

УДК 551.24

## ДЕФОРМАЦИИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АТЛАНТИКИ И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

© 2017 г. С. Ю. Соколов

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 7

e-mail: sysokolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.06.2016 г.

Проведен анализ деформаций осадочного чехла на субширотных геотраверсах к западу и востоку от Срединно-Атлантического хребта (САХ) в экваториальной части океана и его сопоставление с потенциальными полями и значениями вариации атрибута  $Vp/Vs$  на глубине около 470 км. Сформулированы признаки и отличия деформаций осадочного чехла абиссальных котловин от ненарушенного залегания осадков. Установлены элементы цепочки явлений с общим пространственным проявлением и причинно-следственной связью: неоднородные горизонтальные движения, формирующие макротрещиноватость над “холодными” мантийными блоками на глубинах около 470 км; серпентинизация пород верхней мантии; формирование наложенных магнитных аномалий; выделение флюидов, акустически осветляющих осадочную толщу в сейсмическом отображении; разуплотнение пород, приводящее к вертикальным движениям и складчатости штампового типа. Дано объяснение происхождения зоны краевых дислокаций Атлантики. Выявлено совпадение границы деформаций экваториальной Атлантики с нулевой изолинией атрибута  $Vp/Vs$ , являющегося индикатором реологического состояния верхней мантии.

*Ключевые слова:* экваториальная Атлантика, холодные мантийные блоки, потенциальные поля, деформации осадочного чехла, сейсмический разрез, акустическое осветление

DOI: 10.7868/S0016853X17010076

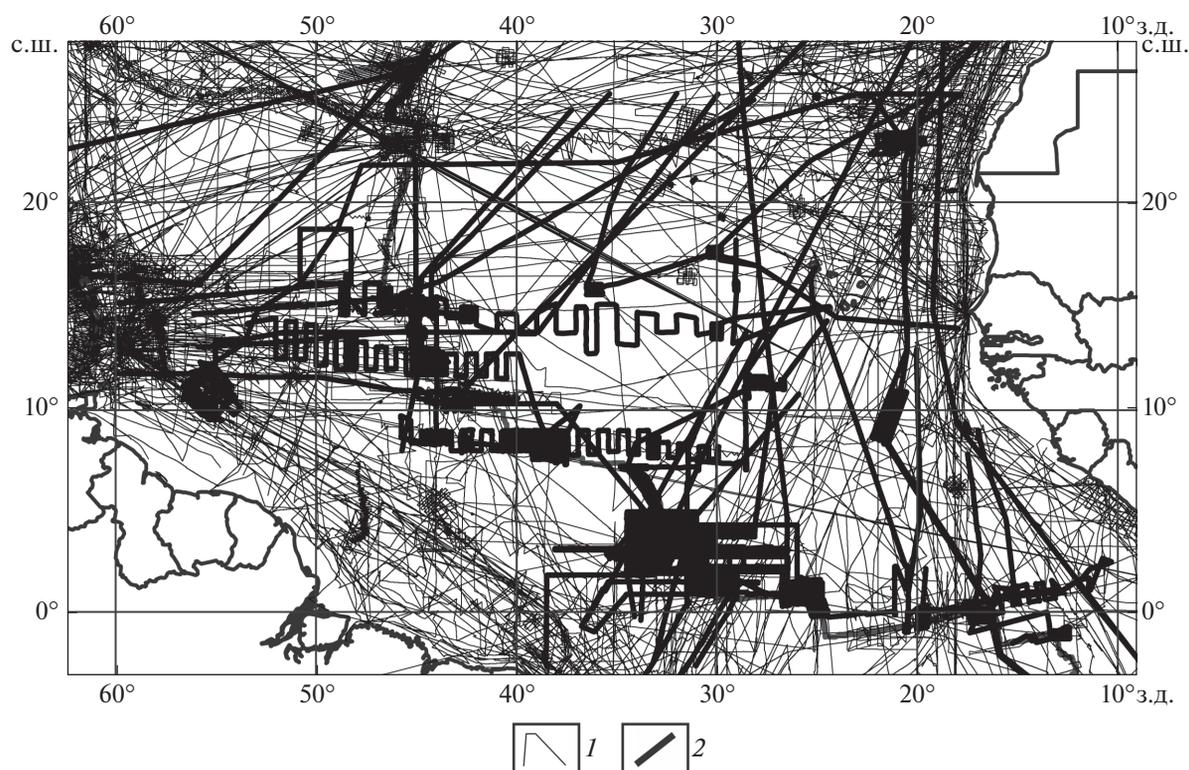
### ВВЕДЕНИЕ

Геофизические данные, получаемые при маршрутных и полигонных промерах с борта научных судов, в отличие от данных дистанционного спутникового наблюдения имеют неравномерную плотность. В экваториальной Атлантике между экватором и 25° с.ш. находится зона, которая по степени экспедиционной изученности, по сравнению с другими районами, близка к белому пятну (рис. 1). Для экваториальной Атлантики Геологическим институтом РАН (ГИН РАН) в период с 1985 по 2006 год с борта НИС “Академик Николай Страхов” был проведен цикл экспедиций, данные которых создают ГИН РАН преимущественно при изучении этого глубоководного района и вносят существенный вклад в развитие новых идей о тектонике океана. Научным руководителем многих экспедиций этого цикла являлся академик Юрий Михайлович Пушаровский. Данные о деформациях осадочного чехла, полученные ГИН РАН в этих экспедициях, показывают необходимость обновления модели тектонической эволюции коры в абиссальных частях океана.

С начала 70-х годов XX века в связи с появлением данных, содержащих записи внутриплитных деформаций осадочного чехла, это явление

стало констатироваться в публикациях, несмотря на то, что их наличие признавалось только для рифтовой стадии развития океанической акватории при ее заложении [32]. Одними из первых примеров описания внутриплитных деформаций котловин Атлантики являются работы [38, 41]. В последней описана структура фронтальной части Барбадосской аккреционной осадочной призмы. Отмечается, что пассивные части трансформных разломов прослеживаются далеко на запад под аккреционным комплексом и то, что упрощенная модель субдукции с деформациями на фронте осадочной призмы в данном регионе не применима для интерпретации наблюдаемых деформаций. Пространственная конфигурация деформаций задается существовавшей структурированностью фундамента котловины по пассивным частям трансформ.

Особо необходимо отметить работы, выполненные вдоль трансатлантического Анголо-Бразильского геотраверса (АБГТ) на широте 12° ю.ш. в полосе от 500 до 1000 км от Бразильской котловины до Ангольской длиной около 4400 км. Работы проводились Министерством геологии СССР и Академией наук СССР (более 20 рейсов). По масштабу и детальности этот геотраверс не имеет аналогов в мировой практике. Основой геотра-



**Рис. 1.** Схема изученности экваториальной Атлантики полигонными и маршрутными геофизическими промерами по данным: 1 – открытого доступа [44]; 2 – Геологического института РАН на НИС “Академик Николай Страхов”

верса является профиль ГСЗ-КМПВ, позволивший построить разрез литосферы до глубины 80 км. Кроме того, съемки сопровождались стандартным комплексом маршрутных геофизических промеров, включая непрерывное сейсмическое профилирование (НСП). Западная и восточная части геотраверса характеризуются деформациями осадочного чехла, которые были выявлены сейсмическими съемками в 1984 году.

Деформационные явления в Атлантике неоднократно отмечались в экспедициях Института океанологии РАН наряду с классическими зонами внутриплитных деформаций в Индийском океане. В работе [8] приведен обзор результатов строения осадочного чехла дна котловин по данным, полученным в 31-м рейсе НИС “Дмитрий Менделеев” (1983–1984 гг.). В трое восточной пассивной части разлома Зеленого Мыса обнаружены пликативные деформации осадочного чехла, имеющие по оценкам [8] верхнемиоценовый возраст, перекрытые с угловым несогласием более молодыми отложениями. В работе [16] отмечается неоднократное обнаружение в работах Института океанологии РАН под руководством Ю.П. Непрочнова и Л.Р. Мерклина структур протыкания в котловинах Атлантики.

Данные 2-го [1] и 3-го рейсов судна Геологического института РАН НИС “Академик Николай Страхов” показали наличие деформаций осадоч-

ного чехла котловин Атлантики, проявленных на значительных площадях внутриплитного пространства. В целом, осадочный чехол представляет собой сейсмокомплекс заполнения расчлененного рельефа магматического фундамента. Отмечается наличие дифференцированных вертикальных тектонических движений, формирующих наклонное положение осадочных тел, многочисленные эпизоды акустического осветления осадочного чехла в районе деформаций и деформации вдоль бортов восточной пассивной части разлома 15°20' (Зеленого Мыса). В серии работ Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов ГИН РАН [10–12, 33] сделано обобщение результатов работ ряда рейсов НИС “Академик Николай Страхов” в экваториальном сегменте. Выявлена многократная активизация тектонических процессов не только в осевой части, но и далеко за ее пределами (более 500 км), а также асимметрия относительно САХ.

Сопоставление данных спутниковой альтиметрии с материалами многолучевого эхолотирования и непрерывного сейсмического профилирования, полученными ГИН РАН на НИС “Академик Николай Страхов” позволило сформулировать ряд важных выводов о строении пассивных частей трансформных разломов и деформациях осадочного чехла [13]. Было установлено наличие сложных деформаций от вертикальных положи-

тельных движений блоков океанической коры за пределами зоны спрединга. Общая конфигурация зон смятия осадков и характер нарушений позволяет предполагать [13], что внутриплитные деформации на значительном удалении от САХ могут быть вызваны сдвиговой кинематикой, в том числе по пассивным частям разломных трогов. Для другой известной зоны внутриплитных деформаций в северо-восточной части Индийского океана была высказана гипотеза об их сдвиговом происхождении [7] по разломным зонам северо-восточной ориентации, не совпадающим с пассивными частями трансформных разломов.

