной массе единственным средством адаптации Земли к изменяющемуся режиму вращения является изменение радиуса оболочек и их проскальзывание. В работе (Тяпкин, Довбнич, 2009), где для обоснования проскальзывания оболочек рассматривается закон сохранения момента количества движения (или момента импульса), указывается, что основной вклад в создание поля напряжений тектоносферы вносится не вариацией угловой скорости вращения Земли, а изменением положения оси ее вращения. Их численные значения отличаются друг от друга почти на два порядка. Напряжения, обусловленные изменением положения оси вращения, накапливаясь, достигают величин, превышающих предел прочности вещества, слагающего тектоносферу. Это значит, что этих напряжений вполне достаточно для осуществления разломообразования в тектоносфере Земли и сопутствующих им геологических явлений. Одним из таких явлений является дрейф плит.

В работе (Соколов, 2008) предлагается ротационный механизм для горизонтальной компоненты движения блоков литосферы. Суть механизма состоит в следующем: коровые, литосферные или другие массы, находящиеся в расслоенном состоянии перемещаются по поверхности Земли таким образом, чтобы их распределение обеспечивало диагональный вид тензора

инерции исследуемой оболочки Земли (максимальное значения главного момента инерции и нулевое значение тангенциальных компонент). При этом траектории перехода поверхностных масс в это положение (близкое к экватору и распределенное равномерно вокруг сфероида) могут быть существенно более сложными, чем простое скучивание около экватора по кратчайшему пути. Кроме того, наличие факторов, меняющих ориентацию оси вращения в теле Земли в геологическом времени, делают цель движения масс подвижной, из-за чего процесс перемещения не затухает, а циклически меняет вектор движения. В работе (Соколов, 2008) проведено моделирование движения литосферных масс и его сравнение с наблюдениями GPS. Показано, что в приближении постоянной мощности плит основной стиль движения континентов обрамления Атлантики может быть получен по использованной методике без применения тепломассопереноса для расчета движений. Это означает, что раскрытие субмеридиональной ААРС и освобождение полюса от континентальных масс полностью укладывается в логику процесса адаптации масс к режиму вращения: смещению к экватору и перемещению в широтном направлении для более равномерного их распределения вокруг сфероида.

ВАРИАЦИЯ *Vp/Vs* НА СЕГМЕНТЕ РАЗРЕЗА ВДОЛЬ САХ

Разрез атрибута δ(*Vp/Vs)* (рис. 2) расположен вдоль оси САХ между 55°ю.ш. и 80°с.ш. В этих пределах он был представлен в (Соколов, 2014). В данной работе он продлен на север через полярную область по хребту Гаккеля до северо-восточной Евразии с выходом в Тихий океан (рис. 1). Возможные траектории перехода ААРС через континент при выборе положения профиля не рассматривались, поскольку основной акцент при рассмотрении материала сделан на уже сформированной части рифта. Разрез δ(*Vp/Vs)* (рис. 2) по данному профилю показывает наличие интенсивной отрицательной аномалии зоны САХ от поверхности до глубины приблизительно 250 км. В пересечении профилем корней Африканского суперплюма на разрезе над границей ядро-мантия выделяется сильная «горячая» аномалия, единственная на разрезе. Выявленная конфигурация поля больше соответствует сечению плоскостью разреза ответвлений суперплюма, берущего начало на границе ядро-мантия, чем разрезу вдоль дивергентной границы предполагаемых конвективных ячеек. Реализация вертикального перемещения прогретого вещества в мантии происходит по расходящимся ответвлениям плюмов, а не по системе восходящих потоков ячеек. Это хорошо иллюстрируется разрезом ортогонально САХ через ветви суперплюма (рис. 3), сделанным через область, являющуюся классической для разработки теории дрейфа континентов. Поскольку геодинамически активный процесс, связанный с подъемом прогретого вещества не является повсеместным вдоль САХ, но структуры которого, тем не менее, непрерывны и простираются на 15 тыс. км, необходимо изучение дополнительных факторов тектогенеза. Эти факторы должны участвовать в спрединге САХ и формировать вклад в горизонтальное перемещение плит, не связанный с тепломассопереносом, отображаемым в томографии. На разрезе атрибута обособляются «холодные» аномалии в интервале от 300 до 600 км в районе разломов Романш, Чарли Гиббса и зоны хребта Книповича. Кроме того, наблюдаются зоны усиления отрицательных аномалий в районе разлома Кейн и между разломами 15°20' (Зеленого Мыса) и Романш. В мантии над уровнем ~700 км в указанных районах наблюдаются линзы мощностью 200–300 км, обладающие свойством пониженной «подвижности», которая трактуется в рамках термальной интерпретации аномалий скоростей (Becker, Boschi, 2002). Сравнение положения этих зон с конфигурацией САХ на плане (рис. 1) показывает соответствие разломным демаркационным зонам, формирующим основную сегментацию Атлантического океана и его перехода к Арктике (рис. 2). Согласно работе (Соколов, 2014) хребет Книповича вместе с трогом Лена также является демаркационной зоной, сегментирующей Северную Атлантику и Арктику. Атрибут подвижности δ(*Vp/Vs)* позволяет дифференцировать аномальное поле в верхней мантии под САХ и выделять участки, имеющие принципиально различные значение для понимания геодинамики, геохимии и интерпретации состояния недр.

