УДК 551.7

DOI: 10.31431/1816-5524-2021-1-49-53-67

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ СЕГМЕНТЕ АТЛАНТИКИ

© 2021 С.Ю. Соколов¹, К.О. Добролюбова¹, В.Н. Ефимов¹, А.В. Кольцова²

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: sysokolov@yandex.ru ²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия, 119991

Мощность осадочного чехла Экваториального сегмента Атлантики убывает с расстоянием от континентального источника сноса и незначительно увеличивается при удалении от Срединно-Атлантического хребта (САХ). Фоновое осадконакопление вносит малый вклад в суммарный осадочный объем вблизи континентов и основной вклад в котловинах с формированием осадочных тел мощностью до 500 м. Осадки мощностью до 1000 м вблизи САХ являются результатом разгрузки донных течений около структурных барьеров в рельефе и разломных трогах. Выявлена тенденция увеличения общей мощности с севера на юг на западном фланге САХ. Выявлена разнонаправленная пространственная миграция впадин фундамента, заполненных осадками. К западу от САХ установлена контрастная акустическая стратификаця и тектонические деформации осадков. К востоку от САХ деформации редки и выражены структурами протыкания и сбросами. Выявлены аномалии типа «яркое пятно», связанные с локальными проявлениями магматизма, формирующего выровненные высокоамплитудные рефлекторы. Сбросовые нарушения в пассивных частях разломов указывают на наличие локального растяжения, являющееся частью сдвигового парагенеза. В трогах установлена разгрузка осадков из потока, формирующая канальные дрифты.

Ключевые слова: мощность осадков, дрифт, фундамент, яркое пятно, донные течения.

ВВЕДЕНИЕ

Большая часть Атлантического океана покрыта осадочным чехлом мощностью менее 1000 м (рис. 1). Основная часть абиссали и зона Срединно-Атлантического хребта (САХ) имеют мощность осадков не превышающую 500 м. Это значение получено осреднением по большому количеству маршрутных и полигонных геофизических промеров, распределенных в пространстве крайне неравномерно (рис. 2), поэтому в реальности возможны локальные отклонения от осредненных значений мощности, показанных по данным (Straume et al., 2019). По данным глубоководного бурения (DSDP-ODP, 2011) верхняя часть этой толщи представлена неконсолидированными илистыми отложениями мощностью до 200-250 м, а нижняя — слабоконсолидированными отложениями мощностью 250-300 м. Более глубокие отложения отличаются резко возрастающей скоростью сейсмических волн (>2 км/с) и снижением пористости (<40%), что указывает

на присутствие плотных пород. Этот осадочный чехол залегает на магматическом спрединговом фундаменте, поверхность которого является подошвой чехла. Возраст фундамента определен по данным линейных магнитных аномалий (Müller et al., 2008) с верификацией по данным глубоководных скважин, вскрывших фундамент (DSDP-ODP, 2011). Все тектонические элементы и структурный план фундамента в областях, покрытых минимальным осадочным чехлом (<150 м), в масштабах мельче 1:15 000 000 определяются по данным спутниковой альтиметрии (Sandwell, Smith, 2009) (рис. 1). Поле альтиметрии отражает вариации контрастной плотностной границы вода-дно, которая из-за малой сравнительной плотности и мощности осадочного чехла в центральных районах отражает, прежде всего, магматический фундамент. По мере увеличения мощности осадков вблизи континентов контрастность аномалий альтиметрии падает, но видимые вариации, маскируемые осадками, по-прежнему относятся к фундаменту.



Рис. 1. Мощность осадочного чехла Атлантического океана по данным (Straume et al., 2019). Структура фундамента в областях с мощностью осадков менее 150 м показана по данным (Sandwell, Smith, 2009) методом оттененного рельефа.

Fig. 1. Sedimentary cover thickness in the Atlantic Ocean (Straume et al., 2019). Basement structure in the areas with sedimentary thickness less than 150 m is shown with shaded relief by data from (Sandwell, Smith, 2009).

В данной работе проведен анализ общего распределения объемов осадочного чехла по площади в Экваториальном сегменте Атлантики (ЭСА) в районе нескольких наиболее крупных мегатрансформных зон, смещающих северный и южный сегменты САХ в субширотном направлении на расстояния до 800 км по каждой из зон. Также в пределах ЭСА показано детальное исследование осадочного чехла, которое для абиссальных частей Атлантики встречается крайне редко (рис. 2). Маршрутные и полигонные геофизические исследования выполненные Геологическим институтом РАН (ГИН РАН) в области экваториальной осадочной перемычки



Рис. 2. Изученность акватории Атлантического океана полигонными и маршрутными геофизическими промерами по данным открытого доступа (GEODAS, 2010) и в экспедициях ГИН РАН (красные линии).

Fig. 2. The study of the Atlantic Ocean area by polygon and route geophysical measurements from open access data (GEODAS, 2010), and in expeditions of the Geological Institute RAS (red lines).

с мощностью до 1000 м (рис. 1), приобретают особую важность как уникальное исследование такой детальности с сейсморазведкой в глубоководной части океана. Исключение составляют акватории, примыкающие к территории США. В 7, 11 и 12 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988–1991, начальник рейсов — Г.Б. Удинцев) (Мазарович и др., 2001; Еfimov et al., 1996) в этом районе был выполнена одноканальная сейсмическая съемка с пневматическим источником суммарной длиной около 80 тыс. км, которая позволила построить карту мощностей осадочного чехла масштаба 1:250 000, использованную в данной статье в сильно генерализованном виде. В работе (Equatorial..., 1996) эта карта опубликована в масштабе 1:1 700 000. СОКОЛОВ и др.

ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЛ В МЕЛКОМАСШТАБНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Анализ распределения мощности осадочного чехла на мелкомасштабной карте (рис. 1) показывает, что основной закономерностью является убывание мощности в зависимости от расстояния до источника сноса — континента (Соколов, 2018). Основной объем осадочного материала с мощностью свыше 1000 м сосредоточен в прибрежной полосе 500–800 км, которая

не зависит ни от ширины океана, ни от возраста фундамента (рис. 3). Это указывает на то, что главным фактором, влияющим на мощность, является интенсивность сноса континентального материала, преимущественно терригенного. Примерная зависимость мощности осадочного чехла от квадратного корня из значения возраста фундамента, растущего в направлении от оси САХ к периферии аналогично описанию средней мощности литосферы (Сорохтин, Ушаков, 2002), является описанием фонового осадконакопления, происходящего за счет микроорганизмов и



Рис. 3. Возраст океанического фундамента, вычисленный по данным аномального магнитного поля (Müller et al., 2008). Рельеф показан методом оттененного рельефа.

Fig. 3. Oceanic basement age calculated from anomalous magnetic data of Müller et al., 2008. Bathymetry is shown by shaded relief technique.

самой мелкой терригенной фракции. Вклад этого источника в накопленный основной объем осадков около континентов мал. Фоновое осадконакопление в Атлантике формирует осадочный чехол глубоководной части со средней скоростью от 5 до 8 мм/1000 лет и не накапливает мощных осадочных тел. Оно формирует, как правило, изолированные осадочные тела мощностью до 500 м на большей части глубоководной акватории, которые не имеют принципиального значения для свойств генерализованной структуры коры и остывающей литосферы, покрывающейся осадками при удалении от оси спрединга. Осадки на приблизительно половине площади ЭСА сформированы в неогене и имеют раздробленную подошву, повторяющую впадины фундамента (рис. 4) (Соколов, 2018). Вследствие этого в подавляющем большинстве случаев говорить о какой-то трассировке отражающих горизонтов на большие расстояния не приходится. Этот чехол практически никак не маскирует рельеф фундамента в приосевой части океана (рис. 1), заполняя отдельные впадины фундамента, и очень слабо влияет на структуру гравитационного поля, полученного из данных альтиметрии (Sandwell, Smith, 2009) за исключением зоны перехода к континенту. Компонента мощности, которую можно было бы рассчитать как корень из возраста фундамента, в осадочных телах на большей части акватории является слишком малой и проявлена дискретно во впадинах фундамента. Из-за этого расчетные оценки мощности фонового осадконакопления нецелесообразны как собственно для описания геометрии чехла, так и для расчета поправок в гравитационное поле. Расчет редукций с учетом дефицита плотностей в маломощном осадочном слое по сравнению с плотностью кристаллической части океанической коры дает незначительный эффект.

Рассмотрим структуру осадочного чехла ЭСА в более крупном масштабе (рис. 4), чем на рис. 1. Приведенные изопахиты (рис. 4) являются менее генерализованным и содержат детали, не смещенные относительно впадин фундамента при компьютерной интерполяции на регулярную сетку 5' \times 5' (Straume et al., 2019). Его особенностью является наличие в ЭСА перемычки с выдвижением осадков мощностью до 1000 м практически к рифтовой зоне САХ. Кроме того, можно выделить повышенную мощность в трогах пассивных частей мегатрансформных разломных зон. Причину такой конфигурации распределения мощностей, не укладывающуюся в принцип роста пропорционально корню из возраста, следует искать в структуре донных течений. Из данных (Morozov et al., 2010) (рис. 5) следует, что существуют раздельные траектории течений для Антарктических донных вод

и Арктических глубинных течений. В обоих случаях видно, что структурный барьер южной части ЭСА является модератором для траекторий, при достижении которого они меняют свои параметры, отклоняясь от прямых путей и образуя замкнутые контуры, что, по всей видимости, способствует разгрузке осадков из потока. Поскольку поток движется вдоль континентального подножия, он может вовлекать в движение вещество турбидитов, поступающее с суши, и отлагать его около структурного барьера, меняющего параметры движения. По данным (Morozov et al., 2010) прохождение донных вод через структурный барьер ЭСА и САХ в другую часть котловины происходит по глубоким трогам мегатрансформных разломных зон, таких как Вима, Романш, Чейн. Также видно (рис. 5), что трог разлома Страхова (4° с.ш.) может являться каналом перехода течений с востока на запад. В разломах также происходит накопление осадков, превышающее фоновое значение. Отмеченные особенности течений являются причиной сложившегося распределения мощностей донных осадков. Не исключено влияние магматической системы островов Зеленого Мыса на поступление вулканокластического материала и формирование повышенной по сравнению с фоновой абиссальной нормой мощности осадков в окрестностях этих островов и ассоциированных с ними подводных гор.

ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЛ В ДЕТАЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Анализ детального распределения мощностей (рис. 6), приведенных по (Мазарович и др., 2001; Efimov et al., 1996; Equatorial..., 1996) в сильно генерализованном виде, показывает, что детальная картина в целом соответствует особенностям карты мощностей (рис. 4) (Соколов, 2018), построенной по глобальным данным (Straume et al., 2019). При сохранении тенденции к наращиванию мощности при удалении от оси САХ, область относительно больших для осевой зоны мощностей (от 500 м до 1000 м) подходит к САХ на расстояние 40–50 км в отличие от районов к северу от границы южного сегмента ЭСА (рис. 4). Троги пассивных частей трансформных разломов заполнены осадками мощностью до 600-800 м, что не объяснимо принципом степенной зависимости от возраста. Заметна тенденция к увеличению общей мощности с севера на юг на западном фланге САХ. Она может формироваться барьерным эффектом, который оказывает северный борт полиразломной системы Сан-Паулу, имеющий повышенное фоновое значение рельефа по сравнению с Гвианской котловиной, по которой проходят донные течения (рис. 5).



