УДК 551.24

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РИФТА В ПОЛИРАЗЛОМНОЙ ТРАНСФОРМНОЙ СИСТЕМЕ САН-ПАУЛУ, АТЛАНТИЧЕСКИЙ ОКЕАН

© 2016 г. С. Ю. Соколов¹, Ю. А. Зарайская¹, А. О. Мазарович¹, В. Н. Ефимов¹, Н. С. Соколов²

¹Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 7 ²ООО "Северо-Запад", 117545, Москва, 1-й Дорожный проезд, д. 9 *E-mail: sysokolov@yandex.ru* Поступила в редакцию 07.09.2015 г.

Структура акустического фундамента восточной части полиразломной трансформной системы Сан-Паулу содержит рифтовые палеодолины и палеонодальную впадину, не совпадающие с положением современных активных зон. Данная сдвиговая зона, состоящая и 35-ти разломных трогов, является неустойчивой по положению внутри нее рифтовых сегментов, перескакивавших в ее пределах в соответствии с перераспределением напряжений. В системе Сан-Паулу наблюдается тренд на спрямление трансформного перехода между двумя удаленными сегментами САХ. В восточной части системы выявлены аномальные рефлекторы типа "яркое пятно" на выровненном фундаменте, возникшем в условиях магматизма, отличающегося от обычного, формирующего стандартный грядовый рельеф акустического фундамента. Деформации акустического фундамента носят доселиментационный характер. Современные деформации также имеют место, но меньшей чем в фундаменте амплитуды, и сопровождаются вертикальным акустическим осветлением осадочной толщи. Осевые аномалии Буге САХ на востоке системы имеют продолжение к северу на 120 км от активных сегментов зоны Сан-Паулу. По сейсмичности выделяются активные в настоящее время сегменты спрединговой системы с увеличивающимися с востока на запад амплитудами смещения по разломным трогам. Кросс-корреляция длин активных структурных элементов зоны САХ-сегментов хребта и трансформных зон смещения – позволяет по статистическим характеристикам выделить полиразломные трансформные системы в отдельный тип океанических сдвиговых нарушений.

Ключевые слова: трансформный разлом, полиразломная система, деформации, осадочный чехол, сейсмический разрез, Сан-Паулу

DOI: 10.7868/S0016853X16030115

введение

Тектогенез в зоне Срединно-Атлантического хребта (САХ) формирует систему из двух главных структурных элементов – рифтовой зоны и трансформных разломов. Они, как правило, ортогональны друг другу, сейсмически активны и, по многочисленным данным, включая механизмы очагов землетрясений, сформированы соответственно процессами растяжения и сдвига. Тектогенез субмеридиональных сегментов САХ сопровождается различными явлениями неустойчивости положения центра спрединговой системы: перескоки рифта, перекрытия рифтов, нетрансформные смещения, вдольосевые смещения [1] и прочими. Тектогенез вдоль зон трансформных разломов может сопровождаться сложными деформациями [9], связанными с транспрессионным или транстенсионным режимами (или их чередованеием), а также с изменением направлений векторов и скоростей движения плит, разграниченных разрывом. В случае полиразломной трансформной системы [4], состоящей из трех и более разломных трогов, отстоящих друг от друга на практически одинаковое небольшое расстояние, возникает дополнительный вид неустойчивости — миграция сегментов рифтовой зоны в пределах узкого межразломного пространства полиразломной системы.

Полиразломные системы представляют собой [4] серии субпараллельных сближенных желобов трансформных разломов с общей шириной в первые сотни миль. Они образуют весьма сложные по своей морфологии участки океанического дна, по крайней мере, двух классов. Для первого характерно большое количество поперечных и медианных хребтов (Архангельского–Долдрамс– Вернадского–Богданова), во втором эти образования отсутствуют (Сан-Паулу). Подобные образования было предложено считать особым типом границ плит (multifault transform plate



Рис. 1. Район полиразломной трансформной системы Сан-Паулу и схема работ 7-го рейса НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1988). На врезке – положение основного планшета в Атлантике относительно САХ. Жирными линиями выделен полигон в восточной части разломной системы Сан-Паулу, пунктирным кругом – 200-мильная экономическая зона Бразилии вокруг о. Св. Петра и Павла. Изобата отсечения вулканических гор и возвышенностей хребта – 2500 м. Номера в квадратах указывают на положения сейсмических разрезов на рис. 8–11

boundary) [16]. Внутри полиразломных систем (разломные зоны Сикейрос (Тихий океан, [14]), Эндрю Бейн (Индийский океан, [21]), Сан-Паулу (Атлантический океан, [11]) могут быть сформированы наложенные спрединговые центры [14], со специфическим характером магматизма (разлом Гарретт (южная часть Тихого океана)) [24]. В настоящей работе акцент сделан на изучении полиразломных систем второго класса на примере системы Сан-Паулу.

