——— ГЕОЛОГИЯ ——

УДК 551.24.035

СДВИГОВЫЙ ФАКТОР ТЕКТОГЕНЕЗА В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ И ЕГО СВЯЗЬ С ГЕОДИНАМИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ И ВНУТРИПЛИТНЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

© 2018 г. С. Ю. Соколов

Представлено академиком РАН Ю.Г. Леоновым 07.12.2015 г.

Поступило 14.02.2018 г.

Тектогенез сегментов Атлантического океана осложнён вдольосевой разницей полускоростей спрединга, приводящей к дополнительным сдвиговым деформациям между блоками литосферы вдоль трансформных разломов. Интенсивность этих процессов и плотности разломов связана с наличием "холодных" подлитосферных линз вдоль Срединно-Атлантического хребта на глубине 500 км.

DOI: 10.7868/S0869565218050158

Постулат о жёсткости литосферных плит, перемещающихся по поверхности Земли на астеносферном слое с пониженной вязкостью, не отвечает реальному геологическому строению. Как определено в [9], литосфера имеет блоковое и расслоенное строение. Тектоническая активность проявлена не только на границах плит, но и на внутриплитном пространстве. Оценки мощности, необходимой для реализации всей совокупности тектонических процессов в литосфере, дают величину $(1-2) \times 10^{11}$ вт [1], а оценки общей мощности, выделяемой в Земле – $(5,3-7,2) \times 10^{13}$ вт [4]. Энерговыделение превышает потребности известных тектонических процессов в литосфере (включая горизонтальные перемещения плит) более чем на два порядка, и главными становятся задачи о механизмах преобразования энергии в работу по тектонической деформации литосферы на её границах и внутри плит.

Главные механизмы, реализующие в теории движение плит в Атлантике, имеют неочевидные схемы работы. Затягивание субдуцируемой плиты в мантию с наклоном от Срединно-Атлантического хребта (САХ), которое могло бы поддерживать раскрытие океана, отсутствует за исключением дуговых систем морей Скоша и Карибского. Перенос литосферы астеносферным течением должен формировать хорошо распознаваемый динамический рельеф, увязанный с САХ. Но, по [12], динамический рельеф увязан не с САХ, а с изолированными областями восходящих плюмов, не имеющими связи с движением плит от дивергентных границ. Выявленные по данным сейсмотомографии осевые аномалии САХ не прослеживаются глубже 250–300 км [11]. Это создаёт вакуум в обосновании структурообразования САХ и котловин и заставляет искать дополнительный фактор тектогенеза. Таковым может быть ротационный механизм, формирующий объёмные силы с тангенциальной компонентой, действующие независимо на каждый элемент "незакрепленных" плит и блоков [6]. Действие подобных сил может приводить к перемещениям блоков внутри крупных плит и тектоническим деформациям на внутриплитном пространстве, а также формировать условия дифференцированного горизонтального смещения масс.

Индикатор такого смещения внутри плиты – различная скорость спрединга на одновозрастных участках вдоль изохрон параллельно САХ. По [3], значения скоростей спрединга для сегмента южной Атлантики между 12° и 17° ю.ш. при возрастах от современных до 20 млн лет, полученные по линейным зонам аномального магнитного поля (АМП), показывают расхождения кинематики соседних спрединговых сегментов, разделённых трансформными разломами более чем в два раза. При этом вне активных участков разломов происходят сдвиговые деформации в их пассивных частях по обе стороны от САХ, компенсируя дополнительную сдвиговую амплитуду от разницы скоростей. Амплитуда этих сдвигов по мере удаления от САХ затухает на пространстве, соизмеримым со сдвиговым сегментом [8]. Сдвиговые деформации охватывают внутриплитные районы, прилегающие к пассивным частям трансформных разломов, и отражены в осадочном чехле. Свидетельства

Геологический институт Российской Академии наук, Москва E-mail: sysokolov@yandex.ru