Работы Геологического института РАН на НИС “Академик Николай Страхов” начиная с 1985 года, выполненные под научным руководством акад. Ю.М. Пушаровского, явились одними из первых, в которых фиксируется такое явление как внутриплитные деформации осадочного чехла котловин Атлантики, не связанные с границами плит или континентальной окраиной. Несмотря на появление многих сейсмических данных с деформациями, их ограниченное обсуждение в публикациях указывает на расхождение фактуры с геодинамической моделью тектоники плит, которая дала новую интерпретацию основным тектоническим структурам, но не включала отсутствие жесткости как свойство внутриплитного пространства. Тем не менее, именно это качество выявлено обнаружением деформаций, и поскольку его происхождение и характеристики являются предметом дискуссии, необходимо дальнейшее исследование их пространственного распределения в сопоставлении с комплексом геофизических полей.

### ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ

При выявлении деформационных структур в абиссальных котловинах на сейсмических разрезах используются следующие признаки:

1. Наличие протяженных контрастных рефлекторов в сейсмоакустическом изображении осадочной толщи, имеющих наклон  $>1^\circ$  (рис. 2, признак 1). Рефлекторы с углами  $<1^\circ$  могут быть сформированы облеканием, поскольку это значение наклона для неконсолидированных осадков является критичным при превышении которого неконсолидированный осадок начинает течь по склону [24]. При углах  $>1^\circ$  маловероятно накопление осадочной толщи и ее литификация до состояния с контрастами акустических свойств, создающих рефлектор с наклонными границами внутри чехла. Исключения:

– рефлекторы, расположенные в области налегания на акустический фундамент (значимая дифференциальная компакция);

– волновые образы, сформированные интенсивной разгрузкой гравитационных потоков (турбидиты) и контурных течений (дрифты) с латеральной проградацией.

2. Складчатые деформации с постоянной мощностью между волнообразно изогнутыми рефлекторами (см. рис. 2, признак 2). Исключение: наклон  $<1^\circ$ , при котором облекание неоднородного фундамента неконсолидированными осадками сохраняет форму.

3. Дизъюнктивные нарушения со смещением фаз рефлекторов или вертикальными зонами потери когерентности (см. рис. 2, признак 3). Исключение: вертикальное акустическое осветление, связанное с флюидопотоком.

4. Структуры протыкания (инъективные нарушения), определяемые по сокращению мощности отложений над горизонтом начала роста и (или) локальной эрозии этого горизонта и постепенное выполаживание перекрывающей толщи после окончания роста (см. рис. 2, признак 4).

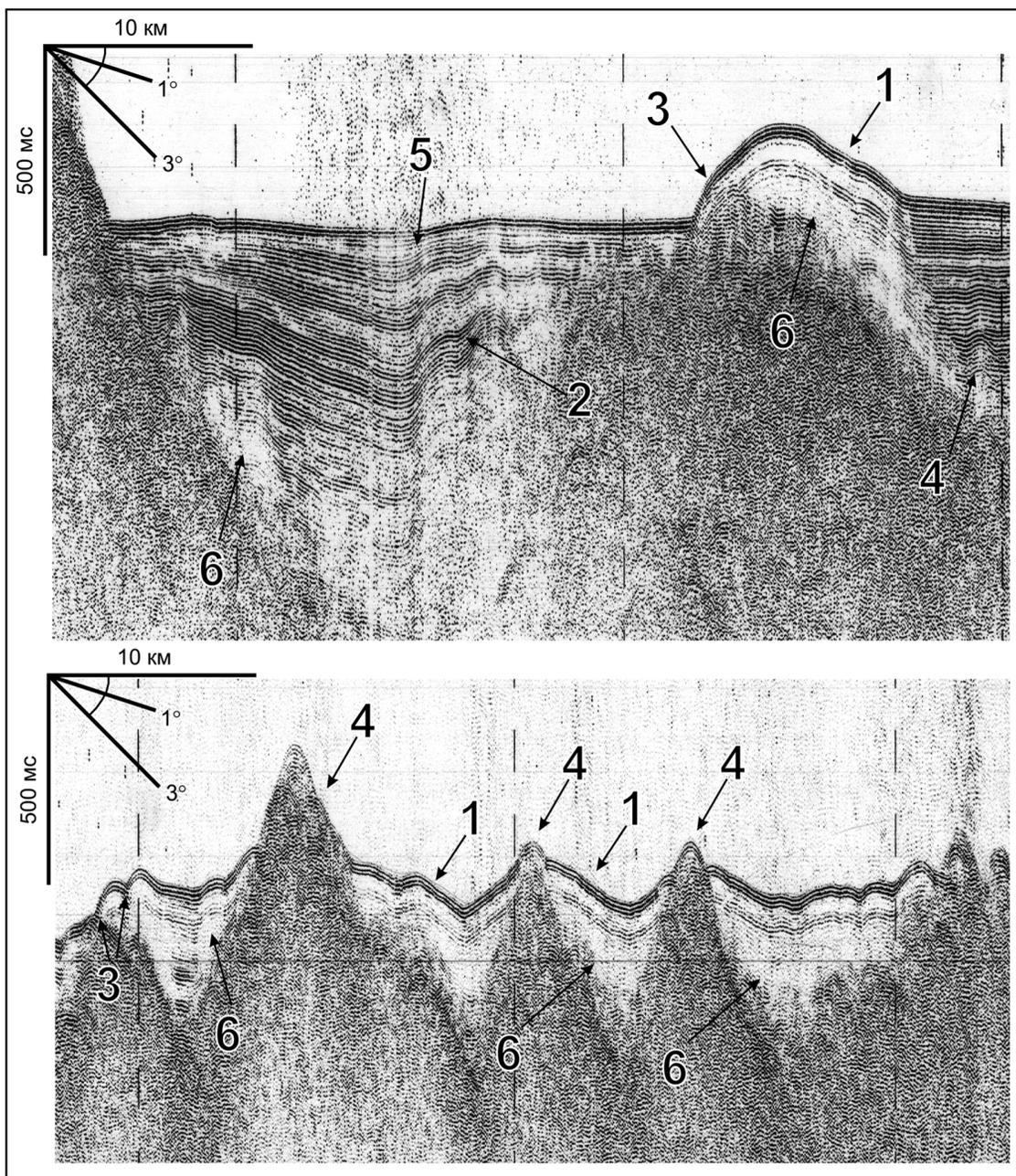
5. Наличие структурного несогласия в виде субгоризонтального налегания молодых отложений на более древние, имеющие признаки складчатых деформаций, дизъюнктивных нарушений и структур роста, иногда сопровождающееся эрозией (см. рис. 2, признак 5).

6. Акустическое осветление абиссальных разрезов, ассоциируемое с поступлением флюидов в слабоконсолидированный чехол, имеет место вблизи выступов акустического фундамента, значительно превышающих уровень дна (см. рис. 2, признак 6). Осветление имеет форму либо вертикальных труб, либо субгоризонтальных линз, расположенных непосредственно над фундаментом. Акустическое осветление сопровождается большинством деформационных структур фундамента.

Перечисленные признаки позволяют определить наличие деформаций осадочного чехла. Далее предполагается, что при описании фактов деформаций что-то из приведенного списка присутствует в сейсмических записях.

В работе [15], выполненной совместно с Г.Б. Удинцевым и А.Ф. Бересневым, отмечается, что, начиная с работ Г.Б. Удинцева в Атлантике 1966 года, к моменту написания цитируемой работы, по изучению морфологии рельефа САХ повсеместно была оконтурена “зона краевых дислокаций” (ЗКД) шириной до 400 км, сопровождающаяся деформациями осадков. Причиной деформаций указывается горизонтальное сжатие, хотя конфигурация деформированных рефлекторов, зафиксированных во многих рейсах Геологического института РАН, не содержит признаков, характерных для зон сжатия.

В работе [1] проведено обобщение широтных геотраверсов, выполненных методом НСП во 2-ом рейсе НИС “Академик Николай Страхов”.



**Рис. 2.** Признаки деформаций осадочного чехла абиссальных котловин по данным экспедиций Геологического института РАН.

Цифрами обозначены: 1 – наклонные рефлекторы в осадочной толще с углами  $>1^\circ$ ; 2 – постоянная мощность между рефлекторами в записи складчатого вида; 3 – дизъюнктивные нарушения; 4 – структуры протыкания; 5 – структурные несогласия; 6 – акустическое осветление осадочной толщи в виде линз и газовых труб

На западном фланге САХ выделена область между  $11^\circ$  и  $20^\circ$  с.ш. шириной около от 200 до 400 км, совпадающая с ЗКД по [15], в которой проявлены деформации осадочного чехла – пликативные и дизъюнктивные – связанные с вертикальными движениями блоков фундамента. В пределах осадочной толщи между дном и акустическим фундаментом, сформированным дифрагированным волновым полем от неровностей поверхности базальтов, выделено 3 сейсмических комплекса, все

из которых нарушены в зонах деформаций, что позволяет сделать вывод о современном возрасте нарушений. Отмечается также, что в ряде случаев нарушены только комплексы 2 и 3, а комплекс 1, самый молодой, залегает на них, формируя заполнение неровностей рельефа кровли более древних комплексов и акустического фундамента.