В Атлантическом океане существует несколько полиразломных и сдвоенных трансформных систем (Сан-Паулу, Романш, Архангельского-Долдрамс-Вернадского, Чарли-Гиббс и т.д.) и большинство из них приурочено к областям максимального субширотного смещения главной зоны САХ в приэкваториальной зоне (рис. 1, картаврезка) и проявлениям холодной верхней мантии по данным сейсмотомографии [8]. Отмечается также, что границы холодных зон в верхней мантии совпадают с главной сегментацией Атлантики по возрасту начала спрединговых процессов после распада суперконтинента. Полиразломная система Сан-Паулу (см. рис. 1) является наиболее ярким примером данного явления и ее восточная часть изучалась в 7-м рейсе ГИН РАН на НИС "Академик Николай Страхов" площадной геофизической съемкой (начальник рейса – Г.Б. Удинцев) [5]. Целью настоящей работы является описание вышеуказанной неустойчивости в полиразломной системе по материалам многолучевой батиметрии, сейсмичности, распределению осадочного чехла, гравитационным аномалиям Буге и данным донного опробования.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВДОЛЬ САХ

Оцифровка сегментов САХ и зон смещений трансформных разломов проводилась по 18-й версии грида альтиметрии [20]. Рифтовые сегменты и офсетные зоны разломов являются активными структурными элементами САХ, и их пространственное распределение и частота встречаемости являются основными характеристиками, включенными в общую сегментацию САХ. Последняя основывается на вариации некоторых геологогеофизических характеристик: возраст старта спрединга и геохимические аномалии магматических пород [2]. Границы наиболее крупных разделов в этих схемах сегментации разделены особо протяженными трансформными разломами. Кроме того, сходная по геометрии сегментированность вдоль зоны САХ прослеживается по





Рис. 2. Распределение числа сегментов CAX менее 230 км по длинам по интервалам 5 км. Все сегменты с большей длиной имеют частоту встречаемости равную 1 в интервале оценки

данным сейсмотомографии в верхней мантии [8]. Но существенным признаком всех схем является построение иерархии, то есть определяется принцип, по которому происходит объединение сегментов САХ в более крупные цепочки. В основном превалируют структурные признаки (размеры сегментов САХ или офсетных зон) либо вдольосевые вариации геофизических параметров [1], несмотря на то, что "домены нулевого уровня" обоснованно выделяются по другим параметрам. Таким образом, построение иерархии является сложной многофакторной задачей и в данной работе не рассматривается. Исследование локальной неустойчивости опирается не на способы объединения, а на общие статистические характеристики первичных активных элементов и проблемы построения иерархии не касается.

Показано распределение количества сегментов САХ длиной менее 230 км по интервалам 5 км (рис. 2). Отметим, что нетрансформные смещения САХ не рассматривались как границы сегментов. Анализировались только трансформные разломы с четко выраженной зоной смещения. Основные частоты фрагментации САХ с некоторой генерализацией представлены тремя группами в диапазонах 20-55, 55-160 и 160-300 км. Сегменты САХ большего размера в количестве 12 из 83 (общее число) длиной более 300 км составляют протяженность 7920 из 16100 км (около 50%) общей длины САХ. Наиболее крупные из них, при отсутствии внутри офсетных зон и наличии нетрансформных смещений, приходятся на области, в которых к САХ подходят ответвления плюмовых аномалий сейсмотомографии в мантии (Исландский, Азорский, Вознесения, Гоф-Тристан-да-Кунья). Таким образом, интерпретация их происхождения приобретает четкий физический смысл: плюмовые зоны менее вязкие и в них чаще встречаются нетрансформные смещения и реже трансформные зоны (или вообще не встречаются). Внутри первого самого многочисленного диапазона выделяются две группы со средними интервалами 25 и 40 км. Сходные значения фрагментации, имеющие псевдопериодический характер вдоль осевой зоны, распространены также и в северной части Индийского хребта и Юго-Западного Индийского хребта.

Распределение офсетных зон (рис. 3) носит асимметричный характер (как и в распределении сегментов САХ), но без выраженной полимодальности, хотя признаки дополнительных максимумов имеются. Значение главного максимума встречаемости составляет около 22 км, что близко к значениям первого максимума встречаемости сегментов САХ – 25 км. Максимум фрагментации по зонам растяжения совпадает с максимумами фрагментации по зонам сдвига.

Представлена кросс-корреляция протяженности сегментов САХ и офсетных зон трансформных разломов (рис. 4). Сопоставление указанных параметров осуществлялось между разломами и сегментами, расположенными от них к северу. На рисунке не приведен разлом Романш со смещением около 750 км, которое является уникальным и не вписывается в основное облако значений. Показаны пространственные группы разломов со смещениями 10-80, 90-185 и 240-400 км. Пунктирные линии разделяют три группы длин сегментов САХ в диапазонах, указанных выше. Названы элементы с длинными (более 300 км) сегментами САХ. Все они являются уникальными и совпадают с "горячими" сейсмотомографическими аномалиями (рис. 5), что видно по положению центров сегментов САХ с большой длиной.

Прежде всего, необходимо отметить наличие 2D сегментации облака точек на кросс-корреля-



Рис. 3. Распределение числа офсетных зон трансформных разломов с длинами менее 200 км по интервалам 7 км. Все сегменты с большей длиной имеют частоту встречаемости равную 1 в интервале оценки



Рис. 4. Кросс-корреляция длин сегментов САХ и длин офсетных зон трансформных разломов. Рамками выделены пространственные группы по длинам офсетов. Пунктирными линиями показано разделение групп длин сегментов САХ. Даны названия элементов с длинными (более 300 км) сегментами САХ



ГЕОТЕКТОНИКА

Nº 3



ции (см. рис. 4) по три группы на оба параметра. Вдоль оси САХ в пределах первой группы протяженности смещений представлены компактными группами, совпадающими с одномерным распределением сегментов САХ (см. рис. 2). В направлении длин офсетов также появляется разделение на три группы, причем по диапазонам с сопоставимыми размерами, но с большим пустым интервалом между 2-й и 3-й группами – от 185 до 240 км. Сходная геометрия частот фрагментации по структурам растяжения и сдвига может говорить об одинаковой средней по времени величине главных напряжений в зоне тектогенеза САХ, но анализ причин обнаруженной характеристики не входит в задачи данной работы.