ВАРИАЦИЯ *Vp/Vs* НА ПОЛЯРНОМ СЕГМЕНТЕ РАЗРЕЗА

Полярный сегмент разреза, проложенный от хребта Книповича на север через полярную область по хребту Гаккеля до северо-восточной Евразии с выходом в Тихий океан, обладает несколько иными характеристиками в поле атрибута δ(*Vp/Vs).* Нижняя мантия представлена в основном «холодными» значениями и занимаемое ими пространство больше, чем в сегменте САХ, поскольку отсутствуют пересечения ветвей суперплюма. Осевая аномалия арктического сегмента ААРС гораздо менее контрастная, чем в САХ. При этом в западной части хребта Гаккеля проявлена «холодная» аномалия, сходная с континентальной в северо-восточной Евразии. Подобный переход около отметки 900 км

(рис. 2) от «холодного» малоподвижного состояния, не типичного для СОХ, к более характерным «горячим» значениям сопровождается несколькими явлениями, почти совпадающими в пространстве, которые указывают на реальность существенного изменения свойств литосферы по латерали вдоль разреза на отрезке длиной около 300 км. Это: изменение ориентации хребта Гаккеля к востоку от 65°в.д., кластер аномальной сейсмичности 1999 г. на хребте около 86°в.д. (Лукина и др., 2004) в сочетании с контрастным минимумом изостатической аномалии (Зарайская, 2013), постепенный переход от амагматического характера строения дна с низким процентом поднятых базальтов к магматическому (Michael et al., 2003) около 70°в.д. Эти факты дополняют признаки, указывающие на большую подвижность сегмента хребта Гаккеля к востоку от отметки 900 км (рис. 2). Отметим, что на разрезе атрибута есть признаки ответвления от Исландского плюма на глубине около 1000 км, идущего на север и вдоль ААРС.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сегментация акватории Атлантики (рис.1), перенесенная на разрез (рис. 2) вместе с временем начала спрединговых процессов показывает следующее. Наиболее древний сегмент САХ 5 с возрастом ~170 млн лет имеет максимально «холодное» пространство от поверхности до границы ядро мантия. Аналогичное проявление холодного состояния имеет мантия под северо-западным сегментом Тихого океана, где возраст фундамента по магнитным аномалиям оценивается в 150–180 млн лет. Такое же состояние имеет мантия под северо-восточным блоком Евразии, но в верхней ее части наблюдается перемычка с приполярной «горячей» линзой, имеющей связь с Исландским плюмом. Эта перемычка отлично видна при интерактивной визуализации в 3D. В районе САХ следующим по возрасту является сегмент 1 (рис. 2) и далее сегмент 2, в которых проявление «холодного» состояния достаточно велико, но меньше, чем в сегменте 5. Вполне возможно, что в самой нижней части мантии в этих сегментах ее состояние было бы почти таким же как и в сегменте 5, но в южной части САХ имеется суперпозиция с корнем Африканского плюма, которая маскирует состояние, отвечающее термальной истории процесса, с плюмом не связанного. Сегмент 6 находится под влиянием Азорского плюма, имеющего тенденцию к миграции на юг (Dmitriev et al., 2001), поэтому установить связь между возрастом и термальным состоянием не удается проследить даже качественно. Сегмент 3 несмотря на расположение непосредственно над корнем Африканского суперплюма имеет достаточно большое «холодное» пространство в мантии. Сегмент 4 насыщен несколькими «холодными» линзами над границей 670 км, и, как показывает 3D визуализация и частично рис. 3, его глубокая часть испытывает суперпозицию с ответвлением плюма, подводящим прогретое вещество к магматическим системам островов Зеленого Мыса и Канарских. Наиболее молодой частью САХ является северный сегмент 7 и хребет Гаккеля, как головная часть ААРС. Сегмент 7 исходя из принципа остывания с возрастом должен быть наиболее прогретым, но он является таковым из-за суперпозиции с Исландским плюмом. Разделение состояния мантии на компоненты плюмовые и не плюмовые не представляется осуществимым. Несмотря на это, мы можем на качественном уровне сформулировать закономерность, устанавливающую под дивергентной границей ААРС связь термального состояния мантийного пространства с возрастом: чем древнее начало спрединга в сегменте, тем более «холодные» средние характеристики имеет мантия в отображении атрибута $\delta(Vp/Vs)$.

