

СВЯЗЬ ДЕФОРМАЦИЙ И ПРОЯВЛЕНИЙ ДЕГАЗАЦИИ В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО СЕГМЕНТА ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКИ С ГЕОДИНАМИКОЙ ЛИТОСФЕРЫ

© 2018 г. С. Ю. Соколов¹ *, А. О. Мазарович¹, Н. Н. Турко¹,
К. О. Добролюбова¹, А. С. Абрамова¹, Ю. А. Зарайская¹, Е. А. Мороз¹

¹Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 7

*e-mail: sysokolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.11.2017 г.

Проявления деформаций осадочного чехла и флюидов, осветляющих сейсмическую запись, в экваториальном сегменте Атлантики приурочены к субширотным зонам активизации движений вдоль пассивных частей трансформных разломов, к зонам пониженных гравитационных аномалий и повышенных значений остаточной намагниченности, возникающих при серпентинизации. Причинно-следственная цепочка внутриплитных явлений состоит из: контрастное геодинамическое состояние → горизонтальные движения, формирующие макротрещиноватость → доступ воды в верхнюю мантию → серпентинизация пород верхней мантии → образование деформаций вертикального подъема блоков фундамента и осадочного чехла и генерация флюидов → аккумуляция флюидов в осадочном чехле, формирование аномалий сейсмоакустической записи. По сейсмическим данным были выделены чешуйчато-надвиговые деформации, структуры протыкания, штамповые складки, положительные и отрицательные “цветочные структуры”, указывающие на существование сдвиговых нарушений в пассивных частях трансформных разломов. Общее пространственное распределение деформационных структур показывает их концентрацию в зонах с холодной мантией. Корреляционное сопоставление структурных характеристик деформаций указывает на прямую связь высот структур с развитием процессов серпентинизации. По возрасту фундамента деформации распределены в интервалах 27–38 и 43–53 млн лет, в которых имеется достаточно мощный осадочный чехол для их выявления по характерным видам сейсмической записи. Заложение Антильской дуги ~10 млн лет назад оказало воздействие на экваториальный сегмент Атлантики, сформировало кинк-банд зоны, в которых возникают смещения блоков литосферы с элементами поворота против часовой стрелки, и деформации, связанные со сжатием и вертикальным подъемом фрагментов коры, а также локальные растяжения, облегчающие дегазацию эндогенного флюида. Субширотно ориентированные чешуйчато-надвиговые формы с различной вергентностью указывают на неравномерность и переменное направление сдвиговых смещений при латеральном воздействии на межразломные блоки.

Ключевые слова: экваториальная Атлантика, холодные мантийные блоки, геодинамика, серпентинизация, деформации осадочного чехла, дегазация, пассивные части трансформных разломов

DOI: 10.1134/S0016853X18040070

ВВЕДЕНИЕ

Деформации осадочного чехла в глубоководной части Атлантического океана неоднократно были описаны в литературе [1, 3, 5, 7, 9, 11–13, 17] и в других источниках. Эти работы базируются на данных экспедиций, проведенных в период с 1984 г. по 2006 г. Они состоят из двух крупных блоков: Анголо-Бразильского геотраверса, проведенного в период с 1984 по 1986 год под эгидой Мингео СССР и Академии наук СССР, Институтом океанологии АН СССР, и работ Геологического института РАН на НИС “Академик Николай Страхов” в экваториальном сегменте Атлантики (ЭСА). В зарубежной литературе существует

обобщение многочисленных данных по континентальным окраинам и глубоководной части Атлантики [21]. В этой работе определено, что пострифтовый осадочный суперкомплекс, залегающий на рифтовом суперкомплексе окраин и магматическом фундаменте океана, представляет собой в основном ненарушенное другими тектоническими деформациями осадочное образование с пологим наклоном слоев в сторону центра спрединга и выклиниванием на акустическом фундаменте. Исключение, по мнению авторов [21], составляют активные конседиментационные сбросы, пластичные соляные потоки, разломы, вызванные перемещением соли и проседанием перекрываю-

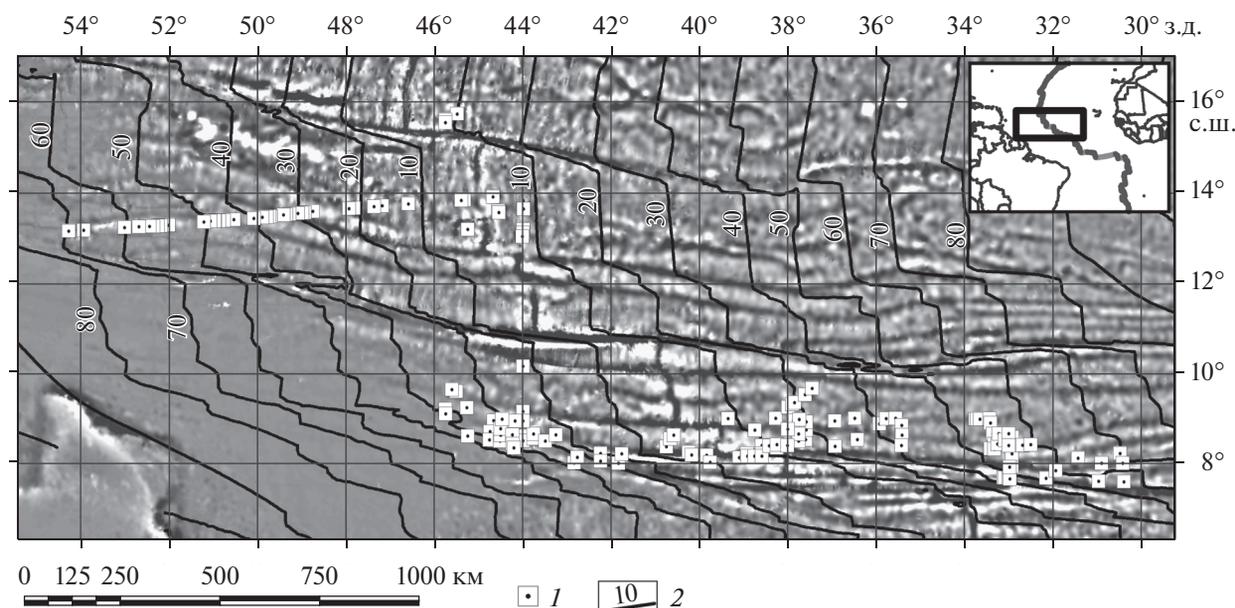


Рис. 1. Распределение структур с вертикальным подъемом фундамента и осадочного чехла без дифференциации на тип деформации по данным 6-го и 9-го рейсов НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1987, 1990) и их сопоставление с возрастом фундамента и остаточным рельефом в качестве топонсов.

На врезке: положение основного планшета в Атлантике относительно САХ.

1 – структуры с вертикальным подъемом; 2 – изолинии возраста и их значение, млн лет

шей толщи, разломы рифтового суперкомплекса периокеанической зоны с нарушенным изостатическим равновесием, а также грязевой вулканизм и вулканические интрузивные тела. Этот вывод сформировал соответствующий подход к исследованиям деформаций в Атлантике. Но дальнейшее изучение осадочного чехла котловин показало наличие факторов тектогенеза, формирующих внутриплитные деформации в глубоководной части акватории.

Данная работа базируется на результатах Геологического института РАН, полученных в ЭСА. Среди деформационных структур абиссальных частей ЭСА подавляющую часть составляют образования, связанные с вертикальным подъемом осадочного чехла узкими блоками фундамента (структуры протыкания) как новейшего, так и современного возраста (по охвату разреза деформацией), широкими блоками фундамента (штамповые складки), дегазационным подъемом и транспрессионным выжиманием. В работе [7] по данным непрерывного сейсмического профилирования (НСП) 6-го и 9-го рейсов НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1987, 1990; начальник рейсов – Ю.Н. Разницын, начальник отряда НСП – В.М. Побержин) в районе трансформных разломов Марафон, Меркурий, Архангельского, Долдрамс и Вернадского было проведено первичное исследование распределения этих структур в пространстве и их статистических характеристик без дифференциации на тип де-

формации. Исследовались общие статистические характеристики структур с вертикальным подъемом. Было установлено, что основное пространственное проявление деформаций связано с кинк-банд структурами северо-западной ориентации, изгибающимися ответвления трансформных разломов в северном сегменте ЭСА (рис. 1) между 7° и 15° с.ш. с обоих флангов Срединно-Атлантического хребта (САХ). Тем не менее, предварительный анализ разных типов деформаций показал, что они имеют отличия в пространственном расположении относительно тектонических элементов дна, что нуждается в дальнейшем изучении и интерпретации их генезиса. Задача данной работы состоит в определении структурной привязки деформации различного типа и зон дегазации в осадочном чехле, их сопоставление с макротрещиноватостью, с гравитационным и магнитным полями, их трансформантами, а также с данными сейсмотомографии, определяющими геодинамическое состояние мантии. Целью сопоставления является определение совместности происхождения деформационных структур по детальным данным НСП с причинно-следственной цепочкой внутриплитных явлений, состоящей по данным [17, с дополнениями] из следующих звеньев:

- контрастное по горизонтали геодинамическое состояние мантии;
- неоднородные горизонтальные движения, формирующие на фоне остывания литосферы с

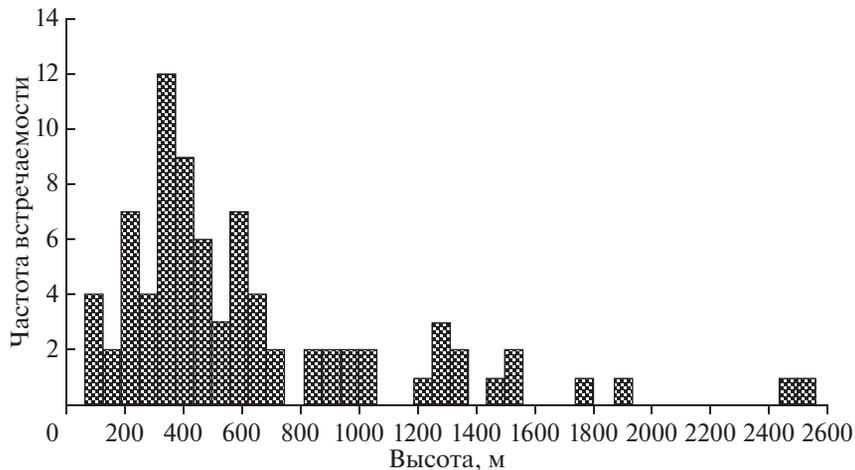


Рис. 2. Частота встречаемости высот структур с вертикальным подъемом, измеренных по фундаменту

возрастом повышенную макротрещиноватость, включающую сдвиговые тектонические деформации;

- доступ воды в верхнюю мантию по образованной макротрещиноватости;
- формирование условий для серпентинизации пород верхней мантии с образованием зон разуплотнения, локальных отрицательных гравитационных аномалий и повышенной намагниченности;
- образование деформаций вертикального подъема блоков фундамента и осадочного чехла и генерация флюидов (в основном метан);
- аккумуляция флюидов в осадочном чехле, формирование аномалий сейсмоакустической записи и прорывы в водную толщу.

ПЕРВИЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ БЕЗ РАЗДЕЛЕНИЯ ТИПОВ СТРУКТУР

Результаты, полученные при общем анализе статистических характеристик деформационных структур, состоят в следующем. Гистограмма высот структур, недифференцированных по типу (рис. 2), показывает, что наиболее часто встречаемые высоты имеют значения около 400 м. Возникновение вертикальных движений, связанное с серпентинизацией пород верхней мантии и увеличением их объема на 20%, позволяет заключить, что мощность слоя, охваченная этим процессом, достигает 2 км. Учитывая, что процесс может проходить не во всей породе, а только вдоль трещин, реальная глубина преобразования пород может быть больше. Распределение имеет слабые признаки полимодальности, в частности на значении 1300 м (см. рис. 2). Это может указывать, как на отдельные крупные диапиры, так и на активизацию процессов около этих структур, для

распознавания которой для каждой структуры необходимо проводить отдельный анализ сейсмического волнового поля.