Для анализа неустойчивости в полиразломных системах существенно следующее. Наибольшее число событий на кросс-корреляции (см. рис. 4) сосредоточено в самом коротком интервале сегментов САХ от 20 до 55 км и более или менее равномерно распределено по диапазону длин офсетных частей трансформных разломов 10-80 км. Учитывая, что сегменты САХ с такой длиной формируют компактно расположенные цепочки, в особенности в экваториальной Атлантике, можно считать, что эта группа представляет в основном полиразломные трансформные системы, в которых короткий шаг по сегменту САХ сочетается с в 2-3 раза более длинным шагом в зонах смешения. Статистические характеристики позволяют таким образом выделить эти системы в отдельный тип трансформных нарушений. четко обособленный на графике геометрических характеристик. Наиболее ярким примером такой системы является Сан-Паулу (см. рис. 1). Учитывая гипотезу о существовании спрединговых сегментов [1], в которых имеют место вдольосевые процессы, ограниченные в пространстве офсетными зонами, нам придется сделать предположение, что в случае полиразломных систем спрединговые сегменты должны иметь около 25 км по ширине и около 150 км по глубине. Эта глубина для вещества мантии, находящегося в частично расплавленном состоянии, определяется по глубине осевой аномалии вариаций скоростей S-волн, оценка которой по мере повышения точности современных сейсмотомографических моделей приближается к отметке 100-150 км [17]. При соотношении размеров спредингового сегмента 1 к 6 конвективный механизм является неустойчивым [12], поэтому существование типичного и самостоятельного конвективно-спредингового процесса в трех измерениях в ячейке размером 25 км и глубиной 150 км маловероятно. Скорее всего, короткие сегменты САХ в полиразломных системах показывают текущее положение зоны растяжения в широкой сдвиговой зоне и не обязательно совпадают в плане с положением центра мантийного апвеллинга.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК САХ С СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКИМ РАЗРЕЗОМ

Характеристики структурных элементов САХ, имеющие фрагментацию, измеренную по батиметрическим данным и описанную выше, отражают глубинное состояние верхней мантии. Представлена корреляция (см. рис. 5) этих характеристик и разрез вариации отношения скоростей Vp/Vs по данным [8], рассчитанный по сейсмотомографическим моделям [10, 15, 23]. Пунктирными кругами обозначены "холодные" аномалии верхней мантии в экваториальной и северной Атлантике, совпадающие с интервалами максимального субширотного смещения зоны САХ.

Сопоставление позволяет увидеть следующие закономерности. Протяженные (более 300 км) сегменты САХ (см. рис. 5-I) совпадают с "горячими" сейсмотомографическими аномалиями (см. рис. 5-V), что видно по положению центров сегментов САХ с большой длиной. Особенно много таких сегментов расположено в области подхода Исландского и Азорского плюмов к САХ и в области южного ответвления Африканского суперплюма. Положения зон смещений трансформных разломов (см. рис. 5-II) соответственно разграничивают положения сегментов САХ и их максимальная концентрация наблюдается в интервалах, где сосредоточено много коротких сегментов. В экваториальной и северной Атлантике компактные группы разломов расположены над "холодными" аномалиями верхней мантии в местах максимального субширотного смещения САХ. Наиболее ярким примером такого смещения является пара разлома Романш, состоящего из 2 трогов, сходящихся на западе, и полиразломной системы Сан-Паулу. К северу между 7° и 9° с.ш. это смещение над "холодным" блоком верхней мантии представлено полиразломной Архангельского-Долдрамс-Вернадсистемой ского и к северу до 11° с.ш. группой сдвоенной системы разломов Марафон-Меркурий и разлома Вима. В северной Атлантике над "холодной" аномалией смещение САХ происходит по сдвоенной разломной системе Чарли-Гиббс. За аномалией Исландского плюма также есть сочетание "холодной" мантии и разломов с большим смещением – Ян-Майен и Шпицбергенского. Таким образом, большое смещение над "холодной" мантией может быть выражено обычными трансформными смещениями, но чаще оно распадается на сдвоенные и полиразломные системы.

На (рис. 5-III) представлено положение зон с аномальным сочетанием редукций гравитационного поля — максимальным значением аномалии Буге и минимальным значением изостатической аномалии, полученных при помощи площадного кластерного анализа [6, 22]. Подобное сочетание указанных параметров существует, как правило, в преддуговых зонах, когда обширные надвиговые явления в области дуг приводят к формированию перед их фронтом зон с увеличенным недостатком масс при увеличенной аномалии Буге на участке литосферы, максимально удаленном от центра спрединга. Возможно, это происходит изза наличия существенной субмеридиональной компоненты современных движений, приводящей к возникновению субширотных зон с активацией напряжений сжатия [7], и соответствующих деформаций. На такую возможность указывают современные данные наблюдений GPS на прилегающих континентах [25]. Поскольку речь идет о зонах, коррелируемых с разломными системами, то субмеридиональное сжатие может привести к существованию транспрессионных условий вдоль разломов, включая их пассивные части. Общие длины последних показаны на рис. 5-IV по данным [6] вместе с огибающей кривой. Хорошо видно, что концентрация макротрещиноватости в виде трансформных нарушений коррелируется с зонами, сответствующими указанному выше сочетанию гравитационных редукций. Совпадение плотности разломных зон (с пассивными частями) вдоль САХ с косвенными признаками субмеридионального сжатия говорит о наличии дополнительного фактора, определяющего характеристики главных структурных элементов САХ. Полиразломная система Сан-Паулу вместе с разломом Романш находится в пределах экваториальной "пульсации" параметров, показанных на рис. 5-III, IV.