Рис. 4. Компиляция характеристик осалочного чехла ЭСА (Соколов, 2018), собранная по данным (Тухолке, Учупи, 1990; Divins, 2003). Возраст осалочных пород на забое приведен для скважин по данным (DSDP, 2000) и (ODP, 2000), а для грунтовых трубок по данным (LDEO, 1998). Типы пород по данным драгирования показаны по выборке из базы данных, скомпилированной А.О. Мазаровичем (2003). Распределение средних скоростей распространения продольных сейсмических волн для слоев от 0 до 2 км и от 2 до 5 км показано на врезке по данным (Laske, Masters, 1997).

database compiled by A.O. Mazarovich (2003). The inset shows spatial distribution of seismic P-waves average velocities for layers with depths from 0 to 2 km and from 2 to 5 Fig. 4. Compilation of different sedimentary cover characteristics at ESA (Sokolov, 2018) based on data from (Tucholke, Uchupi, 1990; Divins, 2003). Sedimentary rock ages at the well bottoms are from (DSDP, 2000) and (ODP, 2000), and those for gravity cores are from (LDEO, 1998). Rock types according to dredging data are sampled from the km (Laske, Masters, 1997).



Рис. 5. Распространение глубинных и донных вод в Атлантическом океане: *а* — Антарктические донные воды, *б* — Арктические глубинные воды, по данным (Morozov et al., 2010, с изменениями). Цифрами в квадратах показаны значения объемного транспорта воды в свердрупах (Sv, 10⁶м³/с). Стрелки указывают на направление течения.

Fig. 5. Distribution of deep and bottom water currents in the Atlantic Ocean: a — Antarctic bottom waters, δ — Arctic deep waters as in Morozov et al., 2010, modified. Numbers in rectangles are values of transport water volumes in sverdrups (Sv, 10⁶m³/s). Arrows show direction of currents.

Эти течения огибают возвышенность Сеара (Kumar, Embley, 1977), захватывая при этом материал, выносимый конусом выноса Амазонки, и далее на восток образуют замыкание контура котловины с переменой направления течений. Это может быть источником увеличения мощности к югу. Подобные процессы установлены и в других котловинах Атлантического океана, где течения меняют направления около структурных барьеров, в частности в Африкано-Антарктической котловине (Соколов и др., 1999). На восточном фланге субмеридиональный тренд не выражен. Осадки заполняют впадины акустического фундамента, которые имеют глубины до 1000 м. При малых мощностях заполнения впадин осадочные тела отделены друг от друга, и непрерывная корреляция рефлекторов неосуществима. При больших мощностях осадков они покрывают перемычки между впадинами фундамента, и часть верхних горизонтов может трассироваться на значительные расстояния. Скважины глубоководного бурения в пределах съемки ГИН РАН отсутствуют.

В отличие от карты рельефа (Equatorial..., 1996), не дающей представления о конфигурации поверхности фундамента, скрытого осадочным чехлом, наложение изопахит на рельеф (рис. 6) дает более объективную информацию о структуре спредингового фундамента и одновременно о мощности осадочного чехла. Наиболее мощные осадочные карманы показывают пространственную миграцию глубоких впадин в северном направлении, что говорит о вдольосевом смещении режима спрединговых процессов. Несмотря на меньшее покрытие сейсмической съемкой восточного фланга САХ, просматривается определенная симметрия цепочек мощных осадочных карманов, расположенных неортогонально САХ. Примерно одинаковые по мощности осадки, заполняющие заведомо разновозрастные впадины, указывают на доминирующее влияние течений в осадконакоплении, и меньшее влияние фонового накопления, увеличивающегося с возрастом. К югу от широты 2°20'с.ш. миграция впадин идет в южном направлении. Признаки миграции отсутствуют южнее 1°30'с.ш. и севернее разлома Страхова 4°00'с.ш (рис. 4). В полосе между этими значениями наблюдается разнонаправленное смещение впадин спредингового фундамента от центра на широте 2°25'с.ш. в САХ, но, к сожалению, именно в этом месте отсутствует сплошное покрытие съемкой. Вне указанной полосы осадочные карманы вытянуты субмеридионально и параллельны оси САХ. В ряде случаев впадины фундамента с осадками объединены в прямые и узкие троги северо-восточного или северо-западного направления, например на юго-восток от положения разреза



Рис. 6. Карта мощности осадков южного сегмента ЭСА в пределах зоны САХ и восточной части полиразломной системы Сан-Паулу по данным НСП, выполненного в 7, 11 и 12 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988–1991, начальник рейсов — Г.Б. Удинцев) (Equatorial..., 1996; Efimov et al., 1996; Мазарович и др., 2001). Черными линиями показаны положения фрагментов разрезов, представленных на соответствующих рисунках.

Fig. 6. Sedimentary thickness map of the ESA southern part within the MAR zone and within the eastern part of the San-Paulu multi transform fault system from single channel seismic data obtained during the 7, 11 and 12 cruises of RV «Akademik Nikolaj Strakhov» (GIN AS USSR, 1988–1991, expedition chief Udintsev G.B.) (Equatorial..., 1996; Efimov et al., 1996; Mazarovich et al., 2001). Black lines are fragments of seismic sections, and numbers are corresponding figures.

S12-P3-14 (рис. 6, 9) под углом около 60° к разлому Страхова. Подобные структуры трактуются как разломные с простиранием, не ортогональным к главным тектоническим элементам (Мазарович, Соколов, 2002). Такие структуры выявлены на мелкомасштабной тектонической карте ЭСА (Соколов, 2018) и имеют также теоретические предпосылки для существования.