Другой особенностью является непоследовательный в пространстве (с юга на север) временной ряд начала спрединга в сегментах, при сохранении общего тренда с юга на север. Пространственный разброс начала раскрытия показывает локальный характер рифтогенеза: рифт появляется без наличия замкнутой и распространенной на всю мантию конвективной ячейки, отвечающей размерами САХ. В этом случае разумным предположением о причинности процесса является дрейф литосферных плит под действием дополнительной тангенциальной силы на поверхности и следующий за рифтогенным расколом плит в пределах сегмента спрединг как пассивный отклик, заполняющий освободившееся при расхождении плит пространство магматизмом и новообразованной океанической корой. Дополнительным аргументом в пользу существования такой модели является дискретный характер магматизма вдоль САХ (Дмитриев, Соколов, 2003; Дмитриев и др., 1999). Базальты малоглубинной и низкотемепературной спрединговой ассоциации (N-MORB) присутствуют вдоль САХ повсеместно, а базальты обогащенные — глубинные и высокотемпературные (E-MORB) — только в местах суперпозиции САХ с ответвлениями плюмов (Sokolov et al., 2008). Раскол литосферной плиты вызывает декомпрессию, подъем мантии и инициирует выплавки в самой верхней части мантии (15–30 км) (Дмитриев, Соколов, 2003). Возникает локальный разогрев и частичное плавление, которые приводят к формированию отрицательной томографической аномалии с глубиной до 250 км. В настоящее время разрешающая способность

томографии позволяет различить подошву аномалии на этой глубине, но с увеличением разрешения метода эта глубина, скорее всего, станет меньше и приблизится к глубине солидуса. Возникает также рост теплового потока, значение которого затухает в абиссальных частях плит. Рассмотренные данные показывают, что при мобилизации раздвижения плит формируется аномальное поле, которое по данным томографии может охватывать значительную часть мантии, но с течением времени аномалия локализуется в верхних 250 км и остается в этих пределах, несмотря на продолжающийся процесс дрейфа плит и спрединга вдоль дивергентной границы.

Геодинамику современного состояния литосферных плит около головной части ААРС демонстрирует распределение сильной (> 5 баллов) сейсмичности (рис. 4). В представленном ракурсе в полярной стереографической проекции видно, что две субдукционно-надвиговые зоны — Тихоокеанская и Альпийская — с сильной глубокофокусной сейсмичностью расположены по разные стороны от полюса вращения и имеют смещения задуговых зон, направленные в сторону от тыловой зоны с полюсом (Мазарович,