СЕЙСМИЧНОСТЬ АКТИВНЫХ УЧАСТКОВ ПОЛИРАЗЛОМНОЙ СИСТЕМЫ САН-ПАУЛУ

Анализ сейсмичности активных участков полиразломной системы Сан-Паулу показал особенности пространственно-временного и частотно-магнитудного распределения землетрясений в районе. Сведения о сейсмических событиях с магнитудой $m_b > 3$ взяты из он-лайн каталога ANSS [26]. Данные содержат дату события с точностью до десятой доли секунды, координаты, значение магнитуды и индекс, обозначающий уравнение, по которому она рассчитывалась, количество станций, зарегистрировавших землетрясение, идентификационный номер события, среднеквадратическую погрешность и региональный каталог, предоставивший информацию. По точности определения координат часть землетрясений не удовлетворяет требованиям исследования. В анализируемую выборку вошли события с 1979 по 2015 гг. (рис. 6А, Б). За этот период в рассматриваемом районе зарегистрировано 212 событий, удовлетворяющих условиям анализа. Диапазон магнитуд в выборки составляет 3.9-5.8 с пиком событий с магнитудой 4.7. Подобное распределение событий по магнитуде свойственно

ГЕОТЕКТОНИКА № 3 2016

трансформным системам САХ, где наблюдается увеличение количества землетрясений с магнитудой больше 5.

В пределах рассматриваемой территории рифтовая долина САХ неоднократно смещается системой трансформных разломов Сан-Паулу в западном направлении (см. рис. 6А). Пространственная структура проявлений землетрясений маркирует активные участки разломов и сегментов САХ, что позволяет дешифрировать современную конфигурацию спрединговой зоны. Амплитуда смещений с юга на север по трансформным разломам увеличивается в западном направлении. Южное смещение имеет амплитуду 36 км, далее следует 20-километровый отрезок рифтовой долины, следующий отрезок смещается на 92 км, и рифтовая долина протягивается на 28 км, западнее располагается трансформное смещение протяженностью 130 км и участок рифтовой долины в 28 км, самый северный трансформный разлом имеет протяженность 200 км. Он наиболее сейсмически активен. Наиболее сильные события происходят в пределах трога, тогда как события средней магнитуды сконцентрированы на южном борту разлома. Трансформный разлом со 130-километровым смещением, наоборот, характеризуется сниженной сейсмической активностью. Следует отметить единичные события, проявляющиеся в зоне неактивных частей трансформных разломов. Восточный и центральный участки рифтовой долины отличаются сниженной сейсмической активностью, тогда как западная рифтовая долина характеризуется повышением сейсмической активности. По геологическим данным [18], именно в этой части разломной системы происходит смена положения активной части разлома от трога, расположенного к югу от о. Св. Петра и Павла к трогу на севере от него и являющимся 5-м по счету в полиразломной системе. Короткие отрезки сегментов САХ не имеют сейсмичности, отличающейся по интенсивности от разломной. Данные о механизмах очагов, взятые из каталога Harvard CMT [27], представлены на рис. 6В. На всем протяжении разломной системы Сан-Паулу, включая сегменты САХ, практически отсутствуют сбросы, характерные для растяжения в рифтах. В западном сегменте их всего три, причем два ориентированы косо к азимуту структуры. Центральный не имеет признаков очагов с растяжением, а восточный, как и западный – только три. Наблюдаются цепочки сдвиговых механизмов косой северо-западной и северо-восточной ориентации по направлениям, свойственным сколам Риделя, и пересекающим более одного трога. Это говорит о пространственном мозаичном характере напряжений в широкой полиразломной системе и появлении в ней косоориентированных активных зон, секущих главные структурные элементы. На западе в самой активной зоне перехода от 4-го к



Рис. 6. Сейсмичность трансформной системы Сан-Паулу. А – эпицентры землетрясений на батиметрической карте района (магнитуда землетрясений обозначена размером и оттенком серого кружков) [26]. Б – пространственно-временно́е распределение сейсмичности в районе (вертикальные линии отмечают положение рифтовых сегментов). В – механизмы очагов [27]

5-му трогу наблюдаются субмеридиональные надвиговые механизмы.

АНОМАЛИИ БУГЕ И ВУЛКАНИЗМ

При расчете мантийных аномалий Буге (на основе обычных аномалий Буге) глубина границы М оценивалась как сумма рельефа, мощности осадочного чехла и кристаллического слоя постоянной мощности 6000 м. Разница плотностей корамантия полагалась равной 0.5 г/см³. Термальная коррекция не проводилась. Главной особенностью данной редукции поля силы тяжести в океане является наличие осевой аномалии под САХ, являющейся индикатором присутствия прогретого и частично расплавленного вещества мантии, приводящего к разуплотнению среды и формированию минимумов вдоль этой структуры. Осевая



Рис. 7. Аномалии Буге в районе полиразломной трансформной системы Сан-Паулу и активные элементы САХ. Диапазон значений аномального поля в пределах 360–580 мГал (от светлого к темному). Главные изодинамы имеют значения 440, 490 и 540 мГал. Пунктирным кругом – 200-мильная экономическая зона Бразилии вокруг о. Св. Петра и Павла