Работы в пределах АБГТ выявили многочисленные проявления внутриплитных деформаций с признаками субширотного сжатия, и вместе с

классическими проявлениями деформаций в северо-восточной части Индийского океана они описаны в работах А.И. Пилипенко [17–19]. В западной части Бразильской котловины на субширотных разрезах наблюдаются структуры типа надвигов с восточной вергентностью доседиментационного происхождения. В восточной части котловины на удалениях от 600 до 100 км от САХ (возраст коры ~5–7 млн лет) выявлены надвиговые структуры, смещающие также и осадочный разрез с амплитудами взброса до 150 м. Интересно, что в Ангольской котловине также выявлены чешуйчато-надвиговые структуры с восточной вергентностью. Размеры блоков между нарушениями колеблются от 7 до 15 км. Отмечается наличие структурных неоднородностей косой северо-западной ориентации к западу от САХ. А.И. Пилипенко [19] интерпретирует происхождение этих структур в терминах нелинейной геодинамики Ю.М. Пушаровского [21] и тектонической расслоенности.

Вдоль дивергентной границы плит – САХ – при остывании литосферы и серпентинизации верхней мантии на флангах САХ [31] на удалениях от оси рифта до 350 км возникают деформации маломощных осадков, выраженные преимущественно малоамплитудными сбросами и наклонными рефлекторами в осадочных телах, заполняющих изолированные ниши фундамента [33]. Эти деформации вписываются в рабочую геодинамическую модель формирования океанической литосферы. Также к деформациям, вписанным в модель, следует отнести аномалии строения осадочного чехла фронтальной части Барбадосской аккреционной призмы, но при переходе к заполненным осадками трогам пассивных частей разломов появляются штамповые складчатые структуры, которые плохо объяснимы взаимодействием с фронтом призмы. В работе [23] описаны деформации океанической коры, которые по сейсмическим данным имеют отчетливые признаки выполаживания плоскости сместителя. Этим формируется тектоническая расслоенность океанической коры. Подавляющее большинство приведенных примеров [23] расположены вблизи границ плит около крупных трансформных разломов. Это означает, что данные деформации не относятся собственно к внутриплитным и могут быть объяснены типом взаимодействия (транспрессия или трансенсия) плит вдоль границы между ними, затухающем при удалении от границы.

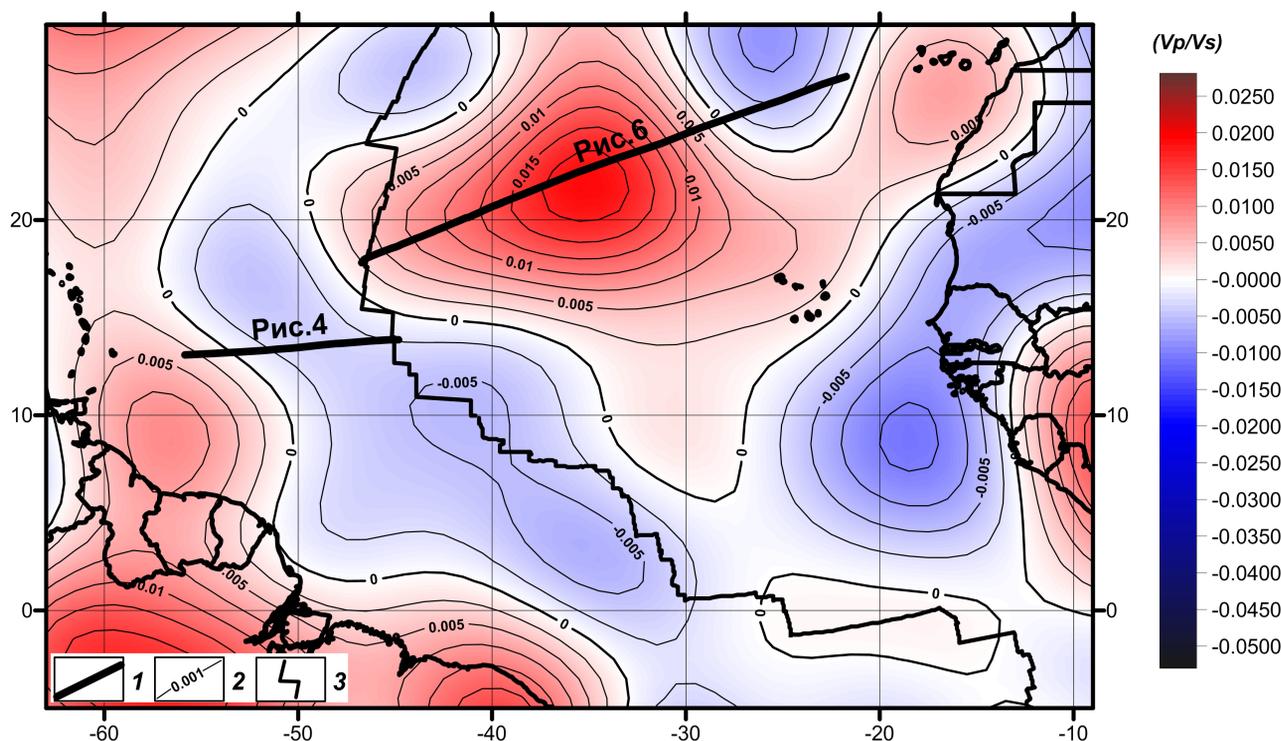
Ю.Н. Разницын [22] указывает что, зоны тектонического торошения и скупивания занимают не менее 70% площади глубоководной части Бразильской котловины. При этом юго-западные склоны складок отчетливо имеют большую крутизну чем северо-восточные. В котловинах симметрично САХ надвиги имеют вергентность в сторону хребта, хотя в Ангольской котловине

встречается и восточный наклон. В целом авторы [22] констатируют наличие как на участках выровненного, так и расчлененного (ближе к оси САХ) фундамента котловины обстановки субширотного сжатия. Указывается, что сжатие может быть реализовано в виде надвигов по тем же плоскостям срывов, по которым в процессе рифтогенеза происходило формирование листрических сбросов в фазе растяжения. Причины возникновения расслоенности не обсуждаются.

Отметим еще одно важное для понимания характера деформационных процессов явление, выявленное в сдвиговых зонах трансформных разломов [40]. На примере сдвоенной разломной зоны Чарли Гиббс показано существование синтетических сколов Риделя на удалениях до первых десятков километров от основного разрыва на флангах САХ, примыкающих к офсетной части трансформного разлома и прослеживаемых субширотно за ее пределами около пассивных частей разлома. Этот вывод был сделан по данным глубоководной сонарной системы GLORIA (Великобритания). Наличие структур косой ориентации по отношению к главным ортогональным элементам спредингового тектогенеза вполне обосновано характером распределения напряжений в сдвиговой обстановке. Сходные косые трогги в экваториальной Атлантике заполнены осадочным чехлом [31]. Осадочный чехол в офсетных частях трансформных разломов [40] деформирован сдвигом, причем более подвижное крыло в поперечном сейсмическом разрезе неконсолидированных осадков имеет поднятия амплитудой до 200 метров.

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ С ГЛУБИНЫМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ

Важным параметром, определяющим глубинное геодинамическое состояние в верхней мантии является отношение скоростей продольных и поперечных волн. Оно зависит от коэффициента Пуассона [27] и определяет способность среды течь (реология). В разведочной геофизике атрибуты, учитывающие это отношение используются для детекции в волновом поле аномалий, связанных с флюидами [6]. Проведенное сопоставление геолого-геофизических параметров вдоль оси САХ с атрибутом вариации отношения  $\delta(V_p/V_s)$  [26] показало, что они связаны с чередованием минимумов и максимумов атрибута на глубине около 500 км. Минимумы атрибута связаны с макротрещиноватостью на поверхности, большими (>200 км) субширотными смещениями оси САХ, нетипичными механизмами очагов землетрясений, минимумами асимметрии полускоростей спрединга. Поскольку полускорости спрединга могут отличаться в разы между блока-



**Рис. 3.** Горизонтальный срез куба вариации отношения  $\delta(Vp/Vs)$ , рассчитанного по сейсмографическим данным для Р и S волн [29, 34, 42] на глубине 470 км. 1 – положение разрезов НСП и графиков потенциальных полей, представленных на рисунках с соответствующими номерами; 2 – изолинии отношения  $\delta(Vp/Vs)$ ; 3 – осевая линия САХ

ми, разделенными трансформными разломами, это указывает на возможность деформаций между блоками вдоль пассивных частей разломов. Максимумы атрибута  $\delta(Vp/Vs)$  связаны с длинными сегментами САХ, не содержащими трансформных разломов, минимумами аномалий Буге, указывающими на региональное разуплотнение и прогрев. Перечисленные параметры и их особенности указывают на то, что геодинамическое состояние мантии на средней глубине около 500 км и выше определяет их распределение на поверхности.