Симметричные и несимметричные дискордантные элементы, состоящие из косоориентированных разломов и цепочек впадин, образуют систему, ориентированную к САХ и трансформным разломам под средним углом около 45° с большим (±20°) разбросом. Преимущественным направлением является северо-западное, хотя реже встречается и северо-восточное (Мазарович, Соколов, 2002). Неортогональная ориентация к рифту и разломам, скорее всего, указывает на реализацию смещений вдоль осей сколовых напряжений. Это означает наличие единого упругого состояния литосферы в целом на больших (до 1000 км) расстояниях. Таким образом, литосфера обладает двойственной природой, являясь упругой средой и блоковым комплексом одновременно. Возникновение сколовых напряжений и связанной с ними системой трещинноватости может интерпретироваться как результат периодического изменения режима вращения Земли, порождающего регматическую сеть (Долицкий, 1985) и изменение кривизны поверхности. Отметим, что длинные нарушения

косой ориентации выделены на абиссали вдали от флангов CAX, где находится остывшая по сравнению с рифтовой частью литосфера.

Происхождение косоориентированных структур и цепочек впадин, заполненных осадками, может быть связано с вдольосевыми магматическими процессами внутри сегмента САХ. Подобное мнение было высказано в работе (Fairhead, Wilson, 2005) относительно подобных косоориентированных структур, расположенных к северу от ЭСА, возраст которых изменяется в диапазоне от 25 Ма до настоящего времени. Это указывает на наличие постоянно действующей пространственной миграции интенсивности магматизма вдоль САХ. Другим фактором, способным влиять на структурообразование на флангах прямых трансформных разломов, является различие скорости спрединга между сегментами (Соколов, 2018). Так как разница скоростей достигает 100% и более, сдвиговые процессы вдоль пассивных частей разломов, сопровождающиеся деформациями, вполне допустимы. На более медленном фланге могут возникать трещины отрыва, которые при длительном существовании разницы скоростей в состоянии сформировать косоориентированный элемент.

Субширотный разрез S07-06 (рис. 6, 7) расположен на западном фланге САХ. Он пересекает наиболее глубокие впадины, заполненные осадками мощностью до 800 м. В их пределах заметна более контрастная акустическая стратификация,

что может указывать либо на существование интервалов с медленным осадконакоплением, чередующихся с быстрым, либо на наличие примесей вулканокластики в осадочном материале. Второй вариант, по нашему мнению, предпочтителен, поскольку для ранне-миоценового возраста фундамента в этом районе средняя скорость осадконакопления получается около 40 мм/1000 лет, что для абиссали много. Это также косвенно подтверждает влияние течений на аномальную разгрузку осадочного материала. На разрезе протяженностью около 400 км (рис. 6, 7), проходящем по области максимального роста мощностей в меридиональном направлении, зависимость нарастания мощности при удалении от САХ не наблюдается. В западной части разреза установлены деформации, имеющие штамповую морфологию, а также структуры протыкания. При этом большая часть разреза к западу и востоку от центральной части имеет слабо выраженную акустическую стратификацию при пониженной мощности. Это может указывать на существование условий с высокими скоростями осадконакопления, варьирующими вдоль разреза. В абиссальных районах со скоростями, попадающими под определение «лавинная седиментация» (более 100 мм/1000 лет), акустическая стратификация на частотах непрерывного сейсмического профилирования (НСП) почти не выражена. Подобная картина наблюдается на разрезах НСП в глинистых неоген-четвертичных отложениях удаленных частей продуктивных конусов выноса, например, на флангах хребта Книповича в области действия конусов с западного обрамления Баренцева моря (Чамов и др., 2010).

Субширотный разрез \$07-05 (рис. 6, 8) расположен на восточном фланге САХ, имеет длину около 500 км, на протяжении которой может быть прослежен тренд увеличения мощности с возрастом (расстоянием от САХ). Это может интерпретироваться как следствие меньшего влияния течений, формирующих возмущения в тренде пространственного распределения мощностей. Отметим меньшее проявление деформаций осадочного чехла на восточном фланге по сравнению с западным, выраженное редкими структурами протыкания и сбросовыми нарушениями амплитудой 100-150 м между протяженными блоками с субгоризонтально залегающими осадками. Акустическая стратификация на востоке более четко выражена при сходных значениях мощности. В центральной части профиля выявлены аномалии типа «яркое пятно» (Sheriff, Geldart, 1995), которые формируются за счет резкого локального контраста физических свойств пород вдоль рефлектора. Они отличаются от типичного отображения «акустического» фундамента в одноканальном волновом поле и могут интерпретироваться как локальные проявления продуктивного магматизма, формирующего выровненные высокоамплитудные рефлекторы. К востоку от САХ подобные зоны уже были выявлены в восточных пассивных частях разлома Сан-Паулу (Соколов и др., 2016). Отметим, что положение западной аномалии «яркое пятно» не связано с выступом фундамента: она расположена внутри осадочного чехла и наследует характер акустической стратификации соседних частей осадочного разреза (рис. 8).



Рис. 7. Фрагмент регионального разреза S07-06 к западу от САХ. 7-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988) (Equatorial..., 1996). Положение разреза показано на рис.6.

Fig. 7. A fragment of S07-06 regional section west of MAR, the 7th cruise of RV «Akademik Nikolaj Strakhov» (GIN AS USSR, 1988) (Equatorial..., 1996). For location see Fig.6.



Рис. 8. Фрагмент регионального разреза \$07-05 к востоку от САХ. 7-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988) (Equatorial..., 1996). Положение разреза показано на рис.6.