аномалия Буге под САХ к югу от системы Сан-Паулу (рис. 7) имеет продолжение на север до широты 1°50' с.ш. приблизительно вдоль меридиана 25° с.ш., и на ее окончании наблюдается симметрично распределенный в субширотном направлении кластер вулканических гор, проявленный локальными минимумами в значениях аномалии Буге по изодинаме 440 мГал и указывающий на возможность формирования парных образований типа "бычьи глаза" от локальных импульсов магматизма. Подобное продолжение осевого минимума на абиссаль явление редкое. Сходные вулканические образования составляют основу хребта Ресёрчер (к югу от разлома Зеленого мыса), но смещены в среднем на 250 км к западу от линии оси САХ. Прослеживание в аномальном поле 4-го (с юга) разломного трога вплоть до оси вулканического кластера показывает возможное положение зоны трансформного смещения. По данным возрастов магнитных аномалий [19] продолжение оси САХ около вулканического кластера может иметь возраст около 25 млн лет. Таким образом, конфигурация аномального поля показывает возможное положение палеооси САХ и указывает на пространственное смещение активных спрединговых элементов в запад-северо-западном направлении. По данным донного опробования этого района (станция S07-38) с южного подножия одной из отмеченных вулканических построек (см. рис. 7) были подняты базальты и брекчии вулканического стекла, что, по мнению авторов, может указывать на внеосевой магматизм.

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

Восточная часть полиразломной системы Сан-Паулу была изучена в 7-м рейсе ГИН РАН на НИС "Академик Николай Страхов" (см. рис. 1) площадной геофизической съемкой, в которой использовался метод непрерывного сейсмического профилирования – НСП [13]. Полигон был выбран таким образом, что покрывает наиболее сложную часть системы и область продолжения гравитационного минимума к северу от САХ. Представлены профили (см. рис. 8–11), иллюстрирующие важные для темы работы особенности волнового поля. Выбрано по два профиля в западной части полигона (см. рис. 8, 9) и в восточной (см. рис. 10, 11) на линии продолжения САХ.

Особенностью профилей является наличие аномалий типа "яркое пятно" в подошве чехла. Обычно океанический базальтовый фундамент формирует волновое поле акустического фундамента как суперпозицию гипербол рассеяния от неровностей фундамента. На приведенных профилях обнаружены рефлекторы фундамента достаточно выровненные и обладающие увеличенной отражающей способностью до такой степе-



Рис. 8. Профиль S07-SP-01a. 7-й рейс НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1988). Положение профиля указано на рис. 1. Стрелкой показаны аномалии записи типа "яркое пятно"



Рис. 9. Профиль S07-SP-08. 7-й рейс НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1988). Положение профиля указано на рис. 1. Стрелкой показаны аномалии записи типа "яркое пятно"



Рис. 10. Профиль S07-SP-18. 7-й рейс НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1988). На врезке – фрагмент записи с выходом флюидов над "ярким пятном" фундамента. Положение профиля указано на рис. 1. Стрелкой показаны аномалии записи типа "яркое пятно"



Рис. 11. Профиль S07-SP-20. 7-й рейс НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1988). Положение профиля указано на рис. 1. Стрелкой показаны аномалии записи типа "яркое пятно"

ни, что в кратных отражениях (см. рис. 8, 9, 11) амплитуда сопоставима с донным отражением от поверхности осадков. Подобная волновая картина соответствует не столько "гребневидному" магматическому фундаменту, сформированному в условиях медленного спрединга САХ, сколько достаточно быстро сформированным обширным площадям магматического вещества. Это могут быть либо излияния типа покровных базальтов (небольших траппов), либо эффузивные образования, в которых отсутствует типичная для САХ морфология рельефа акустического фундамента, а выровненная поверхность вулканогенного вещества формирует когерентное отражение с большей амплитудой, чем обычный фундамент. Наиболее интенсивные отражения этого типа наблюдаются в середине профиля (см. рис. 11), который расположен практически на линии северного продолжения САХ. До субширотной вулканической гряды от "ярких пятен" этого профиля около 70 км. Это показывает, что явления продуктивного магматизма сосредоточены не только вдоль гряды гор, выраженных минимумами аномалий Буге (см. рис. 7), а к югу от них. Неясным является вопрос, откуда в сегменте САХ с блоком холодной верхней мантии под ним и отсутствием сейсмотомографических аномалий типа "плюм" возник источник продуктивного магматизма, но в настоящей работе этот вопрос не обсуждается.

От восточного профилия (см. рис. 11) к западному (см. рис. 8) наблюдается постепенное смещение "ярких пятен" на север от 1-го и 2-го трога системы (см. рис. 11) к 3-му и 4-му (см. рис. 9) и 4-му и 5-му (см. рис. 8). Также наблюдается закономерное увеличение покрывающей "яркие пятна" мощности осадков от 200 мс (см. рис. 11) до 800 мс (см. рис. 8). Если предположить равномерные во времени и пространстве скорости осадконакопления, то это показывает пространственное смещение источника магматизма во времени с севера на юг. Но, поскольку наличие осадочных "карманов" с мощностью до 800 мс всего в 100 км от активной зоны САХ показывает разнообразие и сложность условий осадконакопления, гарантированно утверждать о южном смещении во времени мы не можем. На профилях (см. рис. 9–11) видны все 5 трогов полиразломной системы. Они активны в настоящее время и содержат минимальное количество осадков или не содержат их вообще. Большинство северных бортов межразломных поднятий имеют более пологий наклон и на разрезах представлены квестоподобными формами рельефа. Значительная часть осадочного чехла, заполняющая активные и неактивные троги, залегает субгоризонтально и была накоплена после формирования основных деформаций (см. рис. 9, 11), вероятно, возникших в условиях транспрессии в широкой сдвиговой зоне. Это означает, что деформации имеют доседиментационное происхождение. На профиле (см. рис. 9) тем не менее осадочный чехол 5-го трога деформирован с формированием наклона так же, как и осевые "яркие пятна" (см. рис. 11). Эти деформации и ряд мелких нарушений в 3-м троге (см. рис. 10 и 11) являются современными и сопровождаются акустическим осветлением осадочной толщи в форме вертикальных полос шириной от 100 до 500 м. Это говорит о поступлении флюидов в осадки. Причинами этого явления могут быть либо активный в настоящее время магматизм, либо процессы серпентинизации ультраосновных пород, получивших контакт с водой в разломной системе. Приведен пример выхода флюидов на поверхность (см. рис. 10, на врезке). Он расположен непосредственно над "ярким пятном" выровненного фундамента, от которого к поверхности подходит вертикальная акустически мутная зона, выходящая на поверхность в виде слабых гипербол рассеяния и осветления донных отражений. Волновое поле этого выхода флюидов к поверхности отличается от типичных записей с акустическим осветлением, в связи с чем возможным вариантом интерпретации его происхождения будем считать активный магма-Обычные вертикальные акустические тизм. осветления во 2-м и 3-м трогах (см. рис. 9-11) отнесем к самому распространенному виду этих аномалий, имеющему интерпретацию выхода газообразных продуктов серпентинизации [3]. Таким образом, сейсмические записи показывают наличие доседиментационных зон магматизма, формирующего аномальный акустический фундамент вне современных активных сегментов САХ, а также два этапа деформаций океанической коры – доседиментационный и современный.

СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА

Данные НСП 7-го рейса ГИН РАН на НИС "Академик Николай Страхов" были использованы для построения карты мощностей осадков масштаба 1:650000 [5]. Вычитание цифровой модели мощности осадочного чехла из рельефа позволило получить карту рельефа акустического фундамента (см. рис. 12). В северо-восточной части полигона между вулканическими горами после снятия осадков с максимальной мощностью до 1100 м обнаружена впадина по расположению и морфологии имеющая признаки нодальной с глубинами до 4900 метров. Она находится на линии северного продолжения сегмента САХ, в пределах которой находится наиболее сильное "яркое пятно" (см. рис. 11). Квестоподобная форма рельефа межразломных хребтов и небольшая мощность (до 250 м) субгоризонтально залегающих на них осадков говорит о том, что формирование выровненного магматического фундамента и потеря сегментом активного статуса шли одновременно с деформациями, после ко-

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РИФТА



Рис. 12. Рельеф акустического фундамента в районе работ 7-го рейса НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1988) на полигоне в восточной части политрансформной системы Сан-Паулу. Значения рельефа находятся в пределах от –5370 до –700 метров. Изогипсы проведены через 500 м

торых в уже неактивном сегменте осадочный чехол сформировал заполнение углублений фундамента. Вероятно, изменение режима напряжений в полиразломной системе привело к перемещению активного сегмента на запад в более ослабленную зону. Также отметим, что квестоподобные формы фундамента встречаются на субширотном профиле вдоль активной части трога 2 с пологим восточным бортом. Это показывает сложный характер деформаций, формирующих упомянутые структуры как на субмеридиональных, так и на субширотных профилях. Кроме палеонодальной впадины рельеф акустического фундамента в северо-западной части полигона содержит палеосегмент рифтовой долины между 4-м и 5-м трогами, которая была обнаружена после снятия осадочной мошности около 500 м. Между его палеонодальной впадиной в 4-м троге и современной нодальной впадиной 4-го трога расстояние около 160 км, что говорит о том, что перескоков сегментов САХ с востока на запад могло быть несколько в пределах участков дна, очерченных линеаментами трогов полиразломной системы. В юго-восточной части полигона также наблюдается палеосегмент САХ, но между ним и активным сегментом 1-го и 2-го трогов расстояние всего около 50 км. Таким образом, рельеф акустического фундамента показывает фак-

ГЕОТЕКТОНИКА № 3 2016

ты перескока активных частей САХ. Они могли проходить в несколько стадий, и если принять точку зрения о пропорциональности мощности осадков к их возрасту, то направление возникновения новых активных элементов было с севера на юг.

СИНТЕЗ

Изложенные выше данные о политрансформной системе Сан-Паулу и результаты их анализа позволяют сделать следующее обобщение. Приведена карта района полиразломной системы Сан-Паулу (5 разломных трогов) с элементами интерпретации геодинамики (см. рис. 13). В пределах субпараллельных трогов вдоль их простирания происходят перескоки коротких сегментов рифта на расстояния, превышающие длину этих сегментов. Троги полиразломной системы задают рамки перескоков, внутри которых мгновенное положение рифтовых сегментов является неустойчивым и может измениться в зависимости от перераспределения напряжений. В обстановке транспрессии сегменты рифта меняют положение на более соответствующее текущей картине напряжений в сложной системе, состоящей из мелких (20-40 км) блоков. В экваториальной Атлантике рифтовые сегменты САХ смещаются по-



Рис. 13. Схема миграции активных сегментов САХ в полиразломной системе Сан-Паулу *1–3* – сегменты: *1* – активного рифта, *2* – активного трансформного разлома, *3* – палеорифта; *4* – возможная траектория перескока рифта; *5* – палеонодальная впадина, заполненная осадками (>1100 м); *6* – крупные вулканические постройки; *7* – траектория современного перескока активных сегментов трансформного разлома [18], *8* – экономическая зона Бразилии, *9* – скалы Святых Петра и Павла

лиразломной системой трансформных разломов Сан-Паулу с севера на юг и в западном направлении с увеличивающейся амплитудой смещения (см. рис. 13). Современные землетрясения маркируют активные участки разломов. По литературным данным [18] в настоящее время происходит перескок активного сдвигового сегмента из 4-го трога к югу от скал Св. Петра и Павла к 5-му на севере от них, что приводит к смене принадлежности этой суши от Африканской плиты к Южно-Американской.