На рис. 3 приведен горизонтальный срез куба атрибута  $\delta(Vp/Vs)$ , рассчитанного по сейсмографическим данным для Р и S волн для экваториального сегмента Атлантики на глубине 470 км. Отмечается распространение “холодных” блоков (значения  $<0$ ) под зонами с максимальной длиной трансформных смещений оси САХ и “горячих” зон (значения  $>0$ ) в районах локальных ответвлений Африканского суперплюма: Азорского, Канарского и островов Зеленого Мыса. Разница реологических свойств на указанной глубине обеспечивает более подвижную динамику в “горячих” зонах пониженной вязкости мантии (ductile mantle) и наличие повышенной макротрещиноватости (brittle mantle) с нетипичной сейсмичностью в зонах больших смещений САХ над “холодными” блоками. Карта рис. 3 показы-

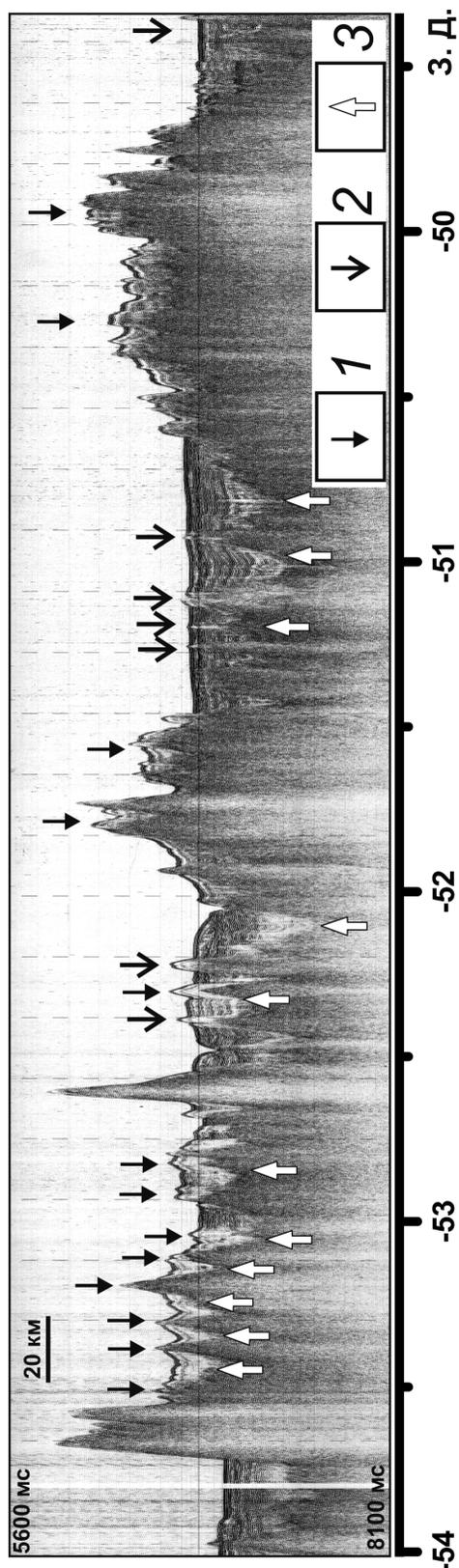
вает, что единая “горячая” система под САХ отсутствует и на площади акватории Атлантики фоновое значение преимущественно “холодное”. Общая конфигурация аномального поля содержит группу изолированных “горячих” максимумов, встроенных в фоновое поле и соответствующих вышеуказанным ответвлениям суперплюма.

Схема работ ГИН РАН (см. рис. 1), в которых были установлены внутриплитные деформации осадочного чехла, расположена в экваториальном сегменте САХ практически в пределах “холодного” блока на глубине около 470 км (см. рис. 3). Установленные деформации связаны также с пассивными частями трансформных разломов [13] и с разломными структурами северо-западной ориентации [14], которые в целом имеют тот же азимут, что и “холодный” мантийный блок. Для анализа пространственного распределения деформаций и их связи с геофизическими полями целесообразным является выбор из данных ГИН РАН длинных и прямых геотравверсов, пересекающих аномальные зоны субперпендикулярно оси САХ на обоих флангах (см. рис. 3).

#### ГЕОТРАВЕРС ЗАПАДНОГО ФЛАНГА САХ

Геотравверс западного фланга САХ представлен на рис. 4. На нем прослеживается осадочный чехол от минимальных значений на востоке на





**Рис. 5.** Фрагмент геотраверса западного фланга САХ (положение см. рис. 3) с деформациями осадочного чехла. 9-й рейс НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1989; начальник рейса – Ю.Н. Разницин, начальник НСП – В.М. Побержин). 1 – центры штамповых складок; 2 – структуры протыкания; 3 – зоны акустического осветления

флангах САХ до 1–1.3 км на западе в котловине перед Барбадосской аккреционной призмой на пределе глубинности метода НСП. Разрез показывает наличие деформаций осадочного чехла (рис. 5) и акустическое осветление нижней части разреза, прилегающей к акустическому фундаменту. В начале отметим, что в середине фрагмента около отметки долготы  $-51^\circ$  (см. рис. 5) наблюдается почти недеформированное залегание рефлекторов: запись осадочных карманов является типичной абиссальной сейсмофазией заполнения с последующей дифференциальной компакцией, приводящей к проседанию изначально горизонтальных рефлекторов во впадинах фундамента и относительному задиранию на склонах. К современной поверхности осадконакопления неровности рефлекторов выполаживаются. Главной особенностью подобных осадочных тел является налегание на фундамент и отсутствие рефлекторов его облекающих. Тем не менее в указанном фрагменте стандартной абиссальной записи имеются отдельные структуры протыкания (piercement structures).

Деформационное происхождение рефлекторов осадочного чехла на возвышенности около долготы  $-50^\circ$  (см. рис. 5) обосновывается тем, что основные рефлекторы облекают фундамент, мощность достигает 300 мс, но реальные углы залегания имеют значения около  $2^\circ$  (в ряде мест до  $4^\circ$ ). Накопление в абиссали глинистых осадков такой мощности при таких углах с формированием промежуточных рефлекторов без процессов оползания маловероятно. Деформационный генезис подобной структуры часто ставится под сомнение, но значения углов и промежуточные рефлекторы с выдержанной мощностью внутри изгибов, на наш взгляд, указывают именно на современные деформации, а не на фоновое осадконакопление. При последнем возможно заполнение неровностей фундамента облеканием, но при углах менее  $1^\circ$ . При увеличении углов и мощности в соседстве с сейсмичным САХ слабоконсолидированный осадок будет иметь тенденцию к локальному выравниванию заполнения неровности фундамента.

Происхождение акустического осветления низов осадочного чехла практически без других версий объясняется появлением флюидов из пород акустического фундамента. Генезис же самих флюидов является отдельной темой для дискуссий. Наиболее обоснованной является гипотеза, объясняющая появление флюидов как продуктов серпентинизации с выделением водорода и образованием метана [4, 30]. Из-за повышенной макротрещиноватости и остывания литосферы при удалении от САХ происходит доступ воды к ультраосновным породам верхней мантии, что приводит в действие упомянутый процесс серпентинизации при температурном диапазоне от  $\sim 100$  до  $\sim 450^\circ\text{C}$ . Образовавшийся при взаимодействии  $\text{H}_2$

с  $\text{CO}_2$  метан формирует акустические аномалии в сейсмической записи. Особенно сильное осветление наблюдается в пределах долгот от  $-53.5^\circ$  до  $-52^\circ$  (см. рис. 5). В основном осветление охватывает весь диапазон от фундамента до дна, но в осадочном кармане около  $-52^\circ$  осветление охватывает только низы чехла, по мощности равные остальным эпизодам осветления – около 250 мс. Если принять постоянную скорость насыщения флюидом осадочной толщи, можно предположить, что его выделение стартовало одновременно на всем профиле, причем скорее всего синхронно с деформациями. В центральной части кармана около  $-51^\circ$  (см. рис. 5) имеется структура протыкания, около которой отмечено наличие газовой трубы – вертикальной полосы акустического осветления постоянной ширины. Признаком структуры протыкания является наличие сокращения мощности между рефлекторами верхней части разреза при постоянной мощности между рефлекторами, сформированными до начала процесса протыкания. Сочетание структур протыкания и акустического осветления записи является индикатором деформационных процессов.

Деформированные осадки, за исключением структур протыкания, наблюдаются на выступах акустического фундамента, расположенных гипсометрически выше дна котловин в среднем на 300–500 м (см. рис. 4, 5). То, что имеет на этих выступах форму облекания, фактически не является таковым по механизму формирования осадочного чехла. При этом аналогичные неровности базальтового фундамента ниже этого уровня заполнены осадками без образования наклонных рефлекторов, облекающих фундамент. Причиной, по которым на выступах фундамента указанной амплитуды, не поднимающихся выше уровня карбонатной компенсации, расположены деформированные осадки, является складчатость поперечного изгиба (штамповая). Она возникает при увеличении объема породы, подверженной серпентинизации, и при связанных с этим процессом вертикальных движениях в условиях менее вязкого состояния породы. Причинно-следственная связь деформационных зон с развитием серпентинизированных пород является установленной и неоднократно описана в литературе по Индийскому океану, например [5, 9]. Особо отметим, что западная граница деформированной зоны (см. рис. 4) совпадает с границей “холодного” мантийного блока по данным отношения  $V_p/V_s$  (см. рис. 3), который связан с зонами максимального смещения САХ и макротрещиноватостью. Последняя является необходимым элементом для доступа воды к породам верхней мантии и старта процесса серпентинизации.