Анализ свойств деформационных объектов целесообразно проводить в зависимости от возраста субстрата, на котором они сформированы (рис. 3). Этот подход в определенной степени заменяет оценку в зависимости от расстояния от САХ. Значения возрастов были взяты по данным [25]. Уверенно фиксируется нисходящая зависимость глубины дна около структур, имеющая псевдолинейный вид. Подобный тренд не вполне предсказуем, поскольку в соответствии с модельным представлением [18] вид тренда должен быть убывающим как корень квадратный из возраста. Фактический тренд имеет подобие ступени около 20 млн лет и после нее более пологий вид до 60 млн лет. Основное облако высот структур имеет вид, плавно восходящий от 400 до 600 м вплоть до 20 млн лет и далее пологий рост до ~700 м. На него наложены три зоны повышенных значений этого параметра: 6–16, 27–38 и 43–53 млн лет (средне-поздне-миоценовая, олигоценная, ранне-средне-эоценовая) (см. рис. 3). Эти интервалы сходны с интервалами проявлений деформаций вдоль геотраверса западного фланга САХ [17], но со смещением на 7–8 млн лет в сторону омоложения относительно последнего. Перекрытие интервалов сохраняется. Это распределение с учетом псевдопериодической эволюции магнитных свойств серпентинитов в зависимости от температуры верхней мантии [14] может быть интерпретировано, как локальная активизация и продолжение диапировых процессов при достижении определенного температурного значения. При этом область, подвергнутая деформациям, может испытывать повторную активизацию при вхождении среды в следующий температурный интервал процессов серпентинизации. Возраст

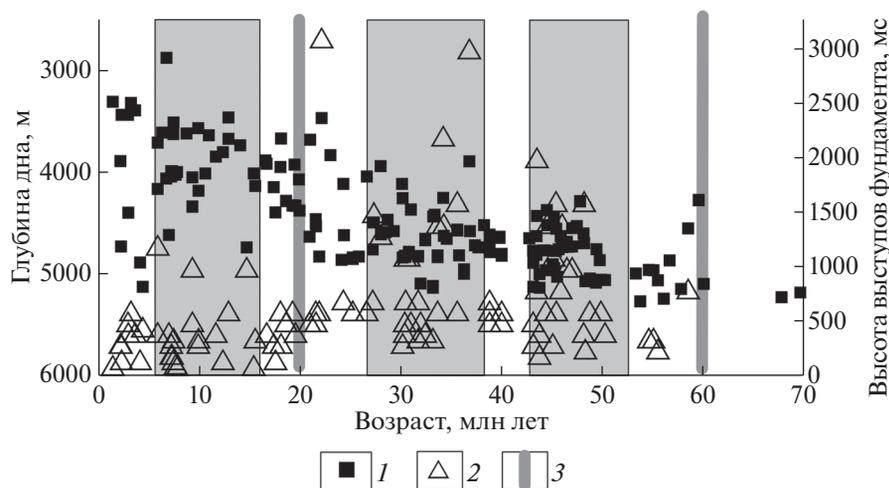


Рис. 3. Зависимость распределения высот диапировых структур и глубин дна над ними от возраста магматического субстрата.

Показаны (серый фон) возрастные интервалы с повышенными значениями высот выступов фундамента. 1 – глубины дна; 2 – высоты структур; 3 – возрасты перегибов рельефа дна

субстрата не соответствует возрасту структур, но может иллюстрировать эволюцию температурно-состояния во времени. Обозначены, выявленные в [15] возраста излома градиента рельефа дна – 20 и 60 млн лет (см. рис. 3). Они попадают на промежутки между возрастными зонами с аномальными выступами фундамента. В работе [15] эти изломы объясняются изменением плотности верхней мантии, вызванным фазовыми переходами при кристаллизации на подошве литосферы, которые приводят к не совсем плавному изменению осредненного рельефа согласно закону корня из возраста. Такое сочетание указывает на определенную последовательность изменений структуры литосферы при остывании.

ТИПЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Существуют различные подходы к систематизации типов деформаций. В работе [6] приведен обзор деформационных структур северо-западной части Тихого океана, полученных по данным непрерывного сейсмического профилирования (НСП). Набор типов по данным [6] состоит из структур, называемых инъективными и тектоническими холмами. Если сопоставить эти типы со структурами в традиционной терминологии, то асимметричные тектонические холмы, ограниченные с одной стороны взбросовым смещением, являются проявлением чешуйчато-надвиговых деформаций. Инъективные холмы являются диапировыми структурами или структурами протыкания, а при большой ширине блока фундамента – штамповыми складками. Кроме этого, в [6] автор выделяет комплекс деформаций, связанных с подъемом флюидов и аномалии напластования

осадочного материала, связанные с контурными течениями и турбидитными потоками. Отложения потоков широко распространены на абиссали, но не имеют тектонического происхождения. Таковы самые общие группы в систематике типов структурных аномалий осадочного чехла абиссали, отличающихся от простейшей сейсмифации заполнения, которая теоретически является основной для котловин. На практике в изученной в [6] котловине Тихого океана есть области, где последняя практически не наблюдается. В работе [17] приведена сводка типов деформаций, исследованных в ЭСА вдоль западных пассивных частей разломов Марафон и Меркурий, которые также как и в Тихом океане, представлены преимущественно структурами с вертикальным подъемом или протыканием осадочного вещества блоками фундамента различной ширины, а также структурами и формами сейсмической записи, обусловленными флюидным фактором. Структуры с вертикальным смещением рефлекторов отрицательного знака встречаются редко.

Областью с наиболее интенсивным развитием деформационных структур в ЭСА является район работ 9-го рейса НИС “Академик Николай Страх”. Данные НСП обрабатывались нами по следующей методике. Поскольку межгалсовое расстояние при этой съемке составляло от 5 миль на небольших полигонах до 30 миль при рекогносцировочных галсах на территории с размерами $\sim 1000 \times 500$ км, корреляция отражающих горизонтов при мощностях не более 1000 м, залегающих на раздробленном магматическом фундаменте, с целью построения непрерывной поверхности рефлекторов проблематична. Эти данные позволяют в режиме пикировки точечных особен-

ностей волнового поля в ориентированных на данную задачу программных средах (RadExPro, Россия) выявить и оцифровать пространственное положение и количественные характеристики для многочисленных дизъюнктивных нарушений сбросового и взбросового типов, штамповых складок, структур протыкания, областей акустического осветления записи, поднятий фундамента с плоскими вершинами, дрефтов и т.д. Эти особенности волнового поля вместе с вектором таких параметров, как ширина, высота, мощность осадков над выступом фундамента, образуют базу данных, которая воспроизводится вместе с имеющимися пространственными покрытиями и дополняется значениями геофизических полей, интерпретация которых имеет геодинамический смысл. Наиболее распространенными по частоте встречаемости в пределах района проведенных работ формами деформаций осадочного чехла являются:

- вертикальные акустические осветления или газовые трубы (рис. 4, разрезы 1, 2),
- штамповые складки (см. рис. 4, разрезы 9, 10),
- структуры протыкания (см. рис. 4, разрезы 8, 9),
- отдельные взбросовые нарушения (см. рис. 4, разрез 7),
- чешуйчато-надвиговые системы взбросов (см. рис. 4, разрез 3),
- горизонтальные акустические осветления сейсмической записи (см. рис. 4, разрезы 2, 7),
- сбросовые нарушения (см. рис. 4, разрез 4).

Перечисленные типы, за исключением сбросов, могут быть объединены в группы по тому же принципу, по которому это сделано в работе [6]. Эрозионно-аккумулятивные формы, образованные течениями, содержат:

- врезы и дрефты (см. рис. 4, разрез 2),
- прирусловые валы (см. рис. 4, разрез 5),
- оползни (см. рис. 4, разрез 11).

Необходимо отдельно выделить типы деформаций, не отмечавшиеся ранее для котловин: положительные и отрицательные цветочные структуры (см. рис. 4, разрезы 5, 6). Последние возникают при сдвиговых смещениях блоков литосферы с элементами сжатия или растяжения. Примечательно, что эти формы были обнаружены в пассивных частях трансформных разломов – объектов, для которых теоретически смещения отсутствуют. Тем не менее, опираясь на данные о разнице скоростей спрединга соседних блоков океанической коры, достигающей 2–3 раз [10], и предположения о геодинамических последствиях этого факта [16], можно заключить, что теоретически сдвиги в пассивных частях трансформных разломов возможны. Обнаружение присдвиговых цветочных структур на записях НСП в заполненных осадками пассивных частях разломных тро-

гов указывает на реальность этого процесса и его подтвержденность фактическими данными.

ОБЩЕЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ

Общее пространственное распределение деформационных и других аномальных видов сейсмической записи (рис. 5), привязано к маршруту съемки и полученное облако точек не означает отсутствия тех или иных форм в промежутках между галсами. Морфологическая интерполяция межгалсового пространства осуществляется по топоснове, в качестве которой использована спутниковая альтиметрия [26], отображающая также структуру акустического фундамента под осадочным чехлом. Показаны значения атрибута подвижности по [17], отрицательные значения которого указывают на “холодные” линзы в верхней мантии на глубине около 470 км (см. рис. 5, изолинии). Минимумы атрибута, отражающего значения коэффициента Пуассона и показывающего геодинамическое состояние, коррелируются с макротрещиноватостью на поверхности [16] и определяют распределение поверхностных геофизических характеристик. Разница реологических свойств на указанной глубине обеспечивает более подвижную динамику в “горячих” зонах пониженной вязкости мантии и наличие повышенной макротрещиноватости над “холодными” блоками. Взаимодействие между ними создает условия для дополнительного разломообразования в холодных блоках, особенно при неоднородных значениях скоростей спрединга вдоль разновозрастных зон фундамента [25]. Таким образом, в “холодной” зоне преобладают первые два элемента цепочки внутриплитных явлений – контрастное геодинамическое состояние мантии и макротрещиноватость (см. рис. 5).

В исследованном сегменте Атлантики (см. рис. 5) встречаются следующие виды деформаций:

- 76 структур протыкания,
- 65 штамповых складок,
- 40 чешуйчато-надвиговых форм,
- 72 взброса,
- 68 вертикальных осветлений разреза,
- 22 горизонтальных осветлений разреза.

Подавляющая часть деформаций [17], выявленных по строению осадочного чехла, сконцентрирована над “холодной” областью мантии к востоку от нулевой изолинии атрибута $\delta(V_p/V_s)$. Кроме того, по этой изолинии также проходит западная граница структур типа кинк-банд (см. рис. 5), проявленных в конфигурации акустического фундамента. Деформационные структуры, выявленные по детальным данным НСП вдоль галсов съемки, предельно плотно проявлены в

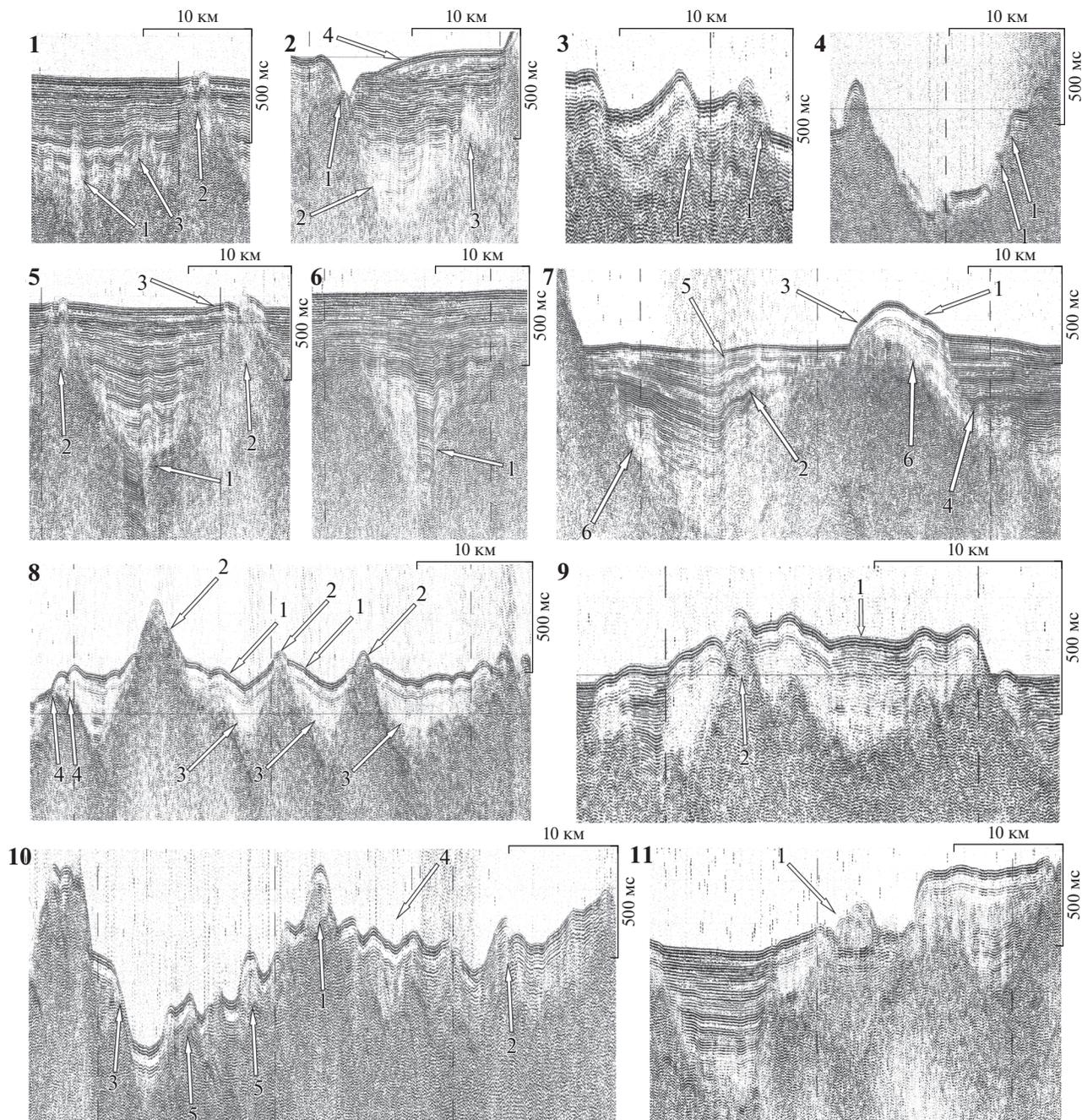


Рис. 4. Основные типы деформационных структур по данным НСП 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990).