Таким образом, при субмеридиональном перекрытии на 120 км двух крупных спрединговых сегментов – от Сан-Паулу на западе до вулканических гор на востоке – система активных спрединговых элементов перестраивается таким образом, чтобы переход между их окончаниями был кратчайшим в широтном направлении. Наблюдается также тенденция на спрямление трансформной зоной перехода между крупными сегментами САХ. Аналогичное простирание и шаг в полиразломных трансформных системах наблюдается к северу от данного района в системах разломов Архангельского–Долдрамс–Вернадского и сдвоенной системы Марафон–Меркурий и определяется макроскопической кинематикой плит.

выводы

1. Кросс-корреляция длин активных структурных элементов зоны САХ – сегментов хребта и трансформных зон смещения – показывает, что основная частота событий на кросс-корреляции сосредоточена в самом коротком интервале сегментов САХ от 20 до 55 км и равномерно распределена по диапазону длин активных частей трансформных разломов 10-80 км. Сегменты САХ с этими параметрами формируют в экваториальной Атлантике компактно расположенные цепочки, которые представляют собой полиразломные трансформные системы. В них короткий шаг по сегменту САХ сочетается с в 2-3 раза более длинным шагом в зонах смещения, и это сочетание периодически повторяется. Статистические характеристики позволяют выделить эти системы в отдельный тип трансформных нарушений.

2. Полиразломные и сдвоенные трансформные системы между сегментами, где ось САХ приобретает максимальное субширотное смещение и в верхней мантии по данным сейсмотомографии наблюдаются "холодные" блоки. С проявлением трансформных систем такого вида также связана повышенная плотность общих длин разломов, включая пассивные части, и по косвенным признакам — наличие зон с субмеридиональной компонентой сжатия, приводящей к возникновению транспрессионого режима вдоль разломов.

3. Сейсмичность выделяет активные в настоящее время сегменты спрединговой системы с увеличивающимися с востока на запад амплитудами смещения по разломным трогам. Вся зона практически не содержит событий с механизмами сброса и представлена линейными группами сдвиговых событий, часто объединенных в косоориентированные к главным элементам цепочки.

4. Осевые аномалии Буге САХ имеют продолжение к северу на 120 км от активных сегментов зоны Сан-Паулу и оканчиваются субширотной зоной вулканических построек.

5. Данные сейсмопрофилирования показывают наличие аномальных рефлекторов типа "яркое пятно", которые соответствуют выровненному магматическому фундаменту, возникающему в условиях продуктивного магматизма, отличающегося от обычного для медленно-спрединговых зон. Эти аномальные рефлекторы перекрыты осадочным чехлом с уменьшающейся к югу мощностью и преимущественно горизонтально залегающим. Деформации акустического фундамента в основном носят доседиментационный характер. Современные деформации также имеют место, но меньшей чем в фундаменте амплитуды, и сопровождаются вертикальным акустическим осветлением осадочной толщи. Имеются признаки поступления флюидов в водную толщу.

6. Структура акустического фундамента содержит сегменты рифтовых палеодолин и палеонодальную впадину, не совпадающие с положением современных активных зон. Расположение палеоформ показывает, что перескоки рифтовых и соотвественно сдвиговых сегментов могли проходить в несколько этапов.

7. Полиразломная трансформная система с 5-ю трогами, кроме сдвиговой компоненты движения находящаяся под воздействием субмеридионального сжатия, возможно переменного во времени и по направлению, является неустойчивой по положению внутри нее рифтовых сегментов, которые могут перескакивать в ее пределах в соответствии с перераспределением напряжений и образованием более оптимальных условий рифтинга в другом положении. В полиразломной системе Сан-Паулу наблюдается тренд на спрямление трансформного перехода между двумя удаленными сегментами САХ.

Авторы благодарны экипажу НИС "Академик Николай Страхов" за самоотверженную работу в тяжелых условиях, в которых был получен использованный в статье материал. Работа выполнена в рамках темы "Оценка связи рельефа дна Атлантического и запада Северного Ледовитого океанов, деформаций осадочного чехла, процессов дегазации и опасных геологических явлений с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии" (государственная регистрация № 01201459183), а также при поддержке грантов РФФИ 15-05-05888, 13-05-12076 офи_м, 14-05-00122, программ Президиума РАН I.18П, I.43П, II.3П и научной школы НШ 5177.2012.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аплонов С.В., Трунин А.А. Миграция локальной нестабильности спрединга вдоль оси дивергентной границы: Срединно-Атлантический хребет между трансформными разломами Марафон и Кейн // Физика Земли. 1995. № 9. С. 24–34.
- 2. 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 // Рос. журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 457–476.
- Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Силантьев С.А., Борисов М.В., Соколов С.Ю., Буго А. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Рос. журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 511– 519.
- Мазарович А.О. Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. М.: Научный Мир, 2000. 176 с.
- 5. Мазарович А.О., Соколов С.Ю., Агапова Г.В., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н. Компьютерные технологии как инструмент получения новой информации о строении океанических разломов (на примере активной части разлома Сан-Паулу, Центральная Атлантика) // Рос. журнал наук о Земле. 2001. Т. 3. № 1.
- 6. Соколов Н.С. Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси Срединно-Атлантического хребта и преддуговые обстановки на его восточном фланге // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2007. № 6. С. 42–46.
- Соколов С.Ю. Аномальные механизмы очагов землетрясений Атлантики и их геодинамическая интерпретация // Геология морей и океанов: Матер. XVIII Межд. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. V. М.: ГЕОС, 2009. С. 153–155.
- 8. Соколов С.Ю. Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмотомографии и отношению скоростей Р и S волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. С. 55–67.
- 9. *Тевелев А.В.* Сдвиговая тектоника. М.: Изд-во МГУ, 2005. 254 с.
- 10. *Becker T.W., Boschi L.* A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // Geochemistry Geophysics Geosystems G³. 2002. Vol. 3. № 1. Paper number 2001GC000168.
- Brunelli D., Seyler M. Asthenospheric percolation of alkaline melts beneath the St. Paul region (Central Atlantic Ocean) // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. Vol. 289. Is. 3–4. P. 393–405.
- 12. *Chandrasekhar S.* Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford: Clarendon Press, 1961. 654 p.