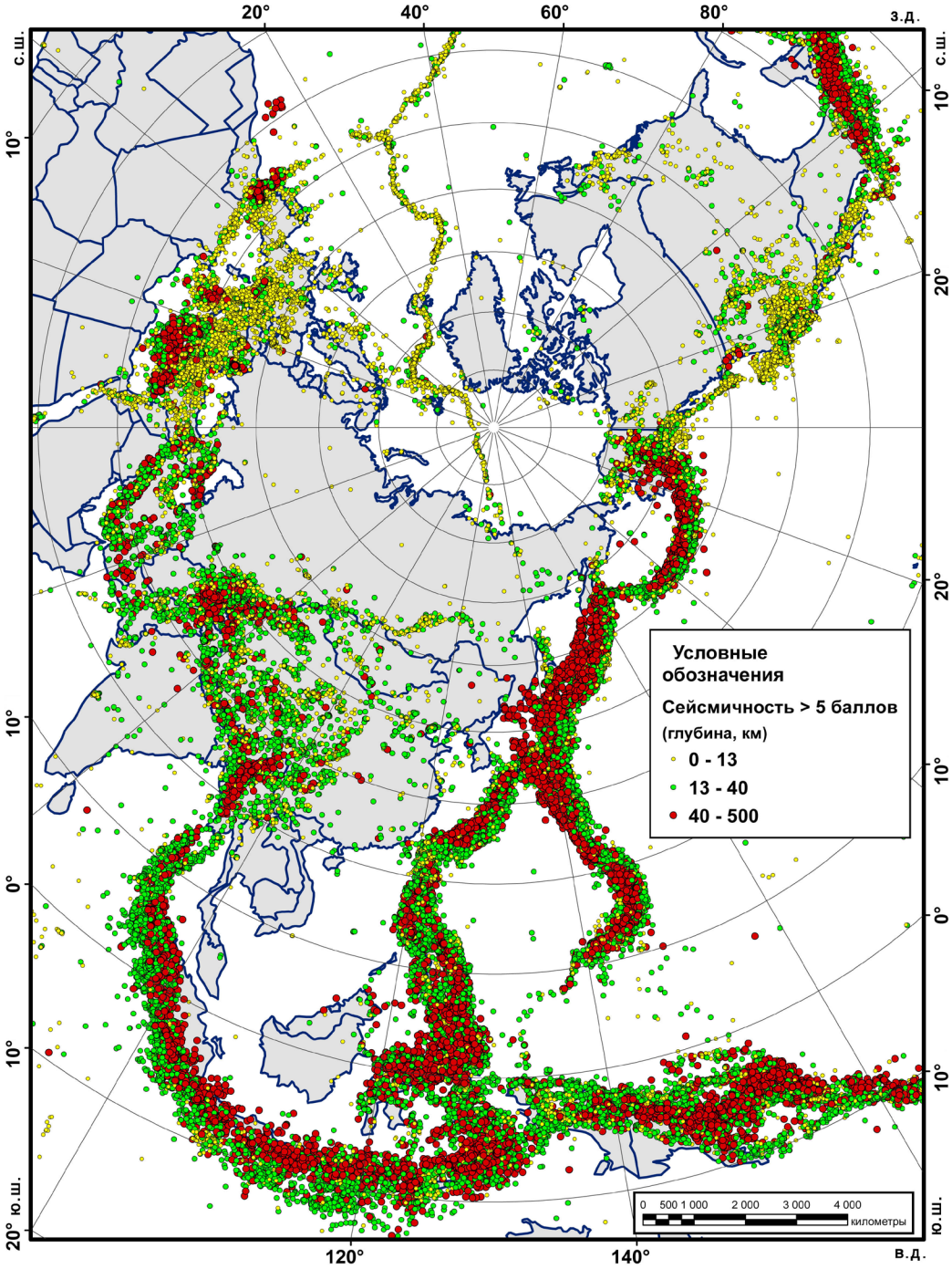

Рис. 4. Сейсмичность в северном полушарии вокруг района головной части ААРС по данным (ANSS, 2014).

