

На правах рукописи



Соколов Сергей Юрьевич

Тектоника и геодинамика Экваториального сегмента Атлантики

Специальность: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва

2019

**Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Геологическом институте Российской академии наук
в Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Конешов Вячеслав Николаевич

(ИФЗ РАН, г. Москва, заведующий лабораторией гравинерциальных измерений)

доктор геолого-минералогических наук

Лейченко Герман Леонидович

(ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург, заведующий отделом геологии и минеральных ресурсов Антарктики)

доктор геолого-минералогических наук

Захаров Владимир Сергеевич

(Геологический факультет МГУ, г. Москва, профессор кафедры динамической геологии)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
(г. Москва)

Защита состоится 30 мая 2019 года в 14³⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.215.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте РАН по адресу: 119017, Москва, Пыжевский переулок, д. 7.

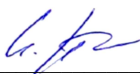
С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ИГЕМ РАН

Автореферат разослан « _____ » _____ 2019 года

Ученый секретарь

диссертационного совета,

канд. геол.-мин. наук


_____ И.С.Патина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Геолого-геофизические исследования Атлантического океана последние несколько десятилетий проводились с опорой на тектонику плит в качестве фундаментальной геодинамической модели, в рамках которой адаптировались результаты инструментальных наблюдений и донного опробования. Исследования подтвердили актуальность основного положения модели – горизонтального перемещения плит и сопряженных с ним механизмов формирования разнообразных морфоструктур дна. Накопленные факты о структурах и процессах внутри плит и на их границах (рифтогенез, спрединг, смещения в трансформных разломах, магматизм, сейсмичность, рельеф, осадочный чехол и его деформации и т.д.) показали нарастающее расхождение с другим постулатом модели – жесткостью плит. В связи с этим все положения рабочей геодинамической модели были переформулированы (Хаин, Ломизе, 2005). Главной особенностью, заложенной в уточненной модели, является расслоенное и блоковое строение внутриплитного пространства, при котором фрагменты плит способны к независимым горизонтальным и вертикальным смещениям, а также значительные латеральные неоднородности строения литосферы и астеносферы как ортогонально Срединно-Атлантическому хребту (САХ), так и вдоль него. Внутриплитные процессы формируют структуры, механизмы возникновения которых и адаптация к рабочей геодинамической модели не очевидны и не имеют упрощенных решений. Интерпретация накопленных данных и выводы о причинах структурообразования на внутриплитном пространстве должны проводиться таким образом, чтобы разрыв между рабочей теоретической моделью и фактическими данными был сокращен. Направлением решения этой задачи может быть усложнение рабочей модели введением в нее новых факторов тектогенеза, которые образуют суперпозицию сил, действующих на среду с усложненным относительно модельных примитивов строением. Эта задача имеет фундаментальный характер и актуальна всегда, когда имеет место разрыв теории и фактов. Экваториальный сегмент Атлантического океана (ЭСА) содержит структурные элементы, которые иллюстрируют этот разрыв особенно ярко. Решение актуальных задач опирается на картирование этих элементов, изучение возможных механизмов их формирования и выстраивание причинно-следственных связей между разномасштабными явлениями в геолого-геофизических данных в рамках обновленной модели.

Степень разработанности

Эффективное решение задачи интерпретации данных по ЭСА и попытки встраивания их в теорию базируется на степени изученности района. Изученность набортными маршрутными и полигонными геофизическими промерами, бурением и донным геологическим опробованием, в отличие от равномерной плотности спутниковых покрытий акватории, имеет в ЭСА «белые пятна». Некоторые районы размерами до нескольких сотен километров в международных базах данных не имеют ни одного пересечения золотым промером или сейсмопрофилированием. Именно эти районы по данным альтиметрии содержат такие элементы, как дискордантные нарушения, «кинк-банд» структуры, зоны конвергенции пассивных частей трансформных разломов и дополнительные трюги, косоориентированные разломы и цепочки подводных гор. ЭСА, в отличие от общемировой изученности, выделяется плотностью геофизических съемок, проведенных в российских экспедициях Геологического института РАН (ГИН РАН) с борта НИС «Академик Николай Страхов» и других судов с участием сотрудников Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов, выявивших внутриплитные деформации осадочного чехла. Это создает возможность получения приоритетных результатов в ЭСА. Перечисленные структурные элементы дна адаптированы в рабочую геодинамическую модель лишь частично, и многие особенности их строения и генезиса еще предстоит исследовать. Общемировая тенденция в изучении подобного рода объектов часто избегает постановки задач и поиска нетривиальных решений в условиях неприменимости упрощенных моделей.