Показаны (стрелки с номерами) структурные особенности сейсмических разрезов. Сейсмические разрезы: **1:** 1 – вертикальное акустическое осветление осадочной толщи, 2 – структуры протыкания, 3 – складки пликативного типа; **2:** 1 – врез, 2 – горизонтальное акустическое осветление осадочной толщи, 3 – вертикальное акустическое осветление осадочной толщи, 4 – дрифт; **3:** 1 – взбросо-надвиговые нарушения; **4:** 1 – сбросовые нарушения; **5:** 1 – положительная цветочная структура, 2 – структуры протыкания, 3 – прирусловой вал; **6:** 1 – отрицательная цветочная структура; **7:** 1 – наклонные рефлекторы с углами $>1^\circ$ в осадочной толще, 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; **8:** 1 – наклонные рефлекторы с углами $>1^\circ$ в осадочной толще, 2 – структуры протыкания, 3 – акустическое осветление осадочной толщи в виде линз и газовых труб, 4 – дизъюнктивные нарушения; **9:** 1 – широкая штамповая складка, 2 – структура протыкания; **10:** 1 – структура протыкания, 2 – взбросо-надвиговые нарушения, 3 – сбросовые нарушения, 4 – складки пликативного типа, 5 – узкая штамповая складка; **11:** 1 – оползневое тело

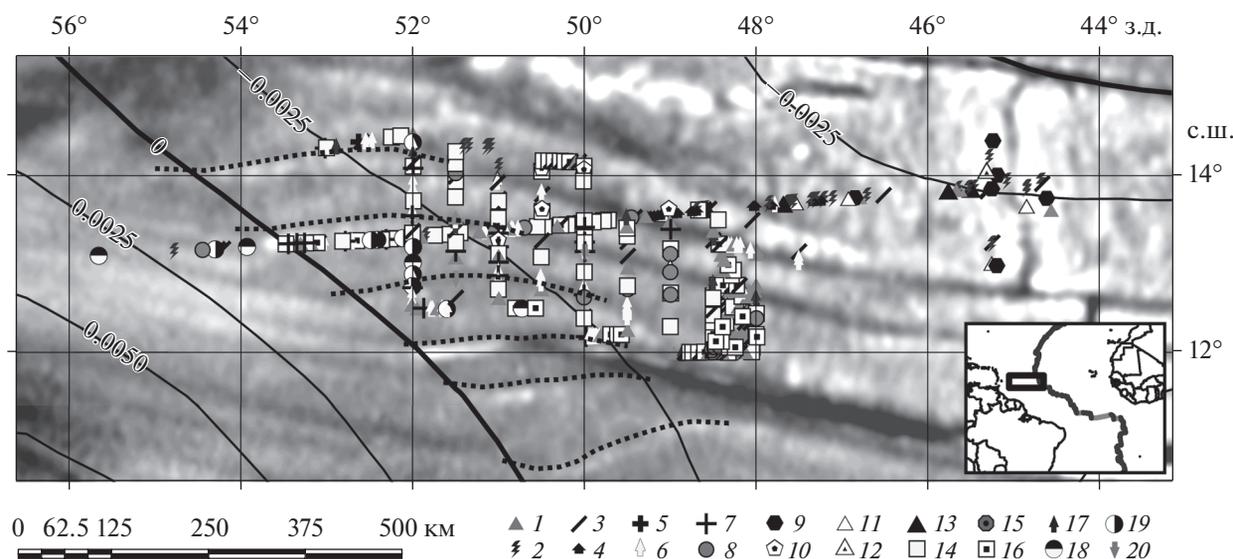


Рис. 5. Общее пространственное распределение деформационных структур и других аномальных видов сейсмической записи, полученных при интерпретации точечных особенностей волнового поля по данным 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990).

На врезке: положение основного планшета.

Для топосновы использована спутниковая альтиметрия (с использованием данных [26]). Показаны (изолинии) значения атрибута подвижности $\delta(V_p/V_s)$ по [17].

Показаны (пунктир) изгибы структур типа кинк-банд.

Типы деформационных структур и аномалий записи: 1 – протыкание; 2 – сброс; 3 – взброс; 4 – замок складки; 5 – палеорусло; 6 – вертикальное осветление; 7 – горизонтальное осветление; 8 – яркое пятно; 9 – плоская вершина; 10 – оползень; 11 – разгрузка осадков; 12 – вулканическая постройка; 13 – внедрение фундамента; 14 – штамповая складка; 15 – складка изгиба; 16 – чешуйчато-надвиговая складка; 17 – положительная цветочная структура; 18 – прирусловой вал; 19 – дрефт; 20 – отрицательная цветочная структура

границах “холодного” сегмента, выявленного в результате обработки мелкомасштабных данных сейсмотомографии и данных альтиметрии. Сходимость этих результатов также подтверждает взаимосвязь состояния мантии и распределения деформационных структур. Плотность деформационных структур, особенно складчатых форм, заметно спадает при приближении к САХ из-за небольшой мощности осадков, по структуре которых деформации были выявлены, и проявлений осадков в виде небольших изолированных карманов во впадинах акустического фундамента. В данном исследовании промежуточные элементы цепочки внутриплитных явлений, связанные с преобразованием вещества, не затрагиваются. Приведенные данные касаются следствий этих процессов, выраженных в деформациях и признаках поступления флюидов в осадочную толщу.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Сдвиговые деформации формируют парагенез, в который входят структуры выжимания вдоль разрыва. На сейсмических разрезах осадочного чехла, расположенных ортогонально плос-

кости сдвига, они приобретают специфическую форму цветочной структуры. Приведен пример такой структуры (см. рис. 4, разрез 5). По указателю 1 в средней части разломного трога наблюдается антиформа с затухающей к верхам разреза амплитудой смещения рефлекторов вверх по разрезу, не имеющая в основании выступа фундамента, и с контрастными отражениями от бортов трога по разные стороны от разрыва. Данное волновое поле формируется в условиях транспрессии в виде положительной цветочной структуры. При транстенсии образуются отрицательные цветочные структуры (см. рис. 4, разрез 6) с опусканием рефлекторов. Наличие таких структур в осадочном чехле пассивных частей трансформных разломов указывает на существование сдвиговых смещений между сегментами океанической литосферы после их перемещения за пределы активных частей разломов в результате спрединга. Георетическое обоснование возможности этого явления [16] состоит в разнице скоростей спрединга между сегментами вдоль САХ, достигающей 2.5 раз. Поскольку эта разница приводит к дополнительному смещению за пределами активных частей, накопленный в пассивных частях осадочный чехол может быть деформирован в сдвиговых

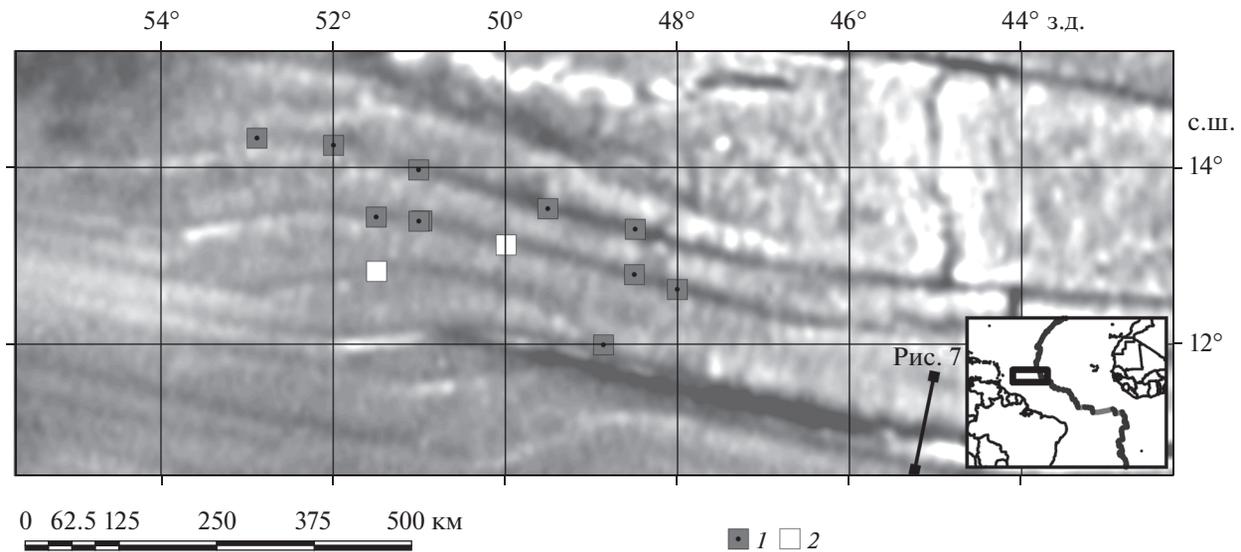


Рис. 6. Пространственное распределение сдвиговых деформаций цветочного типа в осадочном чехле разломных трогов по данным 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990).
 На врезке: положение основного планшета.
 Для топосновы использована спутниковая альтиметрия (с использованием данных [26]).
 Показано (линия с номером) положение разреза.
 Типы цветочных структур: 1 – положительная; 2 – отрицательная

условиях. Кроме того, сформированная зона разрыва является слабым звеном и может содержать серпентиниты, которые создают благоприятные условия для смещений при реактивации разломных зон.

Показано пространственное распределение обнаруженных сдвиговых деформаций цветочного типа в осадочном чехле разломных трогов к западу от САХ (рис. 6). Положительные цветочные структуры в основном расположены на изгибе разломов Марафон и Меркурий, обрамляющих с севера структурную зону типа кинк-банд, что указывает на транспрессионный режим при формировании такого структурного рисунка разломных трогов. Внутри этого обрамления обнаружены более редкие проявления отрицательных цветочных структур, что указывает на компоненту растяжения. Пространственная частота этих проявлений определяется дискретной сеткой галсов маршрутных наблюдений. В реальности эти деформации могут быть представлены протяженными структурами. Таким образом, при возникновении этой зоны деформаций образовалось мозаичное распределение напряжений, во внутренней части которого сформировалось растяжение.

Исследованный сегмент с юга обрамляется западной пассивной частью разлома Вима, в которой в поле альтиметрии наблюдается медианный хребет, что указывает на существование сдвига со сжатием. В ходе экспедиционных работ эта структура была пересечена съемкой только вдоль $\sim 45^\circ$ з.д. (рис. 7), что на 300 км восточнее обнаруженных

цветочных структур. На приведенном разрезе наблюдается медианный хребет высотой 450 м над дном, полной высотой около 1350 м и шириной около 1200 м на дне, прорывающий осадки с формированием малоамплитудной пликативной складчатости по рефлектору на глубине около 200 мс (см. рис. 7). Таким образом, медианный хребет имеет переменную высоту и при продолжении на запад и приближается к северному борту трого разлома Вима (см. рис. 7), на котором наблюдаются деформации, связанные с вертикальными движениями широких, более 20 км, блоков фундамента. Условия транспрессии наблюдаются в большинстве пассивных частей разломов, обрамляющих зону кинк-банд структур, что достаточно надежно следует из распределения закартированных нами деформаций осадочного чехла. Сейсмическая запись к югу от медианного хребта (см. рис. 7), указывает на интенсивную деятельность донных течений, которые формируют эрозионно-аккумулятивные формы.

КОРРЕЛЯЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

Сопоставление деформаций, для которых были оцифрованы количественные характеристики такие, как ширина, высота, мощность осадков над выступом фундамента с геофизическими полями, имеющими структурную и геодинамическую интерпретацию, позволяет через корреляцию численных значений этих характеристик со

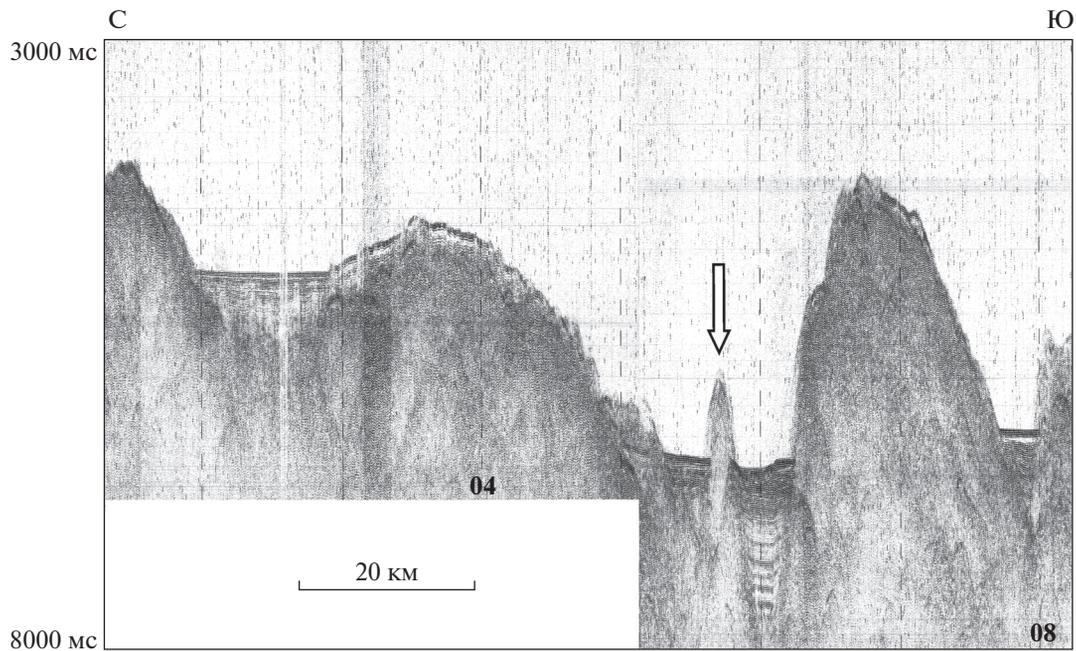


Рис. 7. Фрагмент разреза НСП S09-04 вкост западной пассивной части разлома Вима по данным 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990). Показан (стрелка) медианный хребет в разломном трого

значениями полей и возраста получить аппроксимационные модели их взаимной зависимости. Модели могут быть выражены достаточно четко в облаке точек или иметь размытый характер, едва отображая тренд. В корреляции используются аномалии Буге, рассчитанные по данным альтиметрии [26] и рельефа дна; намагниченность, рассчитанная по данным аномального магнитного поля (АМП) [24] и рельефа при мощности намагниченного слоя 500 м, собственно, рельефа дна [27] и возраста по данным линейных магнитных аномалий [25]. Аномалии Буге отражают, в основном, рельеф границы раздела кора—мантия, и чем меньше значение аномалии, тем глубже этот раздел залегает. Также эти аномалии отражают плотностные неоднородности коры и верхней мантии, которые особо контрастны в зоне САХ из-за термальных аномалий и неоднородной продуктивности магматизма. К плотностным неоднородностям относятся также зоны разуплотнения при серпентинизации. Намагниченность, в основном, представлена двумя компонентами: затухающей при удалении от САХ термоостаточной и маскирующей намагниченность химической остаточной компонентой, возникающей при серпентинизации. Таким образом, эти параметры отражают процессы развития трещиноватости и аккреции неоднородной структуры магматического спредингового фундамента. Рельеф является кровлей корового слоя и индикатором неоднородностей, которые связаны с деформациями

осадочного чехла. Возраст фундамента является главным параметром, формирующим эволюционную связь структур и косвенно отражает их термальную историю.

КОРРЕЛЯЦИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ДЕФОРМАЦИЙ

Структуры протыкания

Обзор структур протыкания (см. рис. 4, разрезы 1, 5, 7, 8) показывает, что они проявлены повсеместно вдоль маршрута съемки (рис. 8), но преимущественно — в межразломных блоках, а не в разломных трогох, как цветочные структуры. Большая плотность этих структур в интервале $48^{\circ}30' - 48^{\circ}00'$ з.д. связана с полигонным типом съемки. К западу от этого района межгалсовый интервал составляет 30 дуговых минут и в его пределах наблюдается область от $48^{\circ}30'$ до $50^{\circ}30'$ з.д., где плотность структур протыкания минимальна (см. рис. 8, А). В целом, эта область совпадает с областью локального растяжения, выявленного по отрицательным цветочным структурам (см. рис. 6), но точная обрисовка ее границ вряд ли возможна, т.к. она установлена по региональной сетке наблюдений. Совпадение областей с признаками локального растяжения и низкой плотности структур протыкания дополнительно указывает на то, что в условиях транспрессии формируется мозаичное чередование зон сжатия и растяжения при доминировании сжатия.

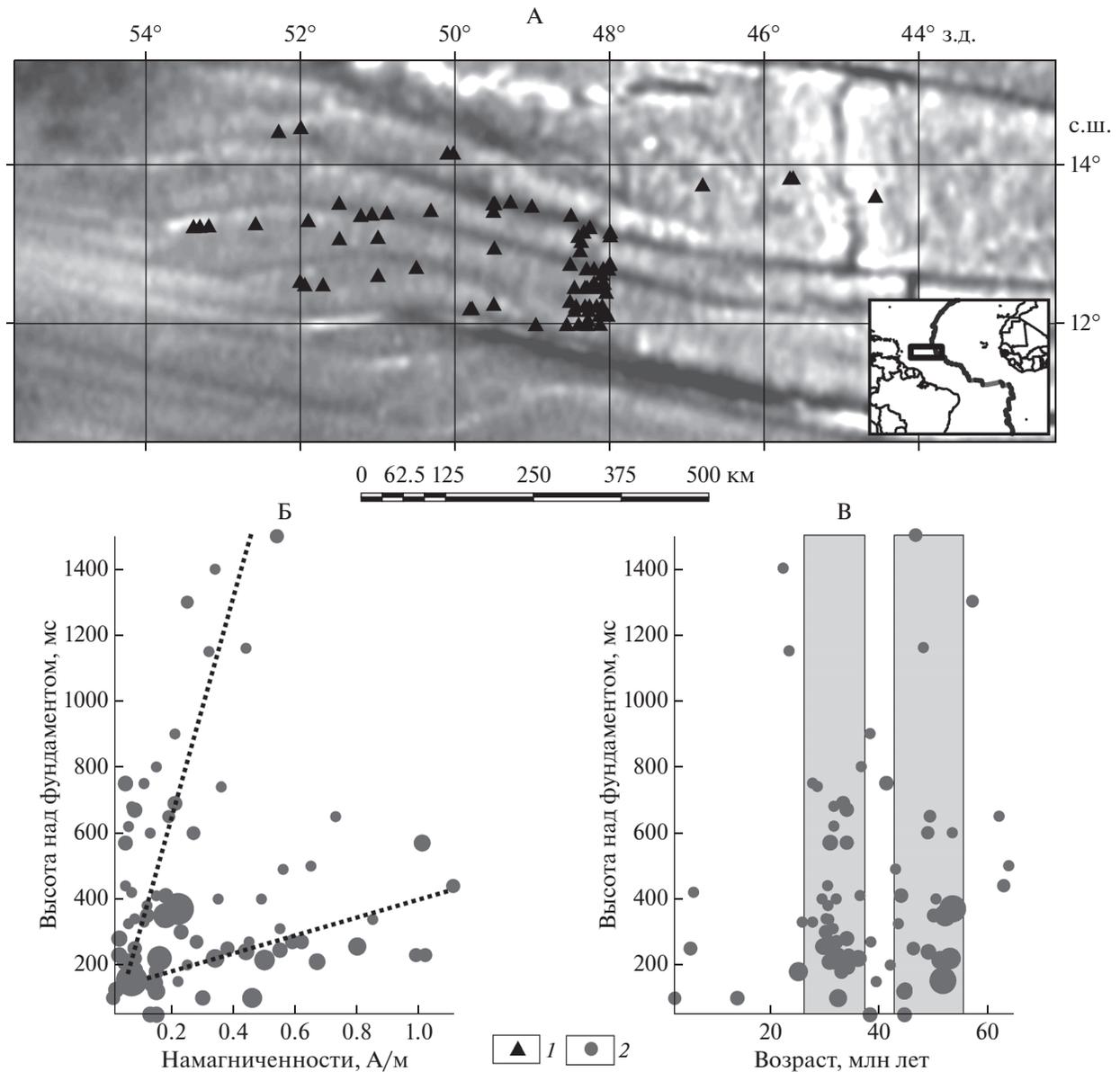


Рис. 8. Структуры протыкания в экваториальном сегменте Атлантики к западу от Срединно-Атлантического хребта по данным 9-го рейса НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1990).

На врезке: положение основного планшета.

Показаны: тренды (пунктир), размер символа пропорционален мощности осадков над вершинами структур от 0 до 520 м, возрастные интервалы фундамента с увеличенной плотностью структур протыкания.

А – общее пространственное распределение структур протыкания.

Б – корреляция намагниченности, рассчитанной по данным аномального магнитного поля, рельефа и высот структур протыкания над фундаментом, символы пропорциональны мощности осадков над вершинами структур.

В – корреляция высот структур над фундаментом с его возрастом.

1 – структуры протыкания (А); 2 – структуры протыкания в координатах корреляций (Б, В)

Сопоставление высот структур протыкания над фундаментом с его намагниченностью (см. рис. 8, Б) показывает наличие трендов с разным углом наклона. Ожидаемая закономерность заключается в увеличении высот структур в зависимости от наличия интенсивных процессов серпентинизации, при которых одновременно происходит увеличение объема породы, приводящее

к выдавливанию блоков наверх, и формирование химической намагниченности при образовании магнетита. В условиях транспрессии выжимание должно увеличивать высоту структур. Градуировка размеров символов мощностью осадочного чехла над вершинами структур (см. рис. 8, Б, В) показывает, что большие мощности проявлены при малых амплитудах структур до 400 мс, а при

больших амплитудах происходит полное протыкание чехла с выходом структур на поверхность. Сопоставление структур с возрастом (см. рис. 8, В) показывает сходство с распределением структур без разделения типов (см. рис. 3). Основное число структур не превышает амплитуды 400 мс и группируется на двух интервалах 27–38 и 43–53 млн лет, в которые происходила активизация процессов серпентинизации, связанная с вхождением верхней мантии в оптимальный температурный интервал [14]. Значения амплитуд больше указанного порога встречаются редко, а структуры с меньшей амплитудой не прорывают осадочный чехол.

Наиболее интересным является выявление двух трендов с разным углом наклона (см. рис. 8, Б). Пологий тренд, являющийся основным, представлен большим количеством структур с наличием осадочного чехла над вершинами, а более крутой – редкими структурами без осадочного чехла с невысокой намагничённостью. Вероятной интерпретацией такого распределения может быть выжимание или прорыв некоторыми структурами протыкания осадочного чехла при слабой степени серпентинизации и намагничённости в ослабленных из-за трещиноватости зонах и более свободный дальнейший их рост по сравнению с основными структурами этого типа.

Штамповые складки

Штамповые складки (см. рис. 4, разрезы 9, 10) в районе исследований (рис. 9, А) распределены практически равномерно в субширотном направлении. Их центры расположены на галсах съёмки в межразломных блоках. Морфологическая интерполяция по непрерывной альтиметрической топоснове подтверждает, что складки, выявленные на отдельных разрезах, представляют собой единые складчатые структуры с осями, повторяющими конфигурацию разломных трогов. Это видно по компиляции сейсмогеологических разрезов [8]. Градуировка размеров символов складок их высотами над фундаментом (см. рис. 9, А) показывает наличие длиннопериодной ундуляции высоты в пределах блока между разломами Меркурий и Вима с минимумом около 50° з.д. и затухание высот складчатости при выходе за пределы кинк-банд зоны. Область пониженных значений высот расположена там же, где находится область пониженной плотности структур протыкания (см. рис. 8, А) и отрицательных цветочных структур (см. рис. 6). Это указывает на то, что в данной области есть структурный комплекс, связанный с небольшим локальным растяжением, ортогональным пассивным частям разломов.

Очевидным является тренд увеличения ширины складок в зависимости от высоты (см. рис. 9, Б). Ширина и высота складок, оцифрованных в процессе обработки, масштабируются в сторону уве-

личения при аналогичном изменении другого параметра. В пределах размеров ширины до 17000 м выделяются более пологие тренды, указывающие на наличие опережающего роста высот складок. Это объясняется возможностью увеличенного вертикального роста для более узких образований, протыкающих верхнюю часть коры. Сопоставление ширины складок с аномалиями Буге (см. рис. 9, В) показывает наличие их группирования в диапазоне значений 311–338 мГал и возрастания амплитуд складок к его середине. Этот диапазон соответствует определенному разуплотнению абиссальных значений аномалий Буге. Фоновые средние значения этих аномалий на абиссали в ЭСА существенно (>100 мГал) меньше, чем в других котловинах к северу и к югу (см. рис. 9, А, врезка). Поскольку в ЭСА также наблюдаются максимальные латеральные смещения сегментов САХ по трансформным разломам с длинными активными частями, можно предположить, что деформации, латеральные смещения и низкий фон аномалий Буге являются взаимосвязанной группой геолого-геофизических явлений.

Зависимость ширины складок от намагничённости (см. рис. 9, Г) показывает группирование облака точек под трендом, в котором складки становятся более узкими при увеличении намагничённости. Это указывает на то, что более серпентинизированные блоки с магнитоактивным материалом имеют тенденцию к формированию узких структур, протыкающих (см. рис. 8, Б) или приподнимающих (см. рис. 9, Б, Г) верхнюю кору. Это подтверждает обоснованный в работе [2] по данным Канаро-Багамского геотраверса процесс формирования серпентинитовых протрузий.