Fig. 8. A fragment of S07-05 regional section east of MAR, the 7th cruise of RV «Akademik Nikolaj Strakhov» (GIN AS USSR, 1988) (Equatorial..., 1996). For location see Fig.6.

Это указывает на то, что источник материала для этих рефлекторов, скорее всего, расположен недалеко, но вне плоскости разреза. Восточная аномалия «яркое пятно» примыкает к выступу фундамента, прорывающему осадки, который может быть наложенной на первичный спрединговый фундамент вулканической постройкой и источником вулканического материала в осадках. Но в отличие от внеосевых вулканических построек около разлома Сан-Паулу (Соколов и др., 2016), данной структуре не соответствуют минимумы аномалий Буге. Это означает, что источник материала для этой аномалии «яркое пятно» также находится вне плоскости разреза. Интенсивность отраженного сигнала от этих рефлекторов почти в четыре раза выше, чем от типичного «акустического» фундамента, который, как правило, не представлен ровными поверхностями. Хорошо видно, что эти аномалии расположены в толще осадков с превышением 300–500 м над уровнем окружающего фундамента приблизительно в середине осадочной толщи. Поскольку возраст фундамента на этом участке составляет 11 Ма (рис. 3), есть основания считать, что возраст формирования выявленных тел с магматическим материалом и горизонтальными размерами по 15 км составляет около 5 Ма на рубеже миоцена и плиоцена. Существует вероятность, что примеси вулканокластики присутствуют в контрастно стратифицированных осадках на восточном фланге САХ (Соколов и др., 2016). Данные тела, скорее всего, относятся не к положению палеооси САХ, как сходные образования на восточном фланге разломной системы Сан-Паулу (Соколов и др., 2016), а к удаленному звену цепочки подводных гор, косо ориентированной к главным элементам и трассирующей затухающий плюмовый импульс, сформировавший магматическое поднятие Сьерра-Леоне (Соколов, 2018).

Субмеридиональный разрез S12-P3-14 (рис. 6, 9) расположен вкрест восточной пассивной части разлома Страхова около его сочленения с трогом северо-западного простирания, заполненным осадками (рис. 6). Разрез показывает наличие сбросовых нарушений, что позволяет сделать вывод о наличии локального растяжения в данной структуре. Кроме того, в наиболее глубокой части трога в осадочной толще наблюдается волновое поле, отличающееся от субгоризонтальной абиссальной стратификации. Его тип указывает на возможность интенсивной разгрузки осадков из идущего вдоль трога потока, формирующего канальные дрифты. Линзовидное тело на террасе южного борта трога может быть как дрифтом, так и продуктом разрушения неконсолидированной осадочной толщи после формирования сбросового



Рис. 9. Фрагмент полигонного разреза S12-P3-14 поперек восточной пассивной части разлома Страхова. 12-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1991) (Equatorial..., 1996). Положение разреза показано на рис.6.

Fig. 9. A fragment of S12-P3-14 polygon section across eastern passive part of the Strakhov fracture zone, the 12th cruise of RV «Akademik Nikolaj Strakhov» (GIN AS USSR, 1991) (Equatorial..., 1996). For location see Fig.6.

нарушения. Возможность накопления мощных осадочных толщ при разгрузке потока, идущего вдоль трога, подтверждается данными скважин 26 и 353 (DSDP-ODP, 2011), которые вскрыли в троге разлома Вима четвертичные отложения до глубин 483 м.

Рассмотрим профиль рельефа дна вдоль восточной части трога разлома Страхова вместе с мощностью осадков, а также профили вдоль бортов (Мазарович и др., 1996) (рис. 6, 10). Мощность осадочного заполнения трога разлома практически постоянна вдоль восточной пассивной части на протяжении около 350 км и равна в среднем 400-500 м с небольшими вариациями, только в пририфтовой части имеется сокращение до 200 м. Это указывает на фактор донных течений в узком пространстве между магматическими бортами трога как на основной источник поступления осадочного материала, не зависящий от возраста фундамента. Профиль дна трога содержит ступень на долготе 30°50' з.д. при сохранении мощности осадков, что указывает на сбросовое нарушение, пересекающее трог. Таким образом, растяжение, выявленное на взаимно перпендикулярных разрезах, указывает на то, что его ось не ортогональна главным тектоническим элементам. Возможной схемой формирования локального растяжения может



Рис. 10. Продольные профили рельефа вдоль разлома Страхова и прилегающих частей океанического дна по данным (Мазарович и др., 1996). *1* — осадочный чехол; *2*, *3* — профиль дна вдоль бортов разлома: *2* — северного, *3* — южного. Положение профиля показано на рис. 4.

Puc. 10. Bathymetric profiles along the Strakhov transform fault trough and adjacent parts of ocean floor (Mazarovich et al., 1996). 1 — sedimentary cover; 2, 3 — bathymetric profiles along the northern (2) and southern (3) sides of the transform trough. For location see Fig.4.

быть правый сдвиг (Мазарович и др., 1996) вдоль трога под углом 60° к разлому (рис. 6), на восточном фланге которого сформировалась зона растяжения. Эта схема не противоречит конфигурации поля альтиметрии (рис. 1). Еще одной особенностью указанной схемы является сильный отрицательный перепад высот на южном борту разлома по сравнению с северным на ~800 м (рис. 10). Возраст данного нарушения, скорее всего, четвертичный.