Профиль рельефа показан на рис. 4 по мелко-масштабной 30-секундной матрице GEBCO [43] для общего структурного фона при наличии про-

пусков в сейсмической записи. Далее (снизу вверх) следует график намагниченности, рассчитанный по данным аномального магнитного поля (АМП) EMAG2 [36] (верхний график) с использованием данных по рельефу и мощности осадочного чехла как суммарного расстояния до источника поля. Области проявления деформаций и акустического осветления низов разреза представлены заметными аномалиями намагниченности, большими по амплитуде, чем аномалии в районе САХ. Поскольку по мере остывания литосферы на флангах формируются условия для серпентинизации мантийных ультраосновных пород, то образование магнитоактивных прослоев при данном процессе активизируется, что приводит к появлению дополнительной компоненты АМП, нарушающей систему аномалий, сформированную спредингом. Этот индикатор важен при интерпретации деформаций, поскольку указывает на очаги серпентинизации, в которых происходит увеличение объема пород до 20% и соответственно уменьшение плотности пород [27]. Не менее важным является побочное образование магнетита [4], за счет чего интенсивность АМП при удалении от САХ увеличивается [3]. Отметим сильную аномалию С33 на западе геотраверса (см. рис. 4). Первые кайнозойские линейные аномалии С34 и С33 обладают большой амплитудой во всей акватории Атлантики [36] и к вторичным процессам образования магнитоактивного слоя, по всей видимости, не относятся.

Снижение плотности пород при достаточно большом серпентинизированном объеме должно формировать минимумы поля аномалий Буге (см. рис. 4). На долготе  $-52.5^\circ$  фиксируется заметный минимум на 25 мГал меньше окружающего фонового значения в котловине  $\sim 350$  мГал. На долготе  $-51.75^\circ$  наблюдается менее глубокий минимум, но они оба связаны с зонами деформаций. Эта связь делает возможной количественную оценку мощности серпентинизированных пород по гравитационному полю, но в настоящий момент статистика по деформированным зонам для построения модели недостаточна. Уровень аномалий Буге, рассчитанных без учета термальной коррекции, закономерно снижается к оси САХ, где превалирует гравитационный эффект от прогретого и разуплотненного вещества верхней мантии.

Расчет изостатических аномалий представляет собой определение гравитационного эффекта от поверхности мантии, рассчитываемой по рельефу дна пропорционально отношению плотностей (модель Эри) и вычитание его из аномалий Буге, рассчитанных по тому же рельефу [25]. Анализ аномалий Буге и изостазии на представленном геотраверсе (см. рис. 4) показывает, что положительная корреляция этих полей, рассчитываемых по одним и тем же данным, наблюдается в абис-

сальных котловинах, где практически нет нарушений изостатического равновесия, сопоставимых с САХ. Корреляция нарушена в рифтовой зоне САХ и на его флангах до 350 км. В этих структурных зонах изостатическое равновесие нарушено процессами рифтогенеза и перехода литосферы из прогретого в остывшее состояние, которое в основном достигается на указанном удалении. На этих же удалениях (350–400 км) изостатические аномалии затухают (см. рис. 4) приближаясь к фоновым для Атлантики значениям 20–25 мГал [2]. Увеличение значений изостазии к западу от долготы  $-52^\circ$  (см. рис. 4) связано с современными движениями с вертикальной компонентой, формирующими избыток масс механизмом, отличным от подъема вещества в рифтовой зоне. Данное увеличение избытка масс сформировано сравнительно недавно, поскольку изостатической компенсации до фонового значения еще не произошло, деформированные осадки не содержат признаков выравнивания, но присутствуют современные врезы донных течений около долгот  $-52^\circ$  и  $-52.5^\circ$ . Аналогичная комбинация значений потенциальных полей наблюдается на геотраверсе в районе  $-47.6^\circ$ , но поскольку там отсутствует значимый осадочный чехол, установить что-либо о деформации поверхности акустического фундамента является затруднительным.

### ГЕОТРАВЕРС ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА САХ

Геотраверс восточного фланга САХ представлен на рис. 6. Значимый осадочный чехол в его пределах начинается с долготы  $-30^\circ$  в пассивных частях разломов — «отшельников» — трансформный разлом, имеющий четко выраженный трог, но не имеющий активной части в зоне САХ, где глубины дна превышают 6000 м. Чехол наблюдается на разрезе в указанном трогге к северо-востоку от пассивной части разлома Кейн (долгота  $-34.2^\circ$ ). Разрез вплоть до долготы  $-28.3^\circ$  представлен недеформированным осадочным чехлом, заполняющим неровности акустического фундамента. Далее на северо-восток сейсмофа́ция заполнения сменяется эшелонированной системой из 10 квестоподобных поднятий шириной от 10 до 20 км, покрытых осадочным чехлом с рефлекторами, имеющими угол от  $1.5^\circ$  до  $4^\circ$  (рис. 7, фрагмент 1). Разрез кроме деформаций содержит акустическое осветление нижней части осадочной толщи, прилегающей к акустическому фундаменту, и газовые трубы (см. рис. 7, фрагмент 2). Отметим мозаичность зон деформаций, между которыми присутствуют интервалы ненарушенного залегания осадков ( $-27.9^\circ$ ) и сходство деформаций (особенно прилегающих к подводной горе) с чешуйчато-надвиговой системой взбросов, которая может быть определена по морфологии рефлекторов между дном и фундаментом,

включая промежуточные (см. рис. 7, фрагмент 1). Эта морфология является типичной для взбросо-надвиговых нарушений. Кроме того, все они имеют юго-западную вергентность в соответствии с ориентацией разреза.

К северо-востоку от подводной горы характер деформаций меняется. Основная часть осадочного чехла в указанном фрагменте (см. рис. 7, фрагмент 2) является стандартной абиссальной записью с дифференциальной компакцией фаций заполнения, но с отдельными структурами протыкания (например, около долгот  $-24.5^\circ$  и  $-24^\circ$ ). Акустическое осветление низов осадочного чехла имеет форму слоя над фундаментом и вертикальных газовых труб. Особенно сильное осветление наблюдается около долготы  $-25^\circ$  в 120 км на северо-восток от подводной горы. Вся северо-восточная часть профиля за исключением указанного интервала пронизана газовыми трубами, не достигающими до кровли осадочного чехла от 150 до 250 м вне зависимости от глубины корня труб. Это говорит о том, что скорее всего причиной этого является литологический состав отложений на этой глубине. По данным глубоководного бурения DSDP рейса 14 в скважине 138 [35] в интервале от 150 до 240 м по дном вскрыта толща плотных глин предположительно раннекайнозойского возраста, скорость бурения в которой скачкообразно замедлилась в 4 раза. Ниже этой толщи залегают глины с кремнями и алевролитовыми прослоями с кремнистым цементом. По всей видимости отложения этого интервала могут являться барьером для продвижения газовых труб вверх по разрезу. Проекция положения скважины 138 на разрез показана на рис. 7. Близость сильного осветления около долготы  $-25^\circ$  к горам вулканического происхождения делает актуальной дополнительную версию происхождения осветляющих флюидов — магматическую. В других частях разреза (см. рис. 7) основной является версия, основанная на серпентинизации. Анализ состава осадков и их литологии не проводился.

На восточном геотраверсе, также как и на западном, деформированные осадки, за исключением структур протыкания, наблюдаются на выступах акустического фундамента, расположенных гипсометрически выше дна котловин в среднем на 300–500 м (см. рис. 4–7). Выше было указано, что деформации возникают при увеличении объема породы, подверженной серпентинизации, и при процессах, связанных поступлением флюидов. Особо отметим, что и на восточном профиле западная граница деформированной зоны (см. рис. 5) совпадает с границей «холодного» мантийного блока по данным отношения  $V_p/V_s$  на глубине 470 км (см. рис. 3), которое связано с макротрещиноватостью на поверхности. Последняя необходима для доступа воды к породам верхней мантии и старта процесса серпентинизации.