Рис. 1. Компиляция геофизических атрибутов вдоль САХ. 1 – положение на оси САХ пересечений с наиболее крупными разломами и их названия; 2, 3 – значения полускоростей спрединга (мм/год) вдоль изохрон 16 и 4 млн лет соответственно, показанные парами для западного (сплошная линия) и восточного (пунктирная линия) флангов САХ, построенные по данным [13] с фильтрацией интервала от 8° ю.ш. до 15° с.ш.; 4 – положение зон с минимальной асимметрией скорости спрединга для районов с достоверной идентификацией линейных магнитных аномалий; 5 – положения пересечений трансформных разломов с САХ с размером символа, линейно-пропорциональным общей длине с пассивными частями, и их огибающая; 6 – вариации *Vp/Vs*, рассчитанные по сейсмотомографическим данным для *P*-, *S*-волн [11, 14], пунктирными кругами обозначены "холодные" аномалии верхней мантии Атлантики под зонами САХ и его флангами.

деформаций в сейсмических записях, которые могут быть сформированы парагенезом сдвиговых зон, в [10], где механизм деформаций трактуется как сжатие и растяжение, ортогональное САХ. Первое предположение о возможной сдвиговой природе внутриплитных деформаций в Атлантике в [2].

Рассмотрим компиляцию геофизических атрибутов вдоль САХ между 55° ю.ш. и 80° с.ш. (рис. 1). Сопоставление атрибутов проведено с разрезом вариации отношения скоростей продольных и поперечных волн *Vp/Vs* от поверхности до подошвы мантии вдоль САХ (рис. 1-6), рассчитанным по методике в [7]. Этот сейсмический атрибут интерпретируется как показатель геодинамической "подвижности" в мантии и его минимумы, обведённые пунктирными областями, соответствуют малоподвижным "холодным" линзам, расположенным в диапазоне 400-700 км. Рис. 1-5 отображает плотность разломных зон вдоль САХ [5] с огибающей кривой. Видны модуляции суммарных длин в виде цепочки максимумов, совпадающих с положением "холодных" подлитосферных линз под САХ. Геодинамическое влияние этих линз на степень тектонической раздробленности литосферы и коры формируется реологическим состоянием мантии в слое мощностью ~300 км непосредственно над разделом 670 км и сохраняется при удалении от САХ в процессе спрединга. Это может быть объяснено тем, что в движение литосферных плит может быть вовлечён более мощный (до 400 км) поверхностный слой, повышенное трение подошвы которого в области "холодных" линз создаёт условие для образования повышенной макротрещиноватости. В пространстве между линзами мантия менее вязкая и число крупных разломов, а также их длина, снижаются.

На рис. 1-2, 1-3 приведены значения полускоростей спрединга вдоль изохрон 16 и 4 млн лет соответственно, показанные парами для западного и восточного флангов САХ по данным [13] без экваториального сегмента Атлантики (ЭСА), который в силу ряда причин содержит сильно фрагментированное АМП. Графики имеют следующие особенности. Заметно увеличение скорости спрединга по мере удаления от полюса вращения плит, разделяемых CAX ($\sim 60^{\circ}$ с.ш.). На этом фоне имеют место локальные вариации полускоростей, достигающие 100% вдоль простирания САХ и 250% в разнице между западным и восточным флангами. Размеры сегментов с локальными вариациями полускоростей сопоставимы с глубинами кровли "холодных" линз.

Проявлена чёткая асимметрия скоростей на западном и восточном флангах (рис. 1-2, 1-3). Она сводится практически к нулевой разнице

в сегментах САХ, положение которых (рис. 1-4) совпадает с "холодными" линзами и максимумами модуляции длин трансформных разломов. Между линзами асимметрия полускоростей спрединга достигает максимальных значений, причём западный фланг САХ в южном полушарии имеет большие значения, чем восточный. Редко встречаются преобладания скоростей и на восточном фланге. Отметим отрицательную корреляцию максимумов полускоростей на западном фланге и минимумов на восточном. Для изохроны 16 млн лет на востоке имеется смещение к северу всей системы данных относительно запада на величину ~120 км, что связано с неортогональной к САХ ориентацией разломов. Для изохроны 4 млн лет этого не наблюдается. Это значит, что суммарная спрединговая аккреция коры, несмотря на асимметрию полускоростей, остаётся более или менее одинаковой и резкого скачка в продуктивности магматизма не наблюдается. В пределах дивергентной границы плит имеются сегменты с различными кинематическими параметрами и преимущественным направлением этого процесса (горизонтальные "клавиши"). Это подтверждает тезис о неоднородной и "нежёсткой" структуре плит и возможности независимого движения частей в их пределах под действием сил объёмного типа с дифференцированной горизонтальной компонентой. Эти процессы усилены в областях между "холодными" линзами и в местах подхода к САХ аномалий типа "плюм".