Чешуйчато-надвиговые формы

Основная часть района изучена субмеридиональными галсами, на которых чешуйчато-надвиговые формы (см. рис. 4, разрез 3) практически отсутствуют (рис. 10, А). Они выявлены в основном на субширотных переходах между галсами и в пределах полигона в восточной части района. Эти формы проявлены в обрамлении кинк-банд зоны, что также указывает на сдвиговые смещения вдоль пассивных частей трогов, поскольку деформации этого типа входят в сдвиговый парагенез [19]. На полигоне с субширотными галсами надвиги проявлены во всех межразломных блоках. Таким образом, взаимное смещение блоков происходит на всем пространстве с деформированной конфигурацией пассивных частей разломов. Распределение вергентности, направление которой ориентировано символами (см. рис. 10, А), показывает, что взаимное смещение блоков может быть разнонаправленным, и формирует компактное проявление данных форм с разной вергентностью. Скорее всего, процесс

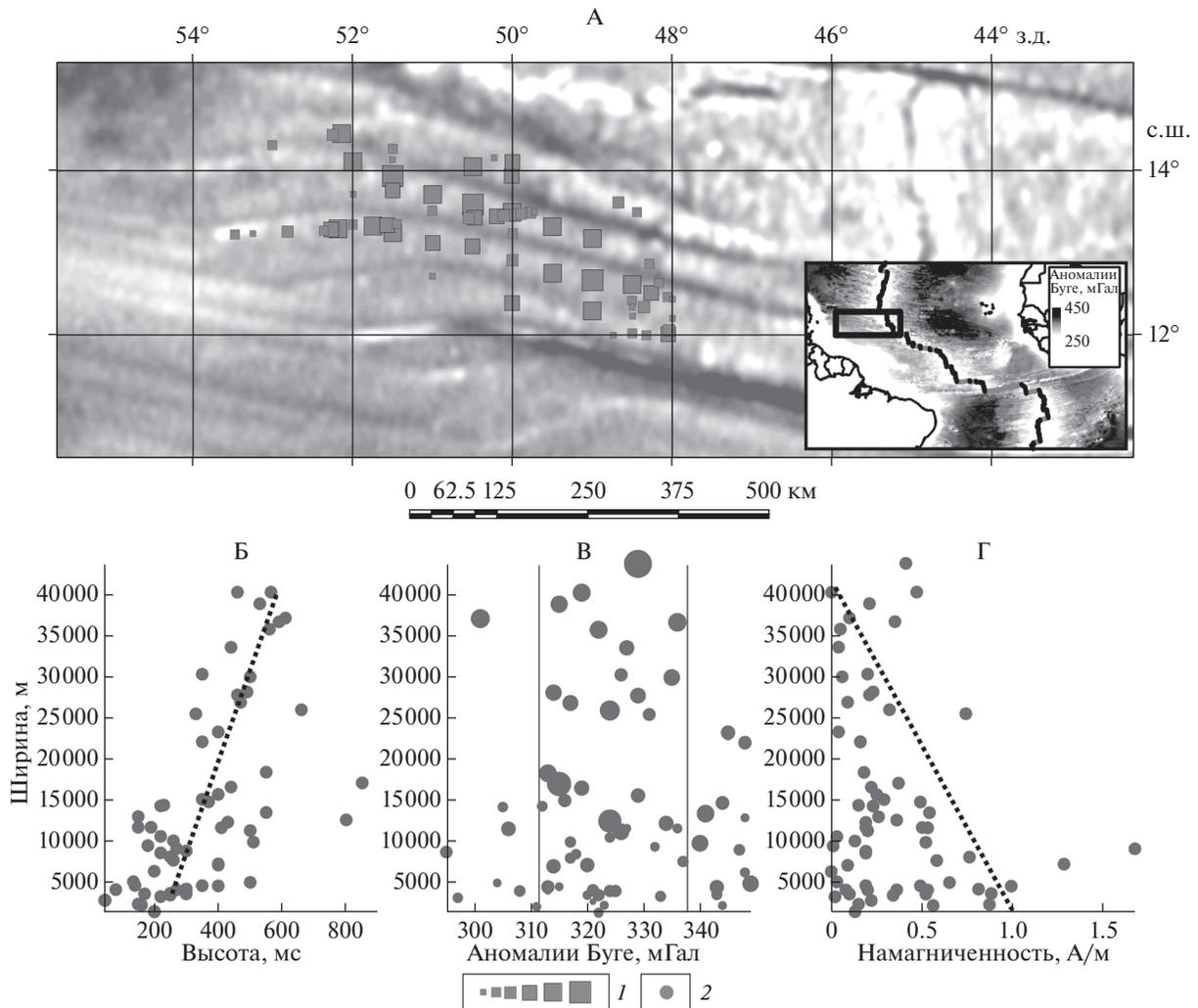


Рис. 9. Штамповые складки в экваториальном сегменте Атлантики к западу от Срединно-Атлантического хребта по данным 9-го рейса НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН РАН, 1990).

На врезке: положение основного планшета на обычных аномалиях Буге.

Показаны: тренды (пунктир), интервал значений аномалий Буге с увеличенной встречаемостью складок.

А – общее пространственное распределение центров штамповых складок.

Б – корреляция высоты и ширины складок.

В – корреляция ширины складок и аномалий Буге, размер символа отградуирован по высоте складок от 45 до 1020 м.

Г – корреляция ширины складок с намагниченностью, рассчитанной по данным аномального магнитного поля и рельефу.

1 – штамповые складки, отградуированные по высоте от 45 до 1020 м (А); 2 – штамповые складки в координатах корреляций (Б, В, Г)

распределения вергентности возникает из-за вариации направлений и значений векторов смещений отдельных межразломных блоков в общей зоне деформации. Центральная часть района около 50° з.д. (см. рис. 10, А) является аномальной и по проявлению данного вида деформаций, которые наблюдаются на двух субмеридиональных галсах, показывающих наличие соответствующих смещений.

Зависимость ширины деформаций от намагниченности (см. рис. 10, Б) показывает, что самые крупные формы возникают при минимальных

значениях этого параметра. Это указывает на отсутствие причинной связи с процессами серпентинизации и на наличие сдвигового влияния в их формировании. При больших значениях намагниченности возникают формы с минимальной шириной в обрамлении при узких серпентинитовых протрузиях. Зависимость амплитуды деформаций от значений аномалий Буге (см. рис. 10, В) показывает их концентрацию в диапазоне 310–334 мГал. В аналогичном диапазоне распространены штамповые складки (см. рис. 9, В) при общем пониженном фоновом значении аномалий Буге в ЭСА. Рас-

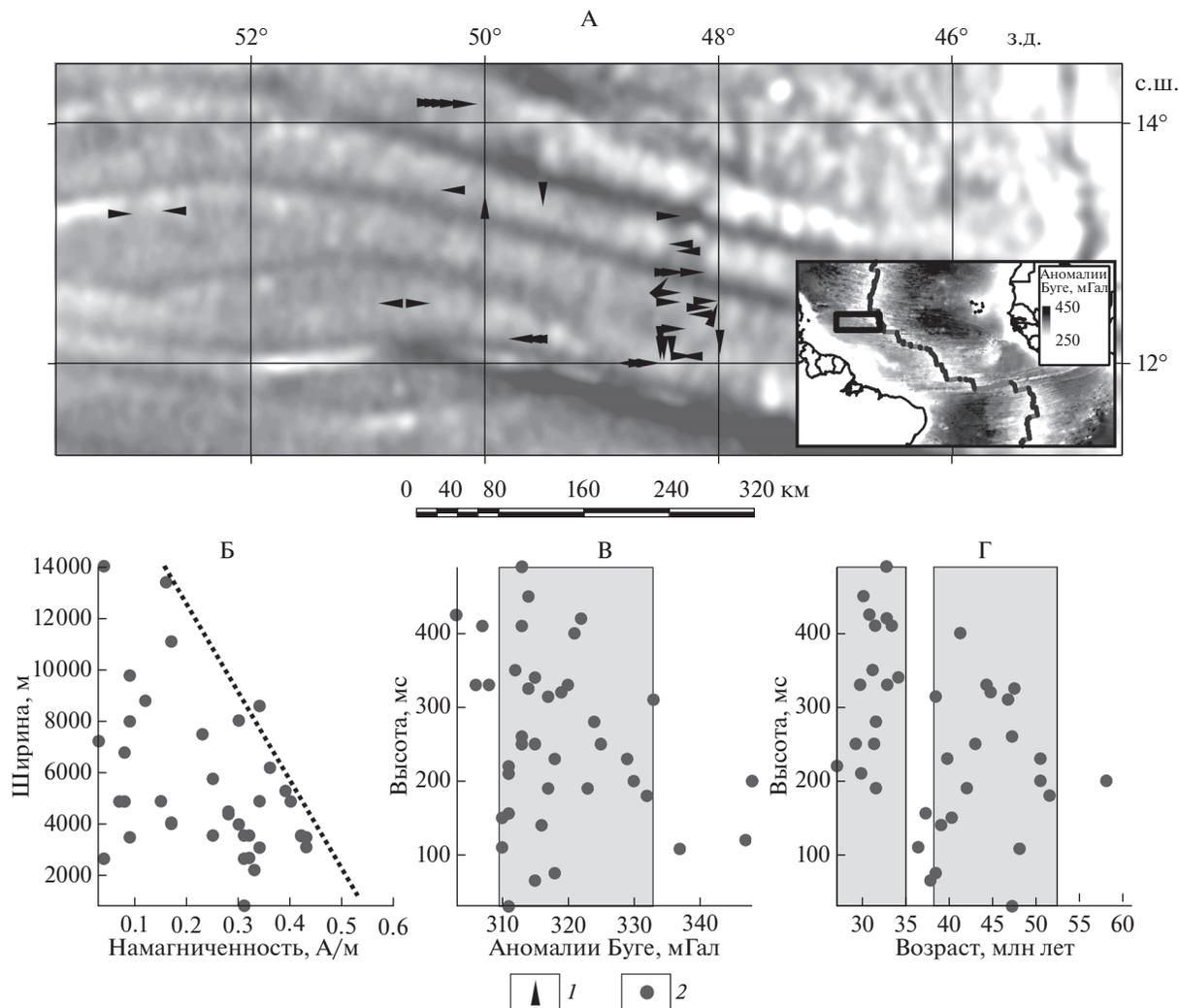


Рис. 10. Чешуйчато-надвиговые формы в экваториальном сегменте Атлантики к западу от Срединно-Атлантического хребта по данным 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990).

На врезке: положение основного планшета с обычными аномалиями Буге.

Показаны: тренды (пунктир), интервал значений аномалий Буге и возрастные интервалы с увеличенной встречаемостью форм.

А – общее пространственное распределение чешуйчато-надвиговых форм.

Б – корреляция ширины форм с намагненностью, рассчитанной по данным аномального магнитного поля и рельефу.

В – корреляция высоты форм и аномалий Буге.

Г – корреляция высоты форм и возраста.

1 – надвиги, ориентированные по направлению вергентности (А); 2 – надвиги без градуировки в координатах корреляций (Б, В, Г)

пределение высот деформаций по возрасту фундамента (см. рис. 10, Г) показывает, что в деформационные процессы, имеющие новейший и современный возраст, вовлечены структуры осадочного чехла и фундамента всех периодов активизации серпентинизации и формирования структур с вертикальным подъемом (см. рис. 3).

Взбросы

Распределение взбросовых нарушений (рис. 11), показанное символами, пропорциональными амплитуде нарушений, демонстрирует устойчивую

мозаичную фрагментацию поля напряжений, приводящего к образованию дизъюнктивных нарушений. Проявление взбросов имеет минимальное значение в центральной части района около 50° з.д. На востоке района по детальным полигоном работам выявлено, что встречаемость взбросов выше на субширотных галсах. Это указывает на субширотную ориентацию основных тангенциальных сил, воздействующих на литосферу района и формирующих деформационные нарушения осадочного чехла. Максимальная концентрация и амплитуда нарушений проявлена в обрамлении кинк-банд зоны, в частности на севе-

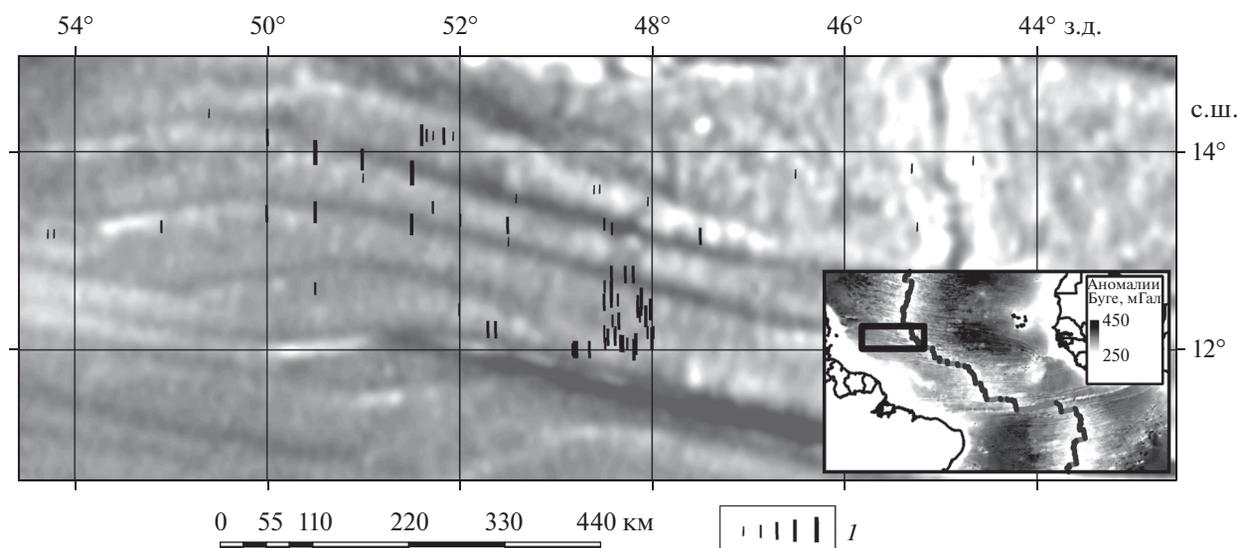


Рис. 11. Взбросы в экваториальном сегменте Атлантики к западу от Срединно-Атлантического хребта по данным 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990).

На врезке: положение основного планшета с обычными аномалиями Буге.

I – размер символа взбросов отградуирован пропорционально амплитуде от 12 до 1100 м

ро-западе, где происходит изменение азимута пассивных частей разломов.