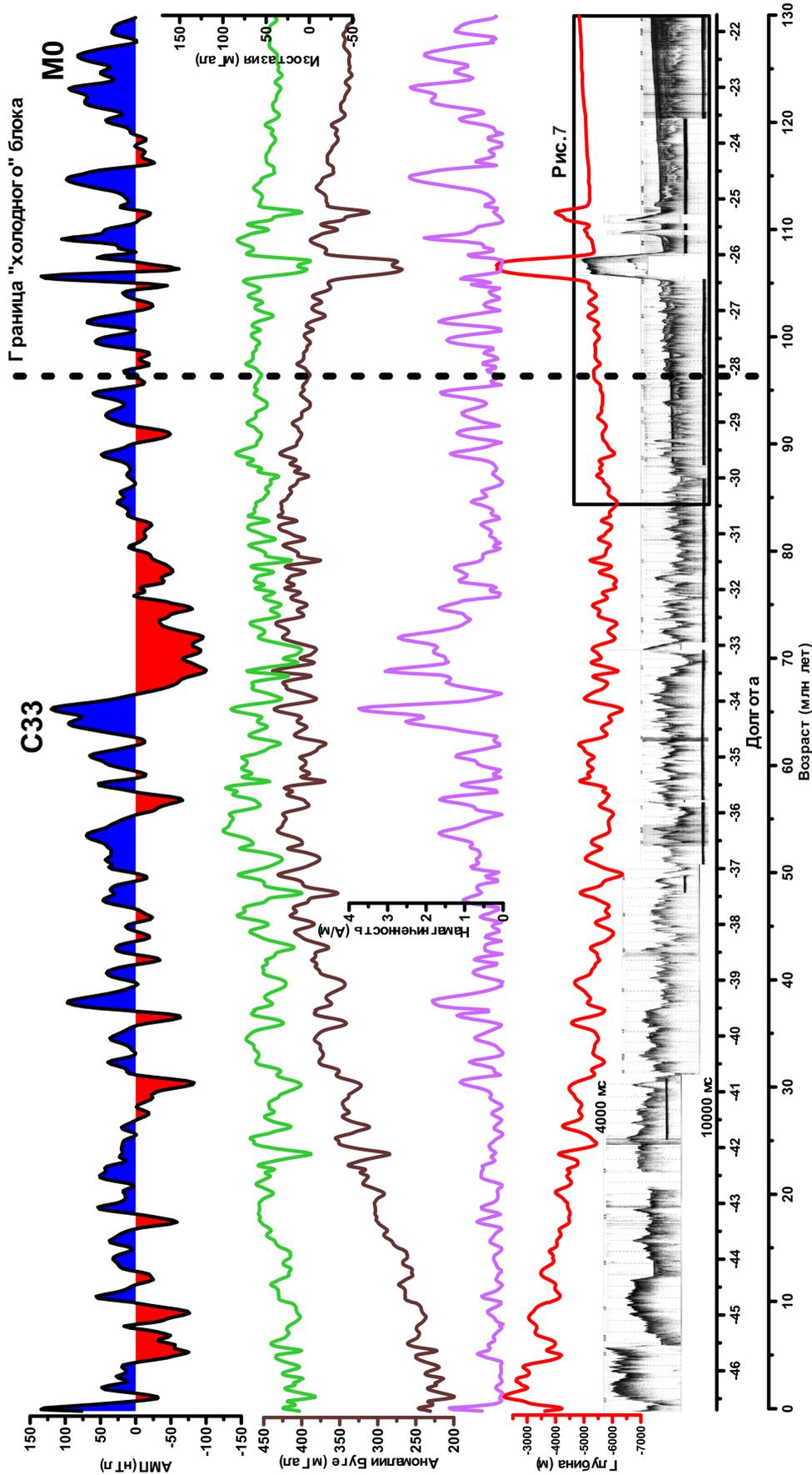
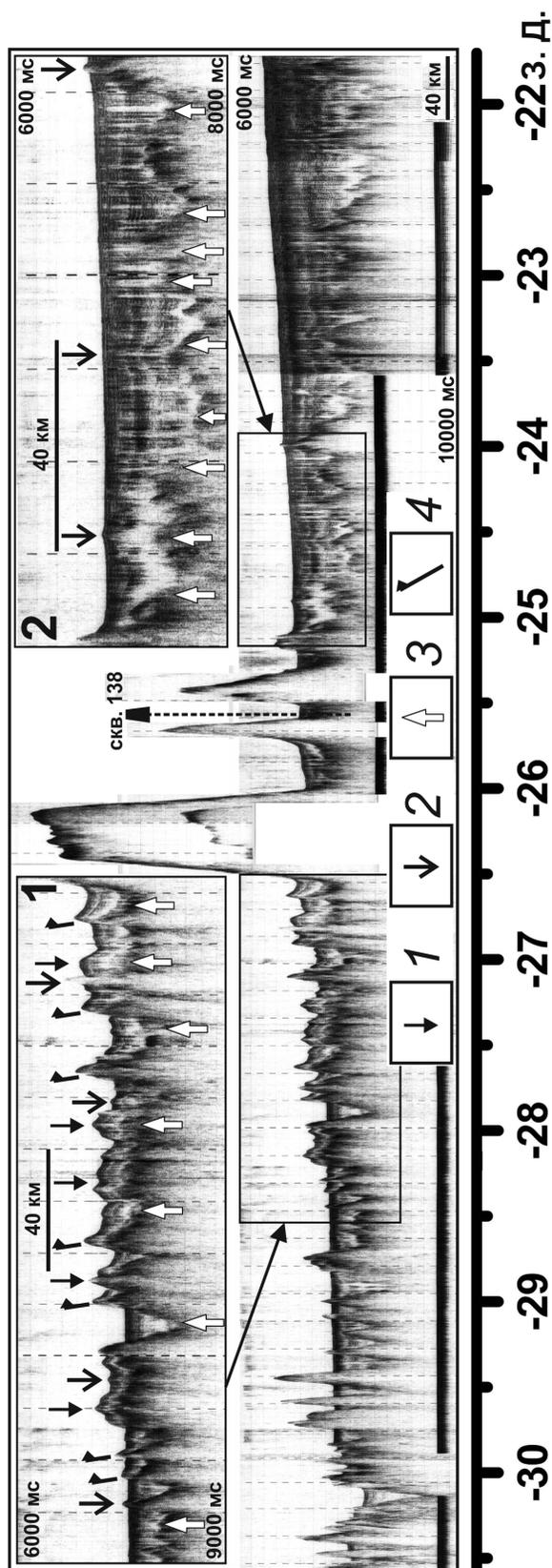


Рис. 6. Геотраверс восточного фланга САХ: разрез НСП от САХ (17°48' с.ш., 46°43' з.д.) до Канарских о-вов (27°21' с.ш., 21°41' з.д.) в абиссальной котловине Зеленого Мыса (положение см. рис. 3). 12-й рейс НИС «Академик Борис Петров» (ГЕОХИ РАН, 1989; начальник рейса – Л.В. Дмитриев, начальник НСП – В.Н. Ефимов). Графики потенциальных полей (снизу вверх): рельеф (метры) [43], намагниченность фундамента (А/м), аномалии Буге (мГал), изостазия (мГал), аномальное магнитное поле (нТл) [36]. Общая длина геотраверса – 3000 км. Шкала возраста дана по [37]



Рельеф показан на рис. 6 по матрице GEBCO [43] для общего структурного фона к сейсмической записи. Далее (снизу вверх) следует график намагниченности, рассчитанный по данным ано-

Рис. 7. Фрагмент геотраверса к востоку от САХ (положение см. рис. 3) с деформациями осадочного чехла. 12-й рейс НИС “Академик Борис Петров” (ГЕОХИ РАН, 1989; начальник рейса – Л.В. Дмитриев, начальник НСП – В.Н. Ефимов). Фрагмент 1 – деформации к западу от подводной горы. Фрагмент 2 – акустическое осветление осадочной толщи к востоку от подводной горы. Показана проекция скважины DSDP 138 [35] на линию разреза. 1 – центры штамповых складок; 2 – структуры протыкания; 3 – зоны акустического осветления; 4 – взрывовые нарушения

мального магнитного поля (АМП) EMAG2 [36] (верхний график) с использованием данных по рельефу и мощности осадочного чехла как суммарного расстояния до источника поля. Аномалии в области последних кайнозойских хронов и первых мезозойских имеют повышенную амплитуду по всей Атлантике и, вероятнее всего, связаны с продуктивностью магматизма. Аномалии намагниченности в области проявления деформаций и акустического осветления низов разреза обладают уровнем, повышенным, по сравнению с районами в пределах флангов САХ. Выше это было связано с остыванием литосферы и формированием условий для серпентинизации мантийных ультраосновных пород с образованием магнетита [4]. Отсутствие экстремума над подводной горой связано с тем, что профиль пересекает интенсивную (до 250 нТл) [36], но ассиметричную аномалию подводной горы практически по линии перехода через ноль от максимумов к минимумам. Они, также как и отмеченные выше большие значения АМП связаны с продуктивным, но точечным магматизмом.

К северо-востоку от долготы  $-30^\circ$  в зоне деформаций фоновый уровень аномалий Буге (см. рис. 6) начинает снижение, которое может быть связано с локальным уменьшением плотности серпентинизированных пород. Но этот эффект не превышает 20–25 мГал и проявлен в виде небольших локальных минимумов. Проявления точечного продуктивного магматизма (долгота  $-26.2^\circ$ ) приводят к локальному падению аномалий Буге более чем на 110 мГал, но не формируют региональный фон. Падение фоновых значений аномалий Буге с долготы  $-30^\circ$  от 400 до 340 мГал связано с недоучетом эффекта осадочного слоя, мощность которого к северо-восточной границе разреза доходит до 2000 мс (см. рис. 7). С учетом оценочных значений скоростей сейсмических волн мощность этого слоя может достигать 3.2 км. Принимая во внимание разницу плотностей между осадками и базальтовым слоем, отрицательный гравитационный эффект неучтенных масс при средней плотности коры  $2.75 \text{ г/см}^3$ , использовавшейся при расчете аномалий Буге, будет плавно нарастать вместе с увели-

чением мощности осадков и снижать фоновый уровень аномального поля. Так же как и на западном геотраверсе, уровень аномалий Буге, рассчитанных без учета термальной коррекции, закономерно снижается к оси САХ.