СИНТЕЗ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Мелкомасштабное отображение распределения мощности осадочного чехла в ЭСА показывает суперпозицию двух факторов, формирующих накопленный на океаническом фундаменте объем осадков. Первым является снос с континентов гравитационными потоками, отложения которых с мощностью свыше 1000 м сосредоточены в полосе 500-800 км за бровкой шельфа и резко убывают при удалении от источника сноса в котловину. Вторым фактором является фоновое пелагическое осадконакопление, которое теоретически может быть аппроксимировано степенной зависимостью от возраста фундамента. Но вклад этого фактора в общий объем осадков мал из-за низкой скорости осадконакопления. Формируемый им чехол из-за неровностей фундамента, в которых происходит накопление осадочных тел не более 500 м, носит дискретный характер и в ряде случаев мощности сильно отклоняются от генерализованной тенденции к степенному ее увеличению. Данная тенденция просматривается только на мелкомасштабных картах и практически бесполезна при анализе детального распределения осадочного чехла.

В ЭСА расположена хорошо изученная разломная зона Вима (рис. 4), известная как один из основных каналов перетока донных вод через САХ с запада на восток (Morozov et al., 2010). По данным скважины 26 проекта глубоководного бурения (DSDP, 2000) пройденная мощность четвертичных отложений в троге разлома составляет 483 м над фундаментом с нулевым возрастом. Это указывает на значительный вклад разгрузки течений, который вносит локальные искажения в плавную картину наращивания фонового пелагического накопления осадков с возрастом. Трог разлома Вима не является единственным каналом преодоления донными водами структурного барьера САХ. Перемычки с выдвижением осадков мощностью до 1000 м практически к рифтовой зоне САХ в трогах пассивных частей трансформных разломов по мелкомасштабным картам выделяются также для разломов Страхова и Сан-Паулу.

Крупномасштабное распределение осадочного чехла в ЭСА также показывает наложение двух факторов осадконакопления в распределении его мощностей. Общая тенденция к наращиванию мощности при удалении от оси САХ сохраняется. Если вблизи суши на нее наложен фактор сноса материла с континентов гравитационными потоками, резко увеличивающий мощности, то около субширотного структурного барьера заметна тенденция к увеличению общей мощности с севера на юг на западном фланге САХ, сформированная за счет разгрузки донных течений в юго-западной части Гвианской котловины. На востоке от САХ такая тенденция

СОКОЛОВ и др.

отсутствует. При малых мощностях заполнения впадин акустического фундамента непрерывная корреляция рефлекторов неосуществима, но при больших мощностях они перекрывают перемычки между впадинами фундамента, и верхние горизонты могут быть прослежены на значительные расстояния. Пространственная миграция глубоких впадин, заполненных осадками приблизительно одинаковой мощности 400–600 м, указывает на постоянство фактора донных течений, заполняющего разновозрастные впадины, смещающиеся при вариациях магматического режима вдоль САХ.

Указанные закономерности проиллюстрированы приведенными сейсмоакустическими разрезами (рис. 6, 7, 8, 9). Разрез к западу от САХ (рис. 7) иллюстрирует осадочные тела с увеличенной мощностью, контрастной акустической стратификацией и отсутствием признаков изменения мощности с возрастом. В разрезе установлены деформации штамповой морфологии и структуры протыкания, которые показывают, что структурный барьер, меняющий конфигурацию течений (рис. 5), является тектонически активным. Разрез к востоку от САХ (рис. 8) в отличие от западного фланга САХ показывает слабый тренд увеличения мощности с возрастом при меньшем влиянии течений. Аномалии типа «яркое пятно», связанные с локальным проявлением продуктивного магматизма, пересекают линию подводных гор, трассирующую затухающий в пространстве плюмовый импульс поднятия Сьерра-Леоне.

Разрез вкрест разлома Страхова (рис. 9), показывающий наличие сбросовых нарушений в пассивных частях трансформного трога, позволяет сделать вывод о том, что современная тектоника в океане не ограничивается в пространстве осевой зоной САХ. Объяснение таким явлениям следует искать в тектонически расслоенном и блоковом строении литосферы Атлантики, находящимся под воздействием объемных сил в любой точке океанического пространства (Соколов, 2018). Анализ строения осадочного чехла для изучения неотектоники является важнейшим инструментом, поскольку небольшие смещения фаз рефлекторов позволяют надежно выявить нарушения. Неровный магматический рельеф фундамента, являющегося кровлей кристаллической части коры, не позволяет отличить друг от друга исходные неровности от тектонических смещений. Покрытие фундамента осадками создает надежный индикатор для выявления вертикальных смещений блоков коры с точностью до разрешающей способности НСП. В наиболее глубокой части трога наблюдается разрез, характерный для интенсивной разгрузки осадков из потока,

формирующего канальные дрифты. Подобные явления характерны для разломных трогов, по которым идет переток донных вод с интенсивностью в первые свердрупы и более (Morozov et al., 2010). В частности аналогичные осадочные образования выявлены в троге разлома Чарли Гиббс на севере Атлантики (Skolotnev et al., 2021), в котором реализован переток Арктических вод с востока на запад.

выводы

Мелкомасштабное отображение распределения основной мощности осадочного чехла в ЭСА показывает следующее.

 убывание в зависимости от расстояния до источника сноса в прибрежной полосе шириной 500–800 км;

 – формирование фоновым осадконакоплением изолированных осадочных тел мощностью до 500 м на большей части глубоководной акватории во впадинах фундамента;

 – наличие осадочных тел мощностью до 1000 м, выдвинутых практически к рифтовой зоне САХ в трогах пассивных частей трансформных разломов;

- ЭСА и САХ являются структурным барьером для донных течений, на которых происходит дополнительная разгрузка осадков;

 трансформные разломы являются каналами для преодоления течениями структурного барьера, где происходит накопление осадков, превышающее фоновое значение.