Вертикальные акустические осветления

Вертикальные акустические осветления, имеющие также альтернативное название – газовые трубы, являются проявлением флюидов на сейсмической записи, проникающих вверх по слабо-консолидированной толще осадков или по сети трещин. Наличие этой формы записи показывает отсутствие флюидоупоров вдоль пространства, занятого газовой трубой (см. рис. 4, разрезы 1, 2, 7, 8) и не имеющего внутри когерентных рефлекторов. Основание газовых труб в большинстве случаев опирается на акустический фундамент, представленный базальтовым океаническим слоем, что указывает на эндогенный источник флюидов. Газовые трубы наблюдаются на всем пространстве района исследований, но основное их расположение приурочено к осевым зонам пассивных частей разломных трогов, заполненных осадками (рис. 12, А). Их наличие делает возможным детекцию явления дегазации методом НСП, поскольку дегазация в водной толще в частотном диапазоне НСП (до ~150 Гц) на глубинах в несколько тысяч метров с пневматическими источниками сейсмических волн практически незаметна. Таким образом, обнаружение труб преимущественно в разломных трогах не показывает однозначного отсутствия дегазации на участках дна, лишенных осадочного покрова. Тем не менее, район исследований, расположенный в возрастном диапазоне фундамента от 20 до 60 млн лет, имеет почти сплошное покрытие осадками,

за исключением редких выступов фундамента на структурах вертикального подъема с прорывом отложений и взбросовых дислокациях. Из этого следует, что концентрация газовых труб в разломах является значимой характеристикой и показателем эндогенного происхождения флюидов, при котором выведение их к поверхности приурочено к разломной сети корового заложения. Данная глубина трансформных разломов, выделяемых в рельефе, следует из того, что они в основном исчезают после расчета обычных аномалий Буге (см. рис. 12, А, врезка). Некоторое количество газовых труб выявлено в районе 48° з.д. в области небольших субмеридиональных смещений, где был отснят детальный полигон.

Зависимость высот газовых труб от намагниченности (см. рис. 12, Б) показывает слабый и предсказуемый тренд на увеличение, поскольку развитие процессов серпентинизации приводит, как к увеличению химической намагниченности, так и к росту флюидных выделений [4]. На фоне этого тренда просматриваются две области с повышенным значением высот, которые обладают увеличенным выходом флюидов на этапе развития серпентинизации при формировании магнитоактивного слоя с эффективной намагниченностью около 0.2 и 0.6 А/м, что подтверждает наличие определенных интервалов, при которых происходит активизация этих процессов [14]. Сопоставление высот газовых труб и аномалий Буге (см. рис. 12, В) показывает их концентрацию в определенном диапазоне значений от 315 до 348 мГал, пониженном по сравнению с фоновыми значениями в абиссальных котловинах.

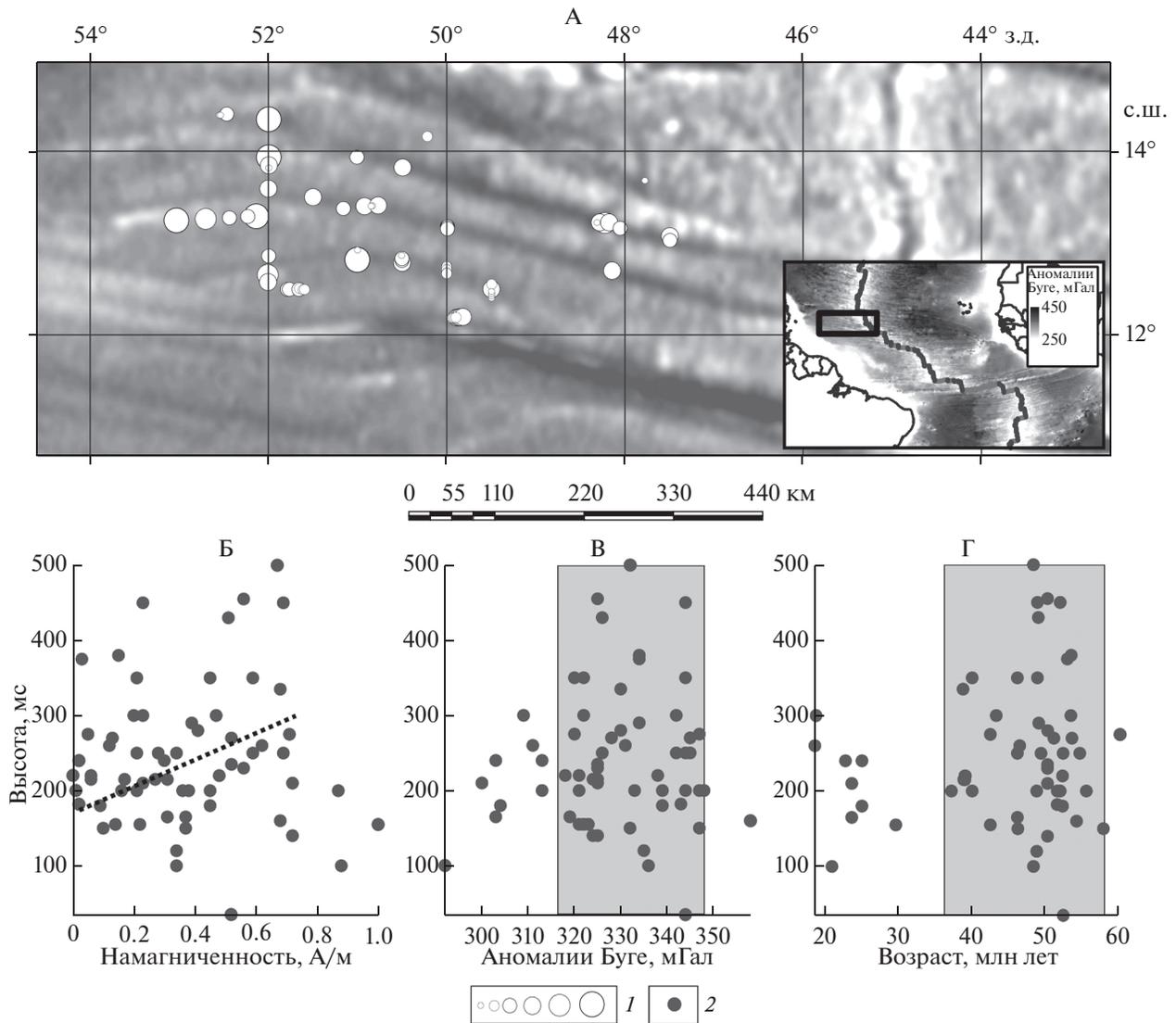


Рис. 12. Вертикальные акустические осветления (газовые трубы) в экваториальном сегменте Атлантики к западу от Срединно-Атлантического хребта по данным 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990).

На врезке: положение основного планшета с обычными аномалиями Буге. Показано: тренд (пунктир), интервалы значений аномалий Буге и возраста с увеличенной частотой встречаемостью газовых труб.

- А – общее пространственное распределение газовых труб, отградуированных по их ширине.
- Б – корреляция высоты газовых труб с намагниченностью, рассчитанной по данным аномального магнитного поля и рельефу.
- В – корреляция высоты газовых труб и аномалий Буге.
- Г – корреляция высоты газовых труб и возраста.
- 1 – газовые трубы, отградуированные по высоте от 300 до 2670 м (А); 2 – газовые трубы без градуировки в координатах корреляций (Б, В, Г)

Сопоставление высоты газовых труб с возрастом фундамента (см. рис. 12, Г) показывает резкое увеличение их встречаемости, начиная с 37–40 млн лет и древнее. На более молодом фундаменте наблюдается интервал с отсутствием газовых труб и небольшое увеличение их встречаемости на фундаменте моложе 25 млн лет. Анализ положения газовых труб в пространстве (см. рис. 12, А) показывает, что интервал отсутствия труб от 25 до 37 млн лет также выражен зоной 49°30′–48°30′ з.д.,

где газовые трубы не выявлены. Таким образом, основное количество этих явлений совпадает с третьим интервалом концентрации деформаций (см. рис. 3), полученным без их разделения на типы. Данное возрастное распределение имеет несколько интерпретаций:

– процессы серпентинизации формируют флюид, поступление которого в осадочный разрез проявляется медленно;

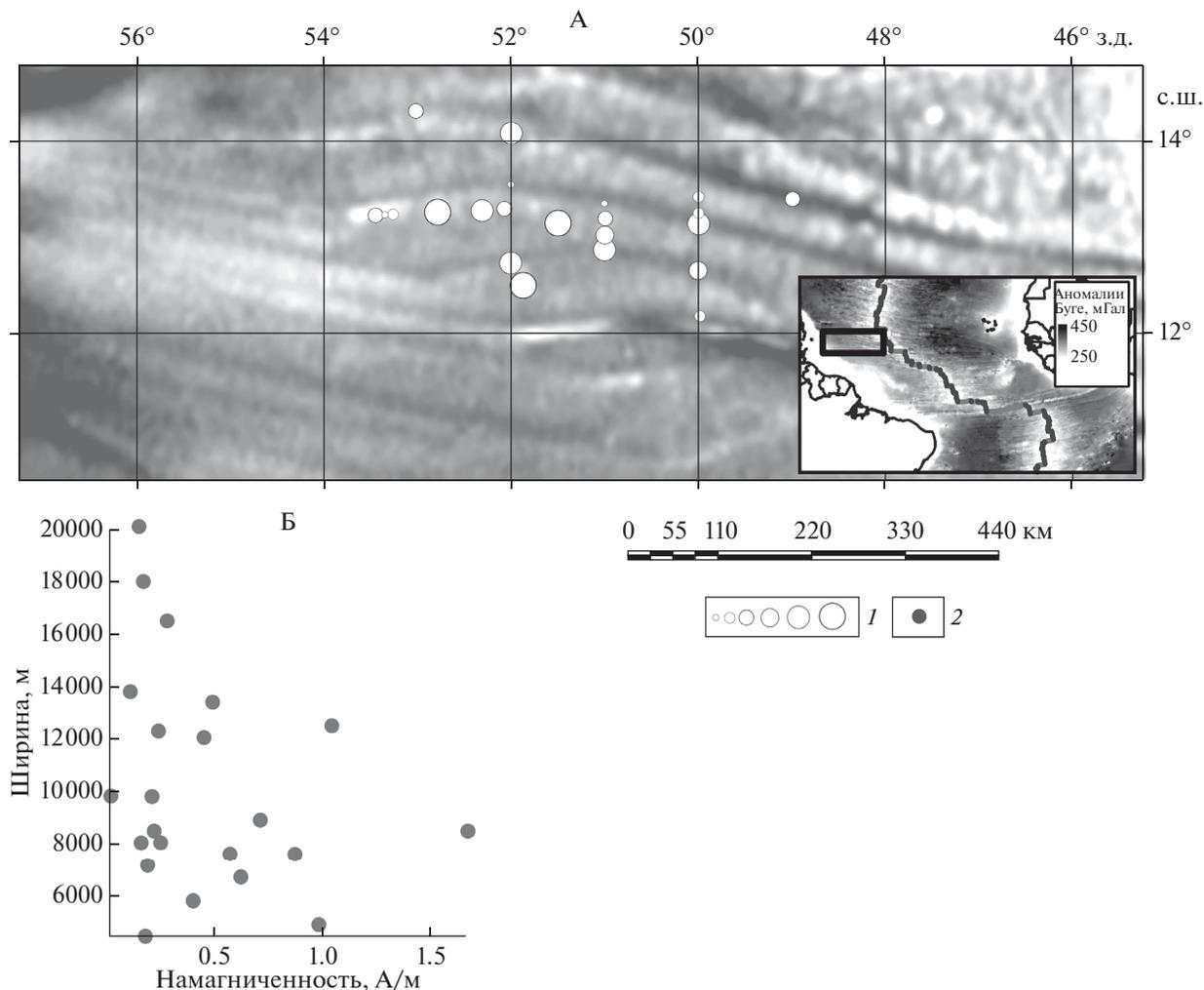


Рис. 13. Горизонтальные акустические осветления (линзы) в экваториальном сегменте Атлантики к западу от Срединно-Атлантического хребта по данным 9-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ГИН РАН, 1990).
 На врезке: положение основного планшета с обычными аномалиями Буге.
 А – общее пространственное распределение линз, отградуированных по их ширине.
 Б – корреляция ширины линз с намагниченностью, рассчитанной по данным аномального магнитного поля и рельефу.
 1–2 – линзы: 1 – отградуированные по ширине от 4.5 до 20 км (А), 2 – без градуировки в координатах корреляции (Б)

– генерации флюида в первый и второй (от молодого к древнему) интервал серпентинизации (см. рис. 3, см. рис. 12, Г) не произошло или он был заблокирован;

– формирование кинк-банд зоны, изменившей конфигурацию разломных зон, резко увеличило возможность выхода флюидов в осадочный покров, расширив разломные зоны в возрастном диапазоне фундамента от 40 млн лет и древнее.

Установить точно достоверность той или иной интерпретации трудно, но факт основного проявления газовых труб именно в данном районе и возрасте фундамента очевиден. Отметим также явное увеличение ширины газовых труб в западном направлении (см. рис. 12, А), которое может подтверждать третий вариант интерпретации,

связанный с расширением разломных зон, но не исключает полностью первых двух вариантов.