1938) и надвигаются на океанические области. Тыловая зона расширяется к полюсу и почти в медианном положении в ней идет проградация ААРС, застопорившаяся в настоящий момент около северо-восточной Евразии с неопределенной и рассеянной траекторией, определяемой по сейсмичности. Также из интенсивности сейсмического процесса видно, что доминирующим является процесс смещения плит от полюса с формированием надвиговых зон, а возникающая в тылу трещина с низкой и мелкофокусной сейсмичностью представляет собой пассивный отклик на раскрывающееся пространство. Процессы, связанные с подъемом вещества вдоль ААРС не могут инициировать настолько значимые геодинамические процессы, которые происходят в передовой части клина, сходящегося к экватору. Отметим, что проградация ААРС обходит области кратонов — Сибирского, Восточно-Европейского и Северо-Американского — как районов, представляющих собой наиболее труднопреодолимый структурный барьер с мощной литосферой. Развитие рифтовой трещины нуждается в пространстве, высвобождаемом при смещении литосферных блоков ортогонально рифту с формированием трансформных сдвиговых разломов. Рис.4 показывает наличие сейсмически активных зон, ортогональных линии продолжения хребта Гаккеля на юг. Это активная зона, включающая Байкал, южная часть Зондского желоба и его восточного продолжения. Кроме того есть признаки синхронного изгиба активных зон Андаманского моря и Желтого моря. Таким образом, полюсобежная тенденция к смещению литосферных плит как активный фактор тектогенеза, действующий на поверхности без непосредственной связи со структурами тепломассопереноса, вполне может быть тем дополнением, которое в совокупности с бесспорными тектоническими факторами формирует поверхностный тектонический результат. Ротационный фактор тектогенеза может быть охарактеризован количественно, но эта задача выходит за рамки данной работы.

ВЫВОДЫ

Атлантико-Арктическая рифтовая система представляет собой длинную, не менее 18 тыс. км, сегментированную структуру, с разновозрастным началом спрединговых процессов, но с общей тенденцией их омоложения в северном направлении, что указывает на направление проградации системы. Пространство мантии под рифтовой системой имеет тенденцию к преобладанию более «холодного» состояния для более древних сегментов и наличию «горячих» линз под молодыми сегментами. Суперпозиция с ответвлениями Африканского суперплюма маскирует детали взаимосвязи термального состояния с возрастом раскрытия сегментов.

Разновозрастный старт спрединговых процессов в сегментах Атлантико-Арктической рифтовой системы указывает на независимое движение фрагментов плит, обрамляющих эти сегменты. Такой характер тектогенеза вдоль дивергентной границы вместе с отображением мантии по данным сейсмотомографии указывает на отсутствие замкнутой конвективной ячейки вдоль этой границы и на наличие дополнительного геодинамического фактора с тангенциальным действием. Этот фактор, возможно, связан не с тепломассопереносом, который находит отображение в данных томографии, а с ротационными явлениями на сфероиде с неравномерными распределением масс.

Анализ пространственного распределения сейсмичности трех геодинамически активных зон — Тихоокеанского пояса, Альпийского пояса и Атлантико-Арктической рифтовой системы — показывает, что действие дополнительного фактора может быть выражено центробежной тенденцией движения плит и их фрагментов от полюсов, которое освобождает пространство для проградации рифта по той траектории, по которой она происходит в настоящий момент с тенденцией на заложение трансформных зон. Продвижение головной части рифта осложнено структурными неоднородностями на его пути и будущая траектория неизвестна. Рифтогенез в этой ситуации является откликом на дрейф плит, а не его причиной. Старт спрединговых процессов инициирует возникновение «горячего» состояния мантии, которое впоследствии остывает.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-05-05888, продолжение разреза атрибута Vp/Vs выполнено частично при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №32 «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации», анализ сейсмичности выполнен частично в рамках темы ГИН РАН «Опасные геологические процессы в Мировом океане: связь с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии и новейшими движениями в океане» (государственная регистрация № 0135-2016-0013).

Список литературы

Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Мелсон В.Г., О'Хирн Т. Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной

части Срединно-Атлантического хребта // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 457–476.

Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю. Геодинамика трех контрастных типов магматизма океана и их отражение в данных сейсмотомографии // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 655–672.

Долицкий А.В. Образование и перестройка тектонических структур. М.: Недра, 1985. 219 с.

Зарайская Ю.А. Сейсмическая активность сильных вулканических извержений ультрамедленных спрединговых хребтов Гаккеля, Юго-Западного Индийского и Рейкьянес // Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2013. Т. V. С. 111–115.