Крупномасштабное распределения мощностей в ЭСА показывает следующее.

 троги пассивных частей трансформных разломов вблизи САХ заполнены осадками мощностью до 600–800 м, но в целом слабая зависимость мощности от возраста фундамента сохраняется;

 выявлена тенденция к увеличению общей мощности с севера на юг на западном фланге САХ за счет субмеридиональных течений;

 непрерывная корреляция рефлекторов в разрезе чехла на неровном фундаменте неосуществима, но верхние горизонты при больших мощностях могут быть прослежены на значительные расстояния;

 выявлена разнонаправленная пространственная миграция впадин фундамента, заполненных осадками, связанная с вдольосевым смещением режима магматизма;

 – на восточном фланге САХ впадины фундамента с осадками объединены в прямые и узкие троги северо-западной ориентации под углом около 60° к трансформным разломам.

К западу от САХ в осадочном разрезе с мощностью до 800 м без признаков степенной

зависимости от возраста фундамента установлено следующее.

 – контрастная акустическая стратификация, указывающая на наличие примесей вулканокластики в осадочном материале;

 выявлены деформации, имеющие штамповую морфологию, и структуры протыкания.

К востоку от САХ установлено следующее.

 – слабый тренд увеличения мощности с возрастом, как следствие меньшего влияния течений;

– деформации осадочного чехла на восточном фланге САХ выражены редкими структурами протыкания и сбросовыми малоамплитудными нарушениями;

— аномалии типа «яркое пятно» с превышением 300–500 м над уровнем фундамента, которые интерпретируются как локальные проявления продуктивного магматизма к югозападу от возвышенности Сьерра-Леоне (рис. 4), формирующего выровненные высокоамплитудные рефлекторы.

Наличие сбросовых нарушений на субмеридиональных разрезах пассивных частей трансформных зон и на профиле вдоль оси трога позволяет сделать вывод о наличии локального растяжения в данной структуре, которое может быть частью сдвигового парагенеза. Наблюдается разрез, характерный для интенсивной разгрузки осадков из потока, формирующего канальные дрифты при мощности осадков в троге 400–500 м на протяжении около 350 км.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-55-7806 «Новый тип межплитных границ: океанские мегатрансформы». Анализ распространения деформаций осадочного чехла и проявлений магматизма выполнен в рамках темы госзадания ГИН РАН № 0135-2019-0076 «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами».

Список литературы [References]

- Долицкий А.В. Образование и перестройка тектонических структур. М.: Недра, 1985. 219 с. [Dolickiy A.V. Origin and Evolution of Tectonic Structures. Moscow: Nedra, 1985. 219 p. (in Russian)].
- Мазарович А.О., Кольцова А.В., Соколов С.Ю., Ефимов В.Н. Строение пассивной части разлома Страхова на востоке Срединно-Атлантического хребта // ДАН. 1996. Т. 349. № 4. С. 511–515 [*Mazarovich A.O., Koltsova A.V., Sokolov S.Yu., Efimov V.N.* Structure of the Strakhov Fracture Zone East Passive Part. // Doklady RAS. 1996. V. 349. № 4. P. 511–515 (in Russian)].
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю., Агапова Г.В и др. Компьютерные технологии как инструмент получения новой информации о строении оке-

анических разломов (на примере активной части разлома Сан-Паулу, Центральная Атлантика) // Российский журнал наук о Земле. 2001. Т. 3. № 1. С. 69–89 [*Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu., Agapova G.V. et al.* Computer technologies used to obtain new information on crustal structure in oceanic fracture zones: A case study on the active segment of Sao Paulo Fracture Zone, Central Atlantic // Russian Journal of Earth Sciences. 2001. V. 3. № 1. P. 59–78].

- Мазарович А.О., Соколов С.Ю. Разломные зоны северо-западного простирания Центральной Атлантики // Геотектоника. 2002. № 3. С. 87–94 [*Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu.* Northwest-trending fracture zones in the central Atlantic ocean // Geotectonics. 2002. № 3. Р. 87–94 (in Russian)].
- Соколов С.Ю., Ефимов В.Н., Мазарович А.О. и др. Строение осадочного чехла на западе Африкано-Антарктического хребта (южная Атлантика) // ДАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 231–235 [Sokolov S.Yu., Efimov V.N., Mazarovich A.O. et al. Structure of the Sedimentary Cover in the Western African-Antarctic Ridge, Southern Atlantic // Doklady Acad. of Sciences. 1999. V. 366. № 2. P. 231–235 (in Russian)].
- Соколов С.Ю., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О. и др. Пространственная неустойчивость рифта в полиразломной трансформной системе Сан-Паулу, Атлантический океан // Геотектоника. 2016. № 3. С. 3–18. https://doi.org/10.7868/S0016853X16030115 [Sokolov S.Yu., Zaraiskaya Yu.A., Mazarovich A.O. et al. Spatial Instability of the Rift in the St. Paul Multifault Transform Fracture System, Atlantic Ocean // Geotectonics. 2016. V. 50. № 3. P. 223–237. https://doi.org/10.1134/S0016852116030110].
- Соколов С.Ю. Тектоника и геодинамика Экваториального сегмента Атлантики. (Труды ГИН РАН: Вып. 618) М.: Научный мир, 2018. 269 с. [Sokolov S.Yu. Tectonics and Geodynamics of the Atlantic Equatorial Segment. (Transactions of GIN RAS: Issue 618) М.: Scientific World, 2018. 269 p. (in Russian)].
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. М.: Изд-во, МГУ, 2002. 560 с. [Sorokhtin O.G., Ushakov S.A. Evolution of the Earth. Moscow: MSU, 2002. 560 p. (in Russian)].
- Тухолке Б.Е., Учупи Е. Мощность осадочного чехла. // Международный геолого-геофизический атлас Атлантического океана. Ред. Удинцев Г.Б. МОК (ЮНЕСКО). Мингео СССР. АН СССР. ГУГК СССР. Москва. 1990. С. 122–125 [Tucholke B.E., Uchupi E. Thickness of the Sedimentary Cover // International Geological-Geophysical Atlas of the Atlantic Ocean. Ed. Udintsev G.B. IOC (UNESCO). Ministry of Geology USSR. Academy of Sciences of USSR. GUGK USSR. Moscow. 1990. P. 122–125].
- Чамов Н.П., Соколов С.Ю., Костылева В.В. и др. Строение и состав осадочного чехла района рифта Книповича и впадины Моллой (Норвежско-Гренландский бассейн) // Литология и полезные ископаемые. 2010. № 6. С. 594–619 [Chamov N.P., Sokolov S.Yu., Kostyleva V.V. et al. Structure and Composition of the Sedimentary Cover in the Knipovich Rift Valley and Molloy Deep (Norwegian-Greenland Basin) // Lithology and Mineral Resources. 2010. V. 45. № 6. P. 532–554].