Горизонтальные акустические осветления

Горизонтальные акустические осветления сейсмической записи в абиссальных котловинах, называемые линзами (см. рис. 4, разрезы 2, 7, 8), представляют собой области потери акустической стратификации, расположенные непосредственно над фундаментом. Их распределение в районе работ (рис. 13, А) показывает, что они расположены преимущественно в межразломных блоках. Если предполагать одинаковый источник флюида для вертикальных и горизонтальных форм осветления записи, то его поступление происходит повсеместно. Вертикальные формы, имеющие

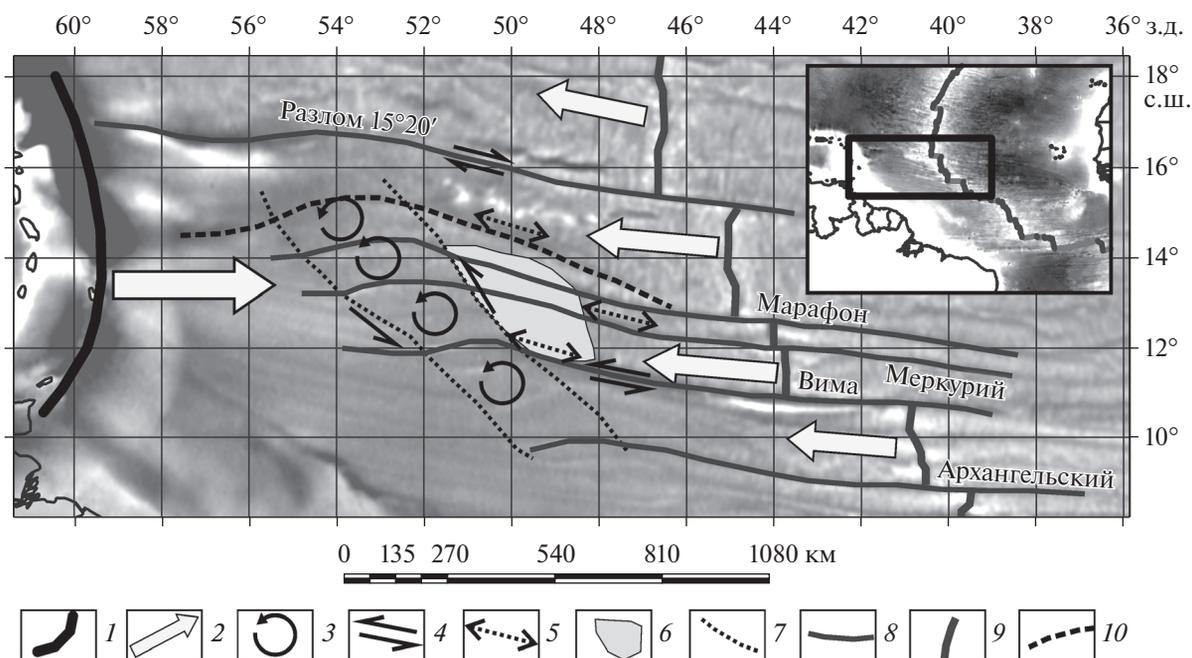


Рис. 14. Схема геодинамики в экваториальном сегменте Атлантики к западу от Срединно-Атлантического хребта. На врезке: положение основного планшета с обычными аномалиями Буге.
 1 – Антильская дуга; 2 – направление воздействия Антильской дуги и движение плиты от САХ; 3 – проворот блоков против часовой стрелки; 4 – сдвиговые смещения; 5 – сдвиговые смещения с переменным направлением; 6 – область минимума деформаций; 7 – граница кинк-банд зоны; 8 – трансформные разломы; 9 – ось рифта; 10 – параллельное ответвление разлома

среднюю высоту ~240 мс, проявлены в основном в трогах, где, как следует из распределения цветочных структур (см. рис. 6), существуют сдвиговые смещения, приводящие к формированию трещин. Горизонтальные формы со средней мощностью ~250 мс, практически такой же, как у вертикальных форм осветления, встречаются реже и имеют ширину до 20 км, в то время, как у вертикальных форм, средняя ширина составляет ~980 м. Сходство вертикальных размеров указывает на одинаковую скорость проградации флюида в осадках для обоих случаев, а разность горизонтальных размеров и структурного положения – на различные системы трещиноватости, по которым идет выход эндогенного флюида. Мы не исключаем наличия в межразломных блоках системы трещин, пропущенной из-за редкой сети субмеридиональных галсов при съемке.

Линзы расширяются к западу и их расположение на фундаменте с возрастом более 40 млн лет, как и у газовых труб, указывает на полное сходство процессов, формирующих данный вид аномалий, за исключением геометрии выводящих каналов. Эти каналы в кинк-банд зоне могут отличаться от каналов в остальной части района работ, поскольку (см. рис. 13, А) в ней расстояние между трогами на 10–15% больше, чем в основной части. Это делает вероятным появление небольших локальных структур растяжения, наряду

со сдвиговыми и надвиговыми деформациями. Сопоставление ширины линз с намагниченностью фундамента (см. рис. 13, Б) показывает, что при больших значениях ширины и интенсивных процессах серпентинизации формируются более узкие линзы, переходящие в высокие вертикальные формы (см. рис. 12, Б).

СХЕМА ГЕОДИНАМИКИ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО СЕГМЕНТА ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКИ

Анализ данных по тектоническим деформациям и флюидным аномалиям записи НСП позволил составить схему геодинамики района исследований (рис. 14). Западная часть северного сегмента ЭСА расположена в области отрицательных значений атрибута $\delta(V_p/V_s)$ и проявлений трансформных разломов с большим латеральным смещением сегментов САХ. Также в ней наблюдается общее разуплотнение между разломом 15°20' и разломом Вима, и по данным [25] о скоростях спрединга она является зоной с повышенными на 10% значениями скоростей по сравнению с сегментами плиты к северу и югу. Поскольку разница в скоростях спрединга не может выровняться сразу за пределами активной части разлома, сдвиговые смещения в пассивных частях продолжают существовать на удалениях, со-

измеримых с длиной активных частей. Этот процесс формирует структурирование пространства плиты на отдельные блоки вдоль пассивных частей разломов с наличием тектонических брекчий и серпентинитов [8], по ослабленным участкам которых могут активизироваться движения фрагментов плит при возникновении вариаций параметров их движения. В связи с этим вдоль пассивных частей разломов $15^{\circ}20'$ и Вима обозначены право- и левосдвиговые. По данным [22] заложение Антильской дуги имеет новейший возраст (~10 млн лет). Ее воздействие (см. рис. 14) на северный сегмент ЭСА приводит к формированию кинк-банд зоны, меняющей конфигурацию пассивных частей трансформных разломов, причем только в интервале широт, в котором простирается дуга. Кроме того, это воздействие привело к переориентации трога разлома Вима [20] к виду, ортогональному Антильской дуге. Возникновение этой дуги, скорее всего, является следствием проникновения с запада в Атлантику одного из ответвлений плюма Восточно-Тихоокеанского поднятия вдоль Галапагосского рифта, которое видно по данным сейсмотомографии [23].

При формировании кинк-банд зоны возникают смещения блоков литосферы с элементами поворота против часовой стрелки. Это приводит к возникновению деформаций, связанных со сжатием и вертикальным подъемом фрагментов коры, и образованию локальных растяжений, облегчающих дегазацию эндогенного флюида. Субширотно ориентированные чешуйчато-надиговые формы с различной вергентностью указывает на неравномерность сдвиговых смещений при латеральном воздействии на межразломные блоки, которая на схеме (см. рис. 14) показана знаком смещений переменного направления вдоль трансформных разломов. Суперпозиция общего вектора движения плиты от САХ с воздействием Антильской дуги формирует восточнее кинк-банд зоны область, где деформации имеют минимальное проявление, а максимальные амплитуды деформаций сконцентрированы в ее периферии и в самой кинк-банд зоне. С севера эта область ограничена трогом параллельной ветви разлома Марафон, вдоль которого также возможны сдвиговые смещения переменного направления. Кинк-банд зона также сформировалась по первичной неравномерной структурированности плиты, возникшей из-за резкого изменения параметров движения плит в интервале от 70 до 50 млн лет и смещению Эйлерова полюса на запад. Это привело к изменению направления спрединга и изгибу трансформных разломов вдоль всей северной Атлантики и формированию рифта в море Лабрадор. Именно вдоль возрастного диапазона фундамента от 70 до 50 млн лет, обладающего изначально сформированной неоднородно-

стью, произошло формирование кинк-банд зоны при воздействии Антильской дуги.

СИНТЕЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Признаками флюидов на сейсмоакустических записях являются:

- потеря акустической стратификации и хаотизация слоев;
- образование контрастных газовых “шапок”;
- “проседание” осей синфазности;
- проявление узких вертикальных зон акустического осветления, связанных с прорывом флюидов;
- акустическое осветление осадков, примыкающих к фундаменту;
- появление аномалий в атрибуте мгновенной частоты.

Признаками прорывов флюидов в водную толщу из осадочного чехла, аккумулирующего подвижные компоненты, являются:

- характерные дифракции волн с вершинами над дном,
- потеря акустической стратификации,
- осветление и хаотизация верхней части разреза под прорывом,
- локальное вспучивание дна,
- образование конусов из осадочного материала или покмарок.

Флюидные аномалии встречаются над структурами протыкания, разломными зонами и вероятно в районах с деградацией газогидратного слоя, служащего флюидоупором, наряду с литологически слабопроницаемыми отложениями.

Проявления флюидов в пространстве приурочены к субширотным зонам активизации деформаций от САХ в котловинах до 1700 км и более, а также к зонам отрицательных плотностных аномалий, таким как кора хессовского типа в районе разлома $15^{\circ}20'$, и в южной Атлантике на широтах 20° – 24° ю.ш. Зоны деформаций представлены разнообразным набором нарушений сдвигового парагенеза в комбинации со сжатием и растяжением. Снижение плотности при серпентинизации формирует аномалии силы тяжести, превышающие точность альтиметрических данных и делает возможным прогноз этих зон по спутниковым данным.

Значительную часть деформационных структур составляют образования, связанные с вертикальным подъемом осадочного чехла узкими и широкими блоками фундамента, дегазационным подъемом и транспрессионным выжиманием как новейшего, так и современного возраста. В пространстве они проявлены около кинк-банд структур северо-западной ориентации, пересе-

кающих северный сегмент ЭСА. Гистограмма высот структур, недифференцированных по типу, имеет главный максимум около 400 м. При серпентинизационном происхождении вертикального выдавливания блоков фундамента мощность слоя, охваченная серпентинизацией, достигает 2 км. Полиmodalность распределения указывает на неоднократную активизацию процессов около этих структур. В зависимости от возраста фундамента фиксируется нисходящая зависимость глубины дна около структур, имеющая линейный вид со ступенью около 20 млн лет и более пологим градиентом после этого возраста. Основной тренд высот структур имеет вид, плавно восходящий от 400 до 600 м в интервале 0–20 млн лет и далее более пологий до 700 м с наложенными на него тремя зонами резко повышенных значений:

- 6–16 млн лет (средне-поздне-миоценовая),
- 27–38 млн лет (олигоценная),
- 43–53 млн лет (ранне-средне-эоценовая).

Подобное распределение может возникнуть из-за пульсаций магнитных свойств серпентинитов в зависимости от снижающейся температуры верхней мантии с локальной активизацией диапировых процессов при достижении определенного температурного значения. Возраст фундамента не соответствует возрасту структур, но может отображать эволюцию температурного состояния. В интервалах между зонами с большими высотами структур находятся точки излома рельефа, связанные с фазовыми переходами в подошве литосферы.

Систематизация типов деформационных структур по 2D данным НСП построена по направлению смещения масс в вертикальной плоскости разреза. Выделены следующие типы тектонических структур:

- чешуйчато-надвиговые деформации, проявленные в скупивании при горизонтальном смещении,
- диапировые структуры или структуры протыкания, связанные с положительными вертикальными движениями,
- штамповые складки при большой ширине блока фундамента,
- деформации, связанные с подъемом флюидов.

Деформации, связанные с отрицательными вертикальными движениями свойственны флангам САХ, где наиболее происходит остывание литосферы. В этих областях слабо развит осадочный покров, поэтому их трудно выделить по его нарушениям. Отрицательные движения также встречаются при возникновении трансенсии в пассивных частях разломов. Аномалии напластования осадочного материала, связанные с контурными течениями и турбидитными потоками, не имею-

щими тектонической природы, также выделены в работе. В изученной котловине есть области, где сейсмофации этих потоков не наблюдаются. Наиболее распространенными по частоте встречаемости в пределах района работ формами деформаций осадочного чехла являются:

- вертикальные акустические осветления (газовые трубы),
- штамповые складки, структуры протыкания,
- взбросовые нарушения,
- чешуйчато-надвиговые системы,
- горизонтальные акустические осветления сейсмической записи.

Отдельно выделим типы деформаций, связанные со сдвиговыми смещениями – отрицательные и положительные цветочные структуры, обнаруженные в пассивных частях трансформных разломов. Данные о разнице скоростей спрединга вдоль САХ позволяют заключить, что сдвиги в пассивных частях трансформных разломов возможны.

Общее пространственное распределение деформационных и других аномальных видов сейсмической записи показывает их максимальную концентрацию в зонах повышенной макротрещиноватости над “холодными” блоками, выявленными по томографическому атрибуту $\delta(V_p/V_s)$ и обосновывает первые два элемента цепочки внутриплитных явлений – контрастное геодинамическое состояние мантии и макротрещиноватость. Встречаемость складчатых форм спадает при приближении к САХ из-за небольших значений мощностей осадков.