Расчет изостатических аномалий и их сравнение с аномалиями Буге на восточном геотраверсе (см. рис. 6) показывает, что положительная корреляция этих полей, начиная с вариаций шириной 25–30 км, наблюдается в абиссальных котловинах, где отсутствуют нарушения изостатического равновесия. Корреляция нарушена в интервале от рифтовой зоны САХ и на его флангах до расстояния около 450 км, после которого поведение полей синхронизируется. Это отклонение от редукции Буге такое же по ширине, как и на западном фланге САХ, но при этом изостазия меньше фонового значения. Подобная асимметрия расхождения аномалий Буге и изостазии может быть связана с общим западным дрейфом плит, создающим избыток масс на западе. Отметим только, что асимметрия различных геофизических параметров относительно оси САХ является достоверным фактом, но в данной работе эта тема обсуждаться не будет. Увеличение расхождения изостазии и аномалий Буге к востоку от долготы  $-30^\circ$  (см. рис. 6) связано с современными движениями с вертикальной компонентой, формирующими избыток масс. Кроме серпентинизации источником этих движений может магматическая деятельность, подпитываемая ветвями Африканского суперплюма, создающими вулканические архипелаги Канарских о-вов и Зеленого Мыса.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленный материал показывает, что такие явления как деформации осадочного чехла абиссальных котловин, акустическое осветление разреза, увеличение намагниченности и локальные минимумы гравитационных аномалий связаны общим пространственным проявлением, что указывает на причинно-следственную связь. Процесс формирования упомянутого сочетания параметров выглядит следующим образом. Неоднородные горизонтальные движения в котловинах за пределами САХ, вызванные асимметрией полускоростей спрединга [26] и перепадом скоростей от блока к блоку [37] при контрастном чередовании “холодных” и “горячих” мантийных блоков на глубинах около 500 км, смещения вдоль пассивных частей трансформных разломов [13] в условиях сжатия или растяжения сопровождаются увеличением такого параметра как общая макротрещиноватость. В экваториальной Атлантике это наблюдается по изменению в котловинах числа трогов разломов–“отшельников”, превышающим число реальных трансформных разломов,

смещающих САХ, что можно наблюдать по данным спутниковой альтиметрии [39].

Макротрещиноватость увеличивает возможность доступа воды в консолидированную кору и верхнюю мантию, и при ее остывании до температур ниже  $450^\circ\text{C}$  на некотором удалении от САХ могут возникнуть условия для серпентинизации пород верхней мантии [4, 30]. Этот процесс сопровождается образованием магнетита, что приводит к дополнительной компоненте АМП, наложенной на спрединговые линейные аномалии. Также формируется флюид, который при миграции вверх по осадочному разрезу – по разломной сети или сквозь слабоконсолидированные осадки – создает акустическое осветление разреза, регистрируемое на многих сейсмических записях. Поскольку серпентинизация сопровождается увеличением объема, за ней следует проявление складчатости штампового типа, разрывающей осадки, формирующей наклонные рефлекторы и поднимающей деформированные блоки над общим уровнем дна, выровненного осадконакоплением. Следствием увеличения объема является снижение плотности и формирования сопутствующих локальных минимумов гравитационных аномалий. Таким образом, дифференцированное по глубине горизонтальное движение крупных литосферных блоков приводит к процессам преобразования коровых и мантийных пород с вертикальной компонентой движения, образующей деформации осадочного чехла. В местах проявлений плюмового магматизма деформации могут иметь генезис, зависящий от взаимодействия коры и осадочного чехла с локальным подъемом разогретого вещества.

По данным [20] статистическое распределение температур генерации магнитной фазы в океанических перидотитах имеет несколько пиков: около  $450$ ,  $320$  и  $200^\circ\text{C}$ . Это означает, что при остывании литосферы по мере удаления от САХ может возникнуть несколько эпизодов серпентинизации. Анализ АМП и намагниченности на рис. 4 показывает именно такое волнообразное распределение максимумов поля, совпадающих в целом с зонами деформаций. Возможно именно это является механизмом возникновения так называемой зоны абиссальных холмов [28], расположенных субпараллельно САХ. При составлении морфологического районирования Атлантики многими исследователями выделяется также так называемая зона краевых дислокаций [15], которая охватывает фланги хребта до удалений  $300$ – $350$  км от оси САХ. Эта зона при анализе потенциальных полей совпадает с интервалом, на котором наблюдается расхождение аномалий Буге и изостазии. По всей видимости, идет описание одной и той же сущности, которая при наличии осадочного чехла будет сопровождаться его деформациями в виде сбросовых нарушений и наклонов рефлек-

торов в небольших осадочных карманах. Как правило на этих интервалах осадочный чехол, превышающий разрешение НСП, накапливается крайне редко. Таким образом, наличие зоны краевых дислокаций обусловлено остыванием литосферы и изостатической компенсацией возмущения, сформированного в рифтовой зоне.

При сопоставлении положения деформаций с “холодными” блоками на срезе  $Vp/Vs$  на глубине 470 км (см. рис. 3) было установлено, что они проявлены над последними, причем граница деформаций с удивительной точностью совпадает с нулевой изолинией атрибута  $Vp/Vs$ . Делать существенные выводы из этого совпадения всего лишь по двум пересечениям нецелесообразно, но отметить его необходимо, потому что это позволяет сделать фокусировку на дальнейшем поиске корреляции деформаций с другими геофизическими параметрами. По данным [26] макротрещиноватость максимально проявлена над “холодными” блоками и именно в этих зонах и на их периферии следует ожидать деформаций осадочного чехла. Возможны два варианта объяснения наблюдаемой зависимости значений параметров и проявлений деформаций от геодинамического состояния мантии на указанной глубине:

1. В движение плит кроме собственно литосферы вовлечен поверхностный слой мощностью до 400 км, подошвой которого в некоторых районах являются “холодные” мантийные блоки. Разница в трении движущегося слоя об субстрат с разной вязкостью создает дифференциацию параметров на поверхности и над холодными блоками формируются зоны деформаций.

2. “Холодные” блоки в верхней мантии являются фоновым явлением, а области над “горячими” блоками являются нарушениями фона, возникающими в местах ответвлений плюмовых аномалий. В этом случае общая вовлеченность слоя до 400 км в горизонтальное движение может отсутствовать. Вместо этого мы наблюдаем интенсивную динамику только в “горячих” блоках и на их периферии, что и определяет взаимодействие и деформации в зонах с “холодными” блоками.

В настоящее время однозначно определить, какой именно механизм имеет место, достаточно сложно. В пользу первого решения говорит тот факт, что деформации являются явлением активного воздействия на среду, дифференцированно как по вертикали, так и по горизонтали, поэтому движение слоя с повышенным трением его подошвы в местах “холодных” блоков выглядит обоснованным. Однако, ответвления плюмов являются нарушением того состояния мантии, в котором они оказываются. Не исключено, что в природе реализованы оба решения, конкурирующие друг с другом.

## ВЫВОДЫ

1. Сформулированы отличия и признаки деформаций осадочного чехла абиссальных котловин, необходимые для их картирования. Такими признаками являются рефлекторы в осадочной толще с углами наклона  $>1^\circ$ ; постоянная мощность между рефлекторами, отклоненными от горизонтального залегания более  $1^\circ$ ; дизъюнктивные нарушения, структуры протыкания, наличие структурных несогласий, ассоциация структур с акустическим осветлением осадочной толщи в виде линз и газовых труб.

2. Имеет место цепочка явлений с общим пространственным проявлением неоднородных горизонтальных движений, формирующих повышенную макротрещиноватость над “холодными” мантийными блоками на глубинах около 500 км, которая деформирует кору и осадочный чехол, создает условия для инфильтрации воды и серпентинизации пород верхней мантии. При этом возникают наложенные аномалии АМП и намагниченности и выделяются флюиды, приводящие к акустическому осветлению осадочной толщи. Разуплотнение пород приводит к вертикальным движениям и складчатости штампового типа, разрывающей осадки, создающей наклонные рефлекторы и поднимающей деформированные блоки над общим уровнем дна, выровненного осадконакоплением.

3. Остывание литосферы по мере удаления от САХ может образовать несколько эпизодов серпентинизации и деформаций, что возможно приводит к обособлению зоны абиссальных холмов и зоны краевых дислокаций, которая охватывает фланги хребта до удалений 300–350 км от оси САХ. Эта зона совпадает с интервалом, на котором наблюдается расхождение аномалий Буге и изостазии. Наличие зоны краевых дислокаций обусловлено остыванием литосферы и изостатической компенсацией возмущения, сформированного в рифтовой зоне.

4. Сопоставление положения деформаций с “холодными” блоками на срезе  $Vp/Vs$  на глубине 470 км показывает, что граница деформаций с абсолютной точностью совпадает с нулевой изолинией атрибута  $Vp/Vs$ .

**Благодарности.** Автор благодарен экипажам НИС “Академик Николай Страхов” и “Академик Борис Петров” за работу в сложных условиях, в которых был получен использованный в статье материал. Автор признателен А.О. Мазаровичу и Н.П. Чамову за ценные замечания и консультации при написании статьи.