- Efimov V.N., Koltsova A.V., Beresnev A.F. et al. The Structure of Sedimentary Cover from Single-Channel Profiling Data. // 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. Paris: UNESCO, 1996. Technical series. № 46. P. 19–24.
- 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. Paris: UNESCO, 1996. Technical series. № 46. Text: 128 P. Atlas: 32 P. (http://atlantic.ginras. ru/download/downloads_print.html).
- Fairhead J.D., Wilson M. Plate tectonic processes in the South Atlantic Ocean: Do we need deep mantle plumes? // Geological Society of America Special Papers. 2005. V. 388. P. 537–553. https://doi. org/10.1130/0-8137-2388-4.537.
- Kumar N., Embley R.W. Evolution and origin of Ceara Rise: An aseismic rise in the western equatorial Atlantic // GSA Bulletin. 1977. V.88. № 5. P. 683–694. https:// doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88.
- Laske G., Masters G. A Global Digital Map of Sediment Thickness. EOS Trans. AGU. 78. F483. 1997.
- LDEO. Lamont-Doherty Earth Observatory. Deep-Sea Sample Repository. Accessed 1.09.1998. (http://www. ldeo.columbia.edu/CORE_ REPOSITORY/RHP1. html).
- Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. 288 p. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9358-5.

- ODP. Ocean Drilling Program CD. NOAA Product # G01013-CDR-A0001. 2000.
- *Divins D.L.* Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas // NOAA. National Geophysical Data Center. Boulder. CO. 2003. (https:// www.ngdc.noaa.gov/mgg/sedthick/sedthick.html).
- DSDP. Deep Sea Drilling Project CD. NOAA Product # G01336-CDR-A0001. 2000.
- DSDP-ODP boreholes data and logs. 2011. (http://wwwodp.tamu.edu/, http://www.deepseadrilling.org/).
- GEODAS. Marine Trackline Geophysical Data. 2010. (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/trackline. html).
- 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 G3. 2008. V.9. № 4. P. 1–19. https://doi. org/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 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2009. V.114. № B1. P. 1–18. https://doi.org/10.1029/2008JB006008.
- Sheriff R.E., Geldart L.P. Exploration Seismology (2nd ed.). Cambridge University Press, 1995. 415 p.
- Skolotnev S.G., Sanfilippo A., Peyve A.A. et al. Seafloor Spreading and Tectonics at the Charlie Gibbs Transform System (52–53°N, Mid Atlantic Ridge): Preliminary Results from R/V A.N. Strakhov Expedition S50 // Ofioliti. 2021. V. 46 (1). P. 83–101. https://doi.org/10.4454/ofioliti.v46i1.539.
- Straume E.O., Gaina C., Medvedev S. et al. GlobSed: Updated total sediment thickness in the world's oceans // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20. p. 1756–1772. https://doi.org/10.1029/2018GC008115.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА DISTRIBUTION OF THE SEDIMENTARY COVER IN THE EQUATORIAL SEGMENT OF THE ATLANTIC OCEAN

S.Yu. Sokolov¹, K.O. Dobrolyubova¹, V.N. Efimov¹, A.V. Koltsova²

¹Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 119017 ²Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 119991; e-mail: sysokolov@yandex.ru

The thickness of the Atlantic Equatorial segment sedimentary cover decreases with the distance from the continental source of mass removal and increases slightly with the distance from the Mid-Atlantic Ridge (MAR). Background sedimentation makes a small contribution to the total sedimentary volume near the continents and the major contribution in basins with the formation of sedimentary bodies with a thickness of no more than 500 m. Sedimentary bodies with a thickness up to 1000 m near MAR are the results of unloading of bottom currents near structural barriers in topography and in fault troughs. The total thickness tends to increase from north to south on the western flank of the MAR. The multidirectional spatial migration of the basement depressions filled with sediments is revealed. To the west of the MAR, contrasting acoustic stratification and tectonic deformations of sediments were found. To the east of the MAR, deformations are rare and expressed by piercing structures and normal faults. Anomalies of the "bright spot" type associated with local manifestations of magmatism forming aligned high-amplitude reflectors are revealed. Normal faulting in the passive parts of the transforms zones indicates the presence of local stretching, which is part of the simple shear paragenesis. In the troughs, sediment deposition from the bottom currents, which forms channel drifts, is revealed.

Keywords: sediment thickness, drift, basement, bright spot, bottom currents.

Поступила в редакцию 15.01.2020 г. После доработки 14.03.2021 г. Принята в печать 28.03.2021 г.