Объект исследований

Объектом исследований является ЭСА, имеющий уникальные особенности строения дна и ограниченный с юга разломом Романш, а с севера разломом 15°20' (Зеленого Мыса). В работе на основании детальных полигонных исследований НИС «Академик Николай Страхов» рассмотрены характеристики ЭСА относительно Атлантики в целом от тройного сочленения Буве на юге до хребта Книповича на севере, поскольку ЭСА является зоной перехода южной Атлантики в северную. На региональных сейсмотомографических разрезах, геотраверсах с маршрутным геофизическим промером и потенциальных полей показаны особенности строения ЭСА и его отличия от сопредельных районов океана. Отдельно проведен анализ трансформных разломов, сегментирующих ЭСА, и их сравнение с аналогами из других частей Атлантики. По данным полигонного геофизического промера исследованы расположенные в пределах ЭСА объекты и явления, имеющие ключевое значение для понимания внутриплитных процессов: полиразломная система Сан-Паулу, осадочный чехол южной части ЭСА, постседиментационные явления и строение пассивных частей трансформных разломов, разделяющих северную и южную части ЭСА, строение зоны конвергенции разломов и формирование субмеридиональных надвиговых структур в южном обрамлении котловины Зеленого Мыса, деформационные структуры северной части возвышенности Сьерра-Леоне, внутриплитные деформации в пассивных частях разломов Марафон и Меркурий. Проведено сопоставление характеристик перечисленных объектов с данными сейсмотомографии и потенциальных полей, которые определены для всего района и равномерно отражают строение ЭСА без пробелов, характерных для маршрутных измерений.

Цели исследований

С учетом состояния проблемы, степени актуализации геодинамической модели относительно новых данных и изученности ЭСА, главная цель исследования формулируется следующим образом: построение непротиворечивой причинно-следственной цепочки природных явлений от глубинной геодинамики к внутриплитным деформациям, регистрируемым в верхней части разреза. Наличие и доступность данных различных масштабных уровней – глобальных, региональных, детальных – позволяет определить эту цель, как переход от общего к частному. Для различных масштабов и структурных уровней общая цель может быть разделена на несколько отдельных составляющих:

1. Выявление аномального глубинного состояния мантии, формирующего поверхностный структурный рисунок, не адаптированный в рабочую геодинамическую модель, поскольку аномальное строение дна отражает реологические неоднородности верхней мантии.

2. Определение возможного спектра механизмов, реализующих переход дифференцированного по глубине и латерали подвижного состояния мантии в структурный комплекс тектонических элементов, деформации коры и осадочного чехла на поверхности.

3. Делимитация ЭСА в общем структурном плане Атлантики с использованием широкого спектра типов данных (в дополнение к рельефу дна): сейсмической томографии, потенциальных полей и их трансформант, возраста фундамента, региональных геотраверсов с сопоставлением данных сейсмопрофилирования и томографии, отражающей геодинамическую подвижность.

4. Определение структурных элементов ЭСА, отличающихся от существующих тектонических интерпретаций и более соответствующих актуализированному набору данных на регион, с построением карты этих элементов.

5. Определение особенностей распределения осадочного чехла на неоднородном фундаменте с дифференцированной внутриплитной подвижностью.

6. Определение типов деформационных структур осадочного чехла по детальным сейсмическим данным как результата имплементации механизмов воздействия неоднородного глубинного состояния на структуры поверхности.

Задачи исследований

Заявленные общая и отдельные цели приводят к постановке следующих задач:

1. Обзор используемых данных, геодинамических моделей, энергетического баланса Земли, существующих проблем в расхождении рабочей геодинамической модели с накопленной фактурой, мотивация и направление поиска реалистичного решения для интерпретации современной структуры дна ЭСА, закартированной в экспедициях ГИН РАН. Решению задачи отведена **Глава 1**.

2. Обзор тектоники и геодинамики литосферы Атлантики на различных масштабных уровнях, строения осадочного чехла и деформаций экваториального сегмента, а также степени их адаптации к существующим геодинамическим моделям и дифференцированному по амплитуде и направлению горизонтальному движению плит и их фрагментов. Решению задачи отведена **Глава 2**.

Решение задач 3–5, относящихся к данным глобального масштаба, проведено в **Главе 3**.

3. Расчет латеральной и меридиональной гетерогенности Атлантики методами многомерной статистики с использованием набора геофизических покрытий, имеющих геодинамическую интерпретацию.

4. Расчет вариаций реологического состояния верхней мантии по данным сейсмотомографии (отношение скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s) как фактора, определяющего геодинамический режим, и сопоставление его с морфоструктурами дна, составом базальтов, разломными зонами, сейсмичностью и скоростями спрединга.

5. Обоснование внутриплитных вертикальных и горизонтальных движений, формирующих деформационные структуры, как явлений изостатической компенсации при плотностных изменениях и сдвигов по разрывам, сформированным в осевой зоне САХ.

Решение задач 6–9, относящихся к данным регионального масштаба, проведено в **Главе 4**.

6. Обособление ЭСА в полученных расчетах геодинамических характеристик и сопоставления данных глобальной и региональной детальности. Визуализация ЭСА в данных сейсмотомографии и анализ эволюции тектонических режимов в его обрамлении.

7. Анализ особенностей разломных и полиразломных систем ЭСА с большим латеральным смещением оси САХ, превышающим длины рифтовых сегментов.

8. Формулирование признаков волнового поля, указывающих на деформационный генезис структур на сейсмической записи. Сопоставление зон