Каримов Ф.Х., Усманов З.Д. Нарушение состояния устойчивого равновесия материальной точки на вращающейся сфере // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: КомКнига, 2007. С. 253–262.

Лукина Н.В., Патык-Кара Н.Г., Соколов С.Ю. Неотектонические структуры и активные разломы Арктического шельфа России // Геология и минеральные ресурсы шельфов России. Атлас / Под ред. М.Н. Алексеева. М.: Научный мир, 2004. Листы 3–3, 3–4.

Мазарович А.Н. Основы геологии СССР. М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1938. 544 с.

Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: КомКнига, 2007. 524 с.

Соколов С.Ю. Новый механизм горизонтального движения тектонически активных масс земной коры и литосферы // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 278–282.

Соколов С.Ю. Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмотомографии и отношению скоростей P и S волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. Вып. 24. С. 55–67.

Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. На пути к постплейт-тектонике // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 7. С. 605–615.

Тяпкин К.Ф., Довбнич М.М. Новая ротационная гипотеза структурообразования и ее геолого-математическое обоснование. Донецк: Ноулидж, 2009. 342 с.

Филатьев В.П. Влияние ротационных эффектов на тектонику планеты (на примере зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану) // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: КомКнига, 2007. С. 341–360.

ANSS Earthquake Composite Catalog. 2014. http://quake.geo.berkeley.edu/anss/, выборка 11.02.2014.

Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2002. V. 3. P. 1–48. doi: 10.129/2001GC000168.

Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu., Sokolov N.S. Migration of the Azores superplume: geophysical and petrologic evidence // Russian Journal of Earth Sciences. 2001. V. 3. № 6. P. 395–404.

Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic Tomography: A snapshot of convection in the Earth // GSA Today. 1997. V. 7. № 4. P. 1–7.

Kaban M. K., Schwintzer P., Artemieva I., Mooney W.D. Density of continental roots: compositional and thermal effects // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 209. № 1. P. 53–69.

Lebedev S., Van Der Hilst R.D. Global upper-mantle tomography with the automated multimode inversion of surface and S-wave forms // Geophysical Journal International. 2008. V. 173. № 2. P. 505–518.

Michael P.J., Langmuir C.H., Dick H.J. et al. Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean // Nature. 2003.V. 423. № 6943. P. 956–961.

Sokolov S.Yu., Sokolov N.S., Dmitriev L.V. Geodynamic zonation of the Atlantic Ocean lithosphere: Application of cluster analysis procedure and zoning inferred from geophysical data // Russian Journal of Earth Sciences. 2008. V. 10. P. 1–30. ES4001, doi:10.2205/2007ES000218.

Taylor F.B. Bearing of the Tertiary mountain belt on the origin of the Earth's plan // Bulletin of Geological Society of America. 1910. V. 21. № 1. P. 179—226. doi:10.1130/GSAB-21-179.

Van der Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R. Evidence of deep mantle circulation from global tomography // Nature. 1997. V. 386. № 625. P. 578–584.

THE ATLANTIC-ARCTIC RIFT SYSTEM: APPROACH TO GEODYNAMICAL DESCRIPTION BASED ON SEISMIC TOMOGRAPHY AND SEISMICITY DATA

S.Y. Sokolov

Geological institute RAS, Moscow, 119017

The Atlantic-Arctic Rift System is a 18 000 km long segmented structure with heterochronous beginning of spreading processes, but with general trend to northward progradation and rejuvenation. Tomography image of the mantle beneath the rift system shows that the «cold» state for older segments predominates. Some characteristics reveal independent movement of plates fragments that frame the segments of the rift system, which shows that there is no closed convective cell along the divergent plate border, but there is an additional geodynamic factor with horizontal component. Spatial distribution of seismicity shows that the influence of additional factor could be expressed in polar run off trend of plates movement, which clears the space for rift system progradation by complicated track with tendency to transform zones formation. Advancing of head rift segment is complicated due to structural heterogeneities of North-Eastern Eurasia. Rifting is the response to plates drift, but not is reason.

Keywords: rift system segmentation, Vp/Vs ratio, seismicity, spreading age.