Обнаружение структур сдвигового парагенеза в осадочном чехле пассивных частей трансформных разломов указывает на существование сдвиговых смещений между сегментами океанической литосферы после их перемещения за пределы активных частей разломов в результате спрединга. Положительные цветочные структуры, возникающие в транспрессионном режиме, расположены на изгибе разломов Марафон и Меркурий, обрамляющих с севера структурную кинк-банд зону. Внутри этого обрамления редкие проявления отрицательных цветочных структур указывают на локальную компоненту растяжения в мозаичном распределении напряжений.

Район исследований с юга обрамляется западной пассивной частью разлома Вима, в которой в поле альтиметрии и по данным НСП наблюдается медианный хребет, являющийся индикатором сдвига со сжатием. Таким образом, условия транспрессии наблюдаются в большинстве пассивных частей разломов, обрамляющих зону кинк-банд структур.

Пространственное распределение наиболее часто встречаемых деформаций в северном сегменте ЭСА к западу от САХ показывает повышенную концентрацию деформационных объектов с положительной компонентой вертикального движения в обрамлении кинк-банд зоны, меняющей обычную конфигурацию пассивных частей трансформных разломов. Аналогичное распределение наблюдается для положительных цветочных структур в трогах разломов и для структур протыкания, штамповых складок, надвиговых форм, взбросов. При этом формируется мозаичное распределение с четким минимумом встречаемости и амплитуды этих структур в центральной части района исследований между $50^{\circ}30'$ и $48^{\circ}30'$ з.д., что подтверждает возможный характер распределения напряжений. Особенностью распределения взбросо-надвиговых форм является субширотная вергентность переменного направления. Сопоставление с намагниченностью показывает прямую связь высот структур протыкания с ее интенсивностью и развитием процессов серпентинизации. Ширина штамповых складок имеет обратную зависимость от намагниченности, что является тенденцией формирования протрузий при небольшой ширине зон серпентинизации. Отсутствие связи намагниченности со взбросо-надвиговыми формами говорит об их преимущественно сдвиговом генезисе. Развитие деформаций установлено в диапазоне значений аномалий Буге $\sim 310\text{--}340$ мГал, который ниже фонового для соседних абиссальных котловин. Это указывает на связь деформационных объектов с разуплотнением и механизмом его формирования около разломов с большим латеральным смещением оси САХ. По возрасту фундамента деформации распределены в обоих интервалах 27–38 и 43–53 млн лет, в которых имеется мощный осадочный чехол для их выявления по характерным видам сейсмической записи.

Распределение аномалий, связанных с флюидным фактором показывает, что они наблюдаются повсеместно в пределах диапазона аномалий Буге $\sim 310\text{--}340$ мГал, но газовые трубы проявлены преимущественно вдоль разломных трогов, а линзы – в межразломных блоках. При этом все виды аномалий примыкают к акустическому фундаменту, что указывает на их эндогенное происхождение. Ширина аномалий закономерно увеличивается в западном направлении с возрастом и развитием процессов серпентинизации. Аномалии записи, связанные с потерей акустической стратификации за счет проникновения флюида, сформированы одним источником, но выводятся из фундамента в слабоконсолидированную осадочную толщу по различным системам трещин. Газовые трубы и линзы имеют практически одинаковую высоту и мощность в осадках с одинаковой скоростью проникновения

флюида вверх по разрезу. Сопоставлением с намагниченностью выявлен закономерный рост флюидных аномалий со всплесками амплитуд в двух интервалах намагниченности. Особо отметим практически полное отсутствие флюидных аномалий над фундаментом с возрастом моложе 40 млн лет, область которого совпадает с областью уменьшенной амплитуды тектонических деформаций. Это происходит либо из-за специфики проникновения флюида из фундамента в осадок, формирующей запаздывание в формировании флюидных аномалий, либо из-за напряжений в литосфере, при которых в зоне обрамления кинк-банд структур формируются участки с локальным растяжением, облегчающим процесс выделения флюида.

ВЫВОДЫ

1. Внутриплитные деформационные структуры ЭСА и области дегазации в осадочной толще, определяемые по совокупности признаков в записях сейсмопрофилирования, ассоциированные с неоднородным состоянием верхней мантии и макротрещиноватостью, при сопоставлении с геофизическими полями указывают на существование вертикальных движений блоков фундамента, связанных с разуплотнением и дополнительной намагниченностью пород верхней части кристаллической оболочки, возникающей при серпентинизации пород верхней мантии.

2. Анализ сейсмических разрезов полигонных и маршрутных промеров показывает наличие деформаций за пределами САХ, связанных со сдвиговым парагенезом в комбинации со сжатием и растяжением: цветочных структур, чешуйчато-надвиговых форм, медианных хребтов; и деформаций с вертикальным подъемом блоков фундамента амплитудой в среднем 400 м: структур протыкания, взбросовых нарушений, штамповых складок, сопровождающихся акустическим осветлением осадочной толщи в форме линз и газовых труб.

3. Внутриплитные деформационные явления в сочетании с данными геофизических полей образуют непротиворечивую причинно-следственную цепочку явлений и процессов: контрастное латеральное геодинамическое состояние мантии; неоднородные горизонтальные движения, формирующие с возрастом на фоне остывания литосферы повышенную макротрещиноватость, включающую сдвиговые тектонические деформации и изостатическую компенсацию локальных вертикальных смещений; проникновение воды в верхнюю мантию по разрывным нарушениям; формирование условий для серпентинизации пород верхней мантии с образованием зон разуплотнения, локальных отрицательных гравитационных аномалий и повышенной намагни-

ченности; образование деформаций вертикального подъема блоков фундамента и осадочного чехла и генерация флюидов (в основном метан); аккумуляция флюидов в осадочном чехле и их прорывы в водную толщу, формирование аномальной сейсмоакустической записи.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 15-05-05888 (С.Ю. Соколов). Оцифровка объектов сейсмических записей, связанных с формированием подводных оползней и других опасных геологических явлений, выполнена частично в рамках темы госзадания № 0135-2016-0013 Геологического института РАН (А.О. Мазарович). Оцифровка сейсмических записей с проявлениями дегазации осадочного чехла выполнена частично в рамках Программы Президиума РАН 3 (госзадание № 0135-2015-0022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов М.П., Еремеев В.В., Жарков С.М. Строение осадочного чехла Центрального сектора Атлантики в районе разлома зеленого Мыса // Строение осадочного чехла Центральной Атлантики. М.: Наука, 1990. С. 95–110. (Тр. ГИН РАН; Вып. 449).
2. Астафурова Е.Г., Городницкий А.М., Лукьянов С.В., Машенков С.П. Природа магнитных аномалий и строение океанической коры Срединно-Атлантического хребта и прилегающих котловин в пределах Канаро-Багамского геотраверса / Ред. А.М. Городницкий. Природа магнитных аномалий и строение океанической коры // М.: ВНИИРО, 1996. С. 171–202.
3. Глубинное строение и эволюция литосферы центральной Атлантики (результаты исследований на Канаро-Багамском геотраверсе) / Ред. С.П. Машенков, Ю.Е. Погребницкий. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. 299 с.
4. Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Силантьев С.А., Борисов М.В., Соколов С.Ю., Буго А. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 511–519.
5. Левченко О.В., Мерклин Л.Р., Свиридов Н.Н. Строение осадочной толщи и рельеф фундамента глубоководных котловин Атлантического и Индийского океанов / Ред. Ю.П. Непрочнов. Геофизические поля и строение дна океанских котловин // М.: Наука, 1990. С. 89–119.
6. Ломтев В.Л. Строение и история абиссальных холмов Северо-Западной плиты Пацифики по данным непрерывного сейсмического профилирования и сейсмостратиграфии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 2. С. 273–288. doi 10.5800/GT-2016-7-2-0206
7. Мазарович А.О., Соколов С.Ю. Новейшие деформации осадочного чехла в пассивных частях разломов Архангельского, Долдрамс и Вернадского (Атлантический океан) // ДАН. 1997. Т. 357. № 6. С. 801–804.
8. Мазарович А.О. Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. М.: Научный Мир, 2000. 176 с.
9. Мазарович А.О., Соколов С.Ю. Анизотропия внутриплитных деформаций Атлантического океана // Современные проблемы геологии / Тр. ГИН РАН. Вып. 565. М.: Наука, 2004. С. 221–250.
10. Машенков С.П., Литвинов Э.М., Горшков А.Г., Лукашевич И.П. Геофизические критерии выявления региональных обстановок, благоприятных для образования глубоководных полиметаллических сульфидов / Ред. И.С. Грамберг, П.А. Строев. Глубинное строение и геодинамика литосферы Атлантического и Тихого океанов // М.: Наука, 1992. С. 151–178.
11. Панаев В.А., Митулов С.Н. Сейсмостратиграфия осадочного чехла Атлантического океана. М.: Недра, 1993. 247 с.
12. Пилипенко А.И. Тектонические деформации Бразильской котловины // ДАН. 1993. Т. 330. № 4. С. 484–487.
13. Пилипенко А.И. Структуры тектонического сжатия на западном фланге Срединно-Атлантического хребта (8°–12° ю.ш.) // ДАН. 1995. Т. 340. № 5. С. 664–666.
14. Попов К.В., Базылев Б.А., Щербаков В.П. Температурный интервал возникновения намагниченности океанических шпинелевых перидотитов // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 303–314.
15. Приставакина Е.И. Строение верхней мантии под океанами и его связь с рельефом Северной Атлантики. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИО АН СССР, 1984. 24 с.
16. Соколов С.Ю. Особенности тектоники Срединно-Атлантического хребта по данным корреляции поверхностных параметров с геодинамическим состоянием верхней мантии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4 (32). С. 88–105.
17. Соколов С.Ю. Деформации осадочного чехла Экваториальной Атлантики и их сопоставление с геофизическими полями // Геотектоника. 2017. № 1. С. 81–96.
18. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Природа тектонической активности Земли // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. М.: ВИНТИ, 1993. 292 с.
19. Тимурзиев А.И. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидо-динамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью). Автореф. дисс. ... докт. г.-м. наук. М.: ЦГЭ, 2009. 40 с.
20. Bonatti E., Brunelli D., Buck W.R., Cipriani A., Fabretti P., Ferrante V., Gasperini L., Ligi M. Flexural uplift of a lithospheric slab near the Vema transform (Central Atlantic): Timing and mechanisms // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. Vol. 240. No. 3. P. 642–655.
21. Emery K.O., Uchupi E. The Geology of the Atlantic Ocean. NY: Springer-Verlag, 1984. 1050 p.
22. Klitgord K.D., Schouten H. Plate kinematics of the central Atlantic // Geology of North America. / P.R. Vogt, B.E. Tucholke (eds.). Vol. M. Boulder, Colorado: GSA, 1986. P. 351–378.

23. Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Burdick S. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* G³. 2008. Vol. 9. No. 5. P. 1–21. doi 10.1029/2007GC001806
24. Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena 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*, G³. 2009. Vol. 10. No. 8. P. 1–12.
25. 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* G³. 2008. Vol. 9. No. 4. P. 1–19.
26. 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. No. B1. P. 1–18. doi 10.1029/2008JB006008
27. <http://www.gebco.net>. GEBCO 30" Bathymetry Grid. Version 20141103. 2014. (Date of requirement 2014.12.15).

Рецензенты: Е.П. Дубинин, Т.Н. Хераскова

Deformations and Manifestations of Degassing in the Sedimentary Cover of the Equatorial Segment of the West Atlantic: Implications for Lithospheric Geodynamics

S. Yu. Sokolov^{a,*}, A. O. Mazarovich^a, N. N. Turko^a, K. O. Dobrolyubova^a,
Yu. S. Zaraiskaya^a, and E. A. Moroz^a

^a*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^{*}*e-mail: sysokolov@yandex.ru*

Received November 25, 2017

Abstract—Manifestations of fluids and deformations in the sedimentary cover, which are both factors of brightening (blinking anomalies) in seismoacoustic records, in the equatorial segment of the Atlantic coincide with the sublatitudinal zones of the activated passive parts of transform faults and with zones of lower gravity anomalies and higher values of remnant magnetization, which form as a result of serpentinization. The cause-and-effect sequence of intraplate phenomena includes: the contrasting geodynamic state → horizontal movements that form macrofractures → water supply to the upper mantle → serpentinization of rocks in the upper mantle → deformations associated with vertical uplift of basement and sedimentary cover blocks, coupled with fluid generation → and fluid accumulation in the sedimentary cover, accompanied by the formation of anomalies in seismoacoustic records. Based on the seismic data, we have identified imbricate-thrust deformations, diapir structures, stamp folds, and positive and negative flower structures, indicating the presence of strikeslip faults in the passive parts of transform faults. The general spatial distribution of deformation structures shows their concentration in cold mantle zones. Correlative comparison of the structural characteristics of deformations shows the direct relationship between the heights of structures and the development of serpentinization processes. As per the age of the basement, deformations range from 27–38 to 43–53 Ma; a quite thick sedimentary cover makes it possible to reveal them based on the characteristic types of seismoacoustic records. The formation of the Antilles arc 10 Ma ago affected the equatorial segment of the Atlantic; it formed kink bands where lithospheric blocks underwent displacements with counterclockwise rotations, deformations related to compression and vertical uplift of crustal fragments, and local extension that favored degassing of endogenous fluids. Sublatitudinally oriented imbricate-thrust deformations with different vergences indicate irregularity and alternating strike-slip directions as blocks between fractures were laterally influenced.

Key words: equatorial Atlantic, cold mantle blocks, geodynamics, serpentinization, deformations of the sedimentary cover, degassing, passive parts of transform faults.