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 ко-

ры и верхней мантии” (государственная регистрация № 01201459183), а также при поддержке грантов РФФИ 15-05-05888, 14-05-00122 и Программы № 3 Президиума РАН “Мировой океан – многомасштабность, многофазность, многопараметричность”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипов М.П., Еремеев В.В., Жарков С.М.* Строе-ние осадочного чехла Центрального сектора Атлантики в районе разлома зеленого Мыса // Строе-ние осадочного чехла Центральной Атлантики. М.: Наука, 1990. С. 95–110. (Труды ГИН РАН; Вып. 449.)
2. *Артемов М.Е., Бабаева Т.М., Войдецкий И.Е., Гор-дин В.М., Михайлов В.О.* Изостазия и гравитацион-ное поле северной Атлантики. М.: МГК, 1987. 156 с.
3. *Астафурова Е.Г., Городницкий А.М., Лукьянов С.В., Мащенко С.П.* Природа магнитных аномалий и строе-ние океанической коры Срединно-Атлантиче-ского хребта и прилегающих котловин в преде-лах Канаро-Багмаского геотраверса / Ред. Гор-одницкий А.М. Природа магнитных аномалий и строе-ние океанической коры М.: Изд. ВНИИРО, 1996. С. 171–202.
4. *Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Силантьев С.А., Бори-сов М.В., Соколов С.Ю., Буго А.* Образование водо-рода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 511–519.
5. *Верхбицкий В.Е.* Особенности структуры и гене-зис индоокеанской зоны внутриплитных дефор-маций. Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М.: ИО РАН, 2000. 24 с.
6. *Воскресенский Ю.Н.* Изучение изменений ампли-туд сейсмических отражений для поисков и раз-ведки залежей углеводородов. М.: РГУ нефти и га-за, 2001. 68 с.
7. *Левченко О.В.* Сдвиговая природа внутриплитовых деформаций осадочной толщи на северо востоке Индийского океана // Геология океанов и морей. Ред. Лисицин А.П. М.: ИОАН СССР, 1984. Т. 2. С. 124–125.
8. *Левченко О.В., Мерклин Л.Р., Свиридов Н.Н.* Строе-ние осадочной толщи и рельеф фундамента глубо-ководных котловин Атлантического и Индийского океанов / Ред. Непрочнов Ю.П. Геофизические поля и строение дна океанских котловин // М.: Наука, 1990. С. 89–119.
9. *Левченко О.В.* Центральная котловина (геофизиче-ские поля, структура земной коры и внутриплитные деформации) / Ред. Чекунов А.В., Непрочнов Ю.П. Литосфера Индийского океана (по геофизическим данным) // Киев: Наукова Думка, 1990. С. 56–69.
10. *Мазарович А.О., Морозов Ю.И., Турко Н.Н.* Рельеф и строение осадочного чехла разломов Марафон и Меркурий (Центральная Атлантика) // ДАН. 1992. Т. 324. № 3. С. 643–647.
11. *Мазарович А.О.* Тектономагматические явления на флангах трансокеанских разломов Архангельско-го, Долдрамс, Вернадского // ДАН. 1993. Т. 332. № 1. С. 62–65.
12. *Мазарович А.О.* Тектоническая конвергенция трансформных разломов в Приэкваториальной Атлантике // ДАН. 1994. Т. 335. № 1. С. 70–73.
13. *Мазарович А.О.* Геологическое строение Централь-ной Атлантики: разломы, вулканические сооруже-ния и деформации океанского дна. М.: Научный Мир, 2000. 176 с.
14. *Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Разломные зоны се-веро-западного простирания Центральной Атлан-тики // Геотектоника. 2002. № 3. С. 87–94.
15. *Одинокое Ю.Ю., Удинцев Г.Б., Береснев А.Ф.* Осо-бенности морфологии зоны краевых дислокаций Срединно-Атлантического хребта // Геотектони-ка. 1990. № 1. С. 97–115.
16. *Панаев В.А., Митулов С.Н.* Сейсмостратиграфия осадочного чехла Атлантического океана. М.: Нед-ра, 1993. 247 с.
17. *Пилипенко А.И.* Тектонические деформации Бра-зильской котловины // ДАН. 1993. Т. 330. № 4. С. 484–487.
18. *Пилипенко А.И.* Тектоническая расслоенность оке-анической коры глубоководных котловин (по сей-смическим материалам) // Геотектоника. 1994. № 1. С. 49–61.
19. *Пилипенко А.И.* Структуры тектонического сжатия на западном фланге Срединно-Атлантического хребта (8°–12° ю.ш.) // ДАН. 1995. Т. 340. № 5. С. 664–666.
20. *Попов К.В., Базылев Б.А., Щербаков В.П.* Темпера-турный интервал возникновения намагниченно-сти океанических шпинелевых перидотитов // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 303–314.
21. *Пушаровский Ю.М.* Тектоника Атлантики с эле-ментами нелинейной геодинамики. М.: Наука, 1994. 84 с.
22. *Разницын Ю.Н., Пилипенко А.И.* Анголо-Бразиль-ский геотраверс: структура и деформации океани-ческой литосферы / Ред. Пушаровский Ю.М. Тек-тонические и геодинамические феномены // М.: Наука, 1997. С. 104–128. (Тр. ГИН РАН; Вып. 505.)
23. *Разницын Ю.Н.* Тектоническая расслоенность ли-тосферы молодых океанов и палеобассейнов. М.: Наука, 2004. 270 с. (Тр. ГИН РАН, Вып. 560.)
24. *Рединг Х.* Обстановки осадконакопления. М.: Мир, 1990. Т. 1. 352 с.
25. *Соколов С.Ю.* Деформации осадочного чехла эква-ториальной Атлантики и их сопоставление с по-тенциальными полями // Тектоника и геодинами-ка континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты. Материалы XLVII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2015. Т. 2. С. 172–175.
26. *Соколов С.Ю.* Сдвиговый фактор тектогенеза в Ат-лантическом океане и его связь с геодинамиче-ским состоянием верхней мантии и внутриплит-ными деформациями // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых областей и платформ. Мате-риалы XLVIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2016. Т. 2. С. 178–184.
27. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Под ред. Дортман Н.Б.* М.: Недра, 1984. 455 с.
28. *Хейзен Б., Тарп М., Юинг М.* Дно Атлантического океана. М.: Изд. ин. лит., 1962. 148 с.

29. *Becker T.W., Boschi L.* A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // *Geochemistry Geophysics Geosystems G<sup>3</sup>*. 2002. Vol. 3. P. 1–48. doi 10.1029/2001GC000168
30. *Charlou J.L., Fouquet Y., Bougault H., Donval J.P., Etoubleau J., Jean-Baptiste P., Dapoigny A., Appriou P., Rona P.* Intense CH<sub>4</sub> plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15°20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1998. Vol. 62. № 13. P. 2323–2333.
31. *Efimov V.N., Koltsova A.V., Beresnev A.F., Golod V.M., Sokolov S.Yu., Zakharov M.V.* 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.
32. *Emery K.O., Uchupi E.* The Geology of the Atlantic Ocean. NY.: Springer-Verlag, 1984. 1050 p.
33. 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.
34. *Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiantoro S.* Global seismic Tomography: A snapshot of convection in the Earth // *GSA Today*. 1997. Vol. 7. № 4. P. 1–7
35. *Hayes D.E., Pimm A.C., Beckmann J.P., Benson W.E., Berger W.H., Roth P.H., Supko P.R., Von Rad U.* Site 138 // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. 1970. Vol. XIV. P. 135–155
36. *Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bourmas N., Brozina J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Luhr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebault E., Tontini F.C.* EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // *Geochemistry Geophysics Geosystems G<sup>3</sup>*. Vol. 10. № 8. P. 1–12. doi 10.1029/2009GC002471
37. *Muller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R.* Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems G<sup>3</sup>*. 2008. Vol. 9. № 4. P. 1–19. doi 10.1029/2007GC001743
38. *Peter G., Westbrook G.K.* Tectonics of southwestern north Atlantic and Barbados ridge complex // *AAPG Bulletin*. 1976. Vol. 60. № 7. P. 1078–1106.
39. *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*. 2009. Vol. 114. № B1. P. 1–18. doi 10.1029/2008JB006008
40. *Searle R.C.* GLORIA investigations of oceanic fracture zones: comparative study of the transform fault zone // *J. Geol. Soc.* 1986. Vol. 143. № 5. P. 743–756.
41. *Van Andel T.H., Von Herzen R.P., Phillips J.D.* The Vema fracture zone and the tectonics of transverse shear zones in oceanic crustal plates // *Marine Geophysical Researches*. 1971. Vol. 1. № 3. P. 261–283.
42. *Van der Hilst R.D., Widiantoro S., Engdahl E.R.* Evidence of deep mantle circulation from global tomography // *Nature*. 1997. Vol. 386. № 6625. P. 578–584.
43. <http://www.gebco.net>. GEBCO 30" Bathymetry Grid. Version 20141103. 2014.
44. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/trackline.html>. GEODAS. Marine Trackline Geophysical Data. 2010.

Рецензент: Ю.А. Волож

## Sedimentary Cover Deformations in the Equatorial Atlantic and their Comparison with Geophysical Fields

S. Yu. Sokolov\*

*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 7, Moscow, 119017 Russia*

\*e-mail: [syokolov@yandex.ru](mailto:syokolov@yandex.ru)

Received June 6, 2016

**Abstract**—The deformations of the sedimentary cover at near-latitudinal geotraverses west and east of the Mid-Atlantic Ridge in the equatorial part of ocean are compared with potential fields and variations of the  $V_p/V_s$  attribute at a depth of ~470 km. The features of sedimentary cover deformations in abyssal basins are formulated, as well as their differences from the undisturbed bedding of sediments. The elements of chain of phenomena with common spatial manifestations and cause-and-effect relationships have been established, including heterogeneous horizontal movements, which make up macrojointing above “cold” mantle blocks at a depth of ~470 km; serpentinization of upper-mantle rocks; the formation of superposed magnetic anomalies; the release of the fluids, which acoustically bleach out the sedimentary sequence in seismic imaging; and decompaction of rocks leading to vertical motions and forced folding. The origin of the Atlantic marginal dislocation zone is explained. The coincidence of the deformation boundary in the equatorial Atlantic with the zero contour line of the  $V_p/V_s$  attribute is revealed. This coincidence is an indicator of the rheological state of the upper mantle.

**Keywords:** equatorial Atlantic, cold mantle block, potential field, sedimentary cover deformation, seismic section, acoustic bleaching.