Сравнение профилей полускоростей (рис. 1-1, 1-2) показывает, что имеются сегменты, где западное преобладание полускоростей претерпело инверсию, и на 16 млн лет преобладание было на восточном фланге и наоборот. Например, сегмент 52°-49° ю.ш. 4 млн лет имел восточное преобладание, но 16 млн лет преобладание было западным. Сегменты 41°-37° ю.ш. и 17°-15° ю.ш., наоборот, 4 млн лет имели западное преобладание полускорости, но 16 млн лет преобладание было восточным. Указанные инверсии имеют место в пространстве между "холодными" линзами. Очевидно, зоны пониженной вязкости мантии усиливают нестабильность и вариации кинематики преимущественного направления процесса аккреции коры по сравнению с "холодными" зонами.

Как было отмечено, при неоднородном профиле скорости вдоль сегментов САХ должны возникать сдвиги между блоками, выраженные деформациями в рельефе кровли базальтового слоя и, соответственно, в покрывающем его осадочном чехле, где он есть. На рис. 2 представлен остаточный рельеф осевой зоны САХ и флангов между 7° и 24° ю.ш., полученный высокочастотной фильтрацией полного рельефа GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean, http://www.gebco.net/, дата выборки 21.08.2013) на 30-секундной матрице



Рис. 2. Остаточный рельеф осевой зоны САХ и флангов между 7° и 24° ю.ш., полученный высокочастотной фильтрацией полного рельефа GEBCO (http://www.gebco.net/, дата выборки 21.08.2013) на 30-секундной матрице значений для длин волн менее 75 км. Жирными линиями показано положение изохроны 16 млн лет с обоих флангов САХ. Среднеквадратичный разброс значений остаточного рельефа составляет ±232 м, минимальные и максимальные значения \sim ±5000 м.

для длин волн <75 км. Для сравнения с рис. 1-1 на рис. 2 показано положение изохроны 16 млн лет. На рис. 2 отчётливо видны троги трансформных разломов, выраженные прямыми аномалиями рельефа, между которыми в межразломных сегментах наблюдаются извилистые дискордантные троги сходной амплитуды. Их траектория не может быть объяснена в рамках общего искривления траектории трансформной зоны при миграции полюса вращения плит. Возможная интерпретация их происхождения – разница скоростей соседних сегментов, приводящая к сдвиговым смещениям вдоль трансформных разломов и сопряжённым зонам растяжения под углами 25-45° к сдвиговому разрыву на прилегающих к нему сегментах с медленной скоростью. Это иллюстрируется в интервале 17°-13° ю.ш. на западном фланге САХ на изохроне 16 млн лет: значение полускорости к югу от 15° ю.ш. (рис. 1-1) превышает полускорость к северу от этой широты при меньшей деформированности высокоскоростного сегмента (рис. 2).

С позиций выравнивания полускоростей спрединга на сопредельных сегментах можно трактовать исчезновение ~ 20 млн лет назад разлома "отшельника", по [2], в пределах интервала $17^{\circ}-15^{\circ}$ ю.ш. на расстоянии ~ 400 км к западу от САХ. При этом северная часть была более скоростной, если судить по наличию дискордантных нарушений в южной. Частая смена относительных скоростных режимов в многочисленных сегментах САХ привела к формированию мозаичной картины рельефа океанического субстрата, представленного чередованием участков с насыщением дискордантными нарушениями и их отсутствием. Таким образом, помимо АМП остаточный рельеф — основа для восстановления детальной кинематической эволюции спредингового субстрата. Данные процессы могут происходить в каждом сегменте литосферы Атлантики, но наличие "холодных" подлитосферных линз и менее вязкой мантии в промежутках между ними может активизировать процессы на этих интервалах и усиливать асимметрию движения.