- 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, Technical series 46, UNESCO, 1996, 128 P. Atlas 32 P.
- Fornari D.J., Gallo D.G., Edwards M.H., Madsen J.A., Perfit M.R., Shor A.N. Structure and topography of the Siqueiros Transform Fault System: evidence for the development of intra-transform spreading centers // Marine Geophys. Res. 1989. Vol. 11. Is. 4. P. 263–299.
- 15. *Grand S.P., Van der Hilst R.D., Widiyantoro S.* Global seismic tomography: a snapshot of convection in the Earth // GSA Today. 1997. Vol. 7. № 4. P. 1–7.
- Ligi M., Bonatti E., Gasperini L., Poliakov A.N.B. Oceanic broad multifault transform plate boundaries // Geology. 2002. Vol. 30. № 1. P. 11–14.
- Lebedev S., Van der Hilst R.D. Global upper-mantle tomography with the automated multi-mode surface and S waveforms // Geophysical J. Int. 2008. Vol. 173. № 2. P. 505–518. doi 10.1111/j.1365-246X.2008.03721.x
- 18. *Motoki K.F., Motoki A., Sichel S.E.* Gravimetric structure for the abyssal mantle massif of Saint Peter and Saint Paul peridotite ridge, Equatorial Atlantic Ocean, and its relation to active uplift // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2014. Vol. 86. № 2. P. 571–588.
- 19. *Müller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R.* Age spreading rates and spreading asymmetry of the world's ocean crust // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. Vol. 9. № 4. P. 1–19. doi 10.1029/2007GC001743
- Sandwell D.T., Smith W.H.F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: ridge segmentation versus spreading rate // J. Geophys. Res.

Solid Earth (1978–2012). 2009. Vol. 114. N. B1. doi 10.1029/2008JB00600810.1029/2008JB006008

- Sclater J.G., Grindlay N.R., Madsen J.A., Rommevaux-Jestin C. Tectonic interpretation of the Andrew Bain transform fault: Southwest Indian Ocean // Geochem. Geophys. Geosyst. 2005. Vol. 6. № 9. 21 p. Q09K10, doi 10.1029/2005GC00095110.1029/2005GC000951
- 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. Vol. 10. P. 1–30. ES4001. doi 10.2205/2007ES000218
- 23. Van der Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R. Evidence of deep mantle circulation from global tomography // Nature. 1997. Vol. 386. № 6625. P. 578–584.
- Wendt J.I., Regelous M., Yaoling Niu., Hekinian R., Collerson K.D. Geochemistry of lavas from the Garrett Transform Fault: insights into mantle heterogeneity beneath the eastern Pacific // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. Vol. 173. P. 271–284.
- Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2014 (http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html)
- 26. Advanced National Seismic System (ANSS), USA, 2015 (http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html)
- 27. Harvard Centriod Moment Tensor (CMT), USA, 2013 (http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html)

Рецензенты: А.А. Пейве, Е.Н. Меланхолина, Е.П. Дубинин

Spatial Instability of the Rift in the St. Paul Multifault Transform Fracture System, Atlantic Ocean

S. Yu. Sokolov^a, Yu. A. Zaraiskaya^a, A. O. Mazarovich^a, V. N. Efimov^a, and N. S. Sokolov^b

^a Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 7, Moscow, 119017 Russia ^b Severo-Zapad, Pervyi Dorozhnyi pr. 9, Moscow, 117545 Russia

> *e-mail: sysokolov@yandex.ru* Received September 7, 2015

Abstract—The structure of the acoustic basement of the eastern part of the St. Paul multifault transform fracture system hosts rift paleovalleys and a paleonodal depression that mismatch the position of the currently active zones. This displacement zone, which is composed of five fault troughs, is unstable in terms of the position of the rift segments, which jumped according to redistribution of stresses. The St. Paul system is characterized by straightening of the transform transition between two remote segments of the Mid-Atlantic Ridge (MAR). The eastern part of the system contains anomalous bright-spot-like reflectors on the flattened basement, which is a result of atypical magmatism, which forms the standard ridge relief of the acoustic basement. Deformations of the acoustic basement have a presedimentation character. The present-day deformations with lower amplitude in comparison to the basement are accompanied by acoustic brightening of the sedimentary sequence. The axial Bouguer anomalies in the east of the system continue to the north for 120 km from the active segments of the St. Paul system. Currently seismically active segments of the spreading system are characterized by increasing amplitudes of the E–W displacement along the fault troughs. Cross-correlation of the lengths of the active structural elements of the MAR zone (segments of the ridge and transform fracture zones of displacement) indicates that, statistically, the multifault transform fracture system is a specific type of oceanic strike-slip faults.

Keywords: transform fracture zone, multifault system, deformation of sedimentary cover, seismic section, St. Paul