Средний тепловой поток в зонах с линзами составляет 52, а для промежуточных зон с пониженной вязкостью — 67 мВт/м². Из этого следует, что характеристики поверхностной макротрещиноватости, энерговыделение через поверхность и сейсмотомографические аномалии связаны в более или менее непротиворечивую причинно-следственную цепочку, позволяющую судить о влиянии геодинамического состояния мантии на поверхностные структуры.

выводы

1. Геодинамическое влияние на тектоническую раздробленность литосферы и коры формируется подвижным состоянием мантии на средней глубине ~500 км. В движение может быть вовлечён слой мощностью до 400 км, трение подошвы которого в области "холодных" линз создаёт условие для

повышенной макротрещиноватости. В пространстве между линзами мантия менее вязкая и число крупных разломов снижается.

2. Асимметрия спрединга нивелируется на сегментах САХ, расположенных над "холодными" линзами. Между линзами асимметрия достигает максимальных значений. Сегменты САХ обладают различными кинематическими характеристиками. Это подтверждает тезис о нежёсткой структуре плит. Зоны пониженной вязкости мантии усиливают нестабильность кинематики преимущественного направления спрединга по сравнению с "холодными" зонами.

3. При неоднородном профиле скорости вдоль сегментов САХ возникают сдвиги между блоками, выраженные деформациями в рельефе кровли базальтового слоя. Разница скоростей формирует внутриплитные деформационные структуры, примыкающие к трансформным разломам, которые образуют рисунок дискордантных трогов. Остаточный рельеф отражает кинематическую эволюцию аккреции спредингового субстрата.

4. Поверхностная макротрещиноватость, энерговыделение через поверхность и реологическое состояние мантии связаны в непротиворечивую причинно-следственную цепочку, показывающую влияние глубинной геодинамики на поверхностные структуры.

Работа выполнена в рамках темы госзадания № 01201459183, а также при поддержке грантов РФФИ 15–05–05888, 13–05–12076 офи_м, 14–05–00122.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гогель Ж. Геотермия. М.: Мир, 1978. 172 с.
- 2. *Мазарович А.О.* Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. М.: Науч. мир, 2000. 176 с.
- 3. Мащенков С.П., Литвинов Э.М., Горшков А.Г., Лукашевич И.П. Геофизические критерии выявления региональных обстаноок, благоприятных для образования глубоководных полиметаллических сульфидов. В сб.: Глубинное строение и геодина-

мика литосферы Атлантического и Тихого океанов. М.: Наука, 1992. С. 151–178.

- 4. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М.: Наука, 1988. 1972 с.
- 5. Соколов Н.С. Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси Срединно-Атлантического хребта и преддуговые обстановки на его восточном фланге // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2007. № 6. С. 42–46.
- 6. Соколов С.Ю. Новый механизм горизонтального движения тектонически активных масс земной коры и литосферы. В сб.: Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI Тектон. совещ. М.: Геос, 2008. Т. 2. С. 278–282.
- 7. Соколов С.Ю. Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмотомографии и отношению скоростей Р и S волн // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2 (24). С. 55–67.
- 8. *Тевелев А.В.* Сдвиговая тектоника. М.: Изд-во МГУ, 2005. 254 с.
- 9. *Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
- Equatorial Segment of the Mid-Atlantic Ridge. Initial Results of the Geological and Geophysical Investigations under the EQUARIDGE Program, Cruises of R/V "Akademik Nikolaj Strakhov" in 1987, 1990, 1991. Intergovernmental Oceanographic Commission. Techn. Ser. 46. UNESCO, 1996. 32 p.
- 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. P. 1–7.
- 12. Kaban M.K., Schwintzer P., Artemieva I., Mooney W.D. Density of Continental roots: Compositional and Thermal Effects // Earth and Planet. Sci. Lett. 2003. V. 209. № 1. P. 53–69.
- 13. *Muller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R.* Age, Spreading Rates, and Spreading Asymmetry of the World's Ocean Crust // Geochem., Geophys., Geosyst. 2008. V. 9. № 4. DOI:10.1029/2007GC001743
- 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 // Rus. J. Earth Sci. 2008. V. 10. ES4001. DOI: 10.2205/2007ES000218. P. 1–30.
- 15. Van der Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R. Evidence of Deep Mantle Circulation from Global Tomography // Nature. 1997. V. 386. № 6625. P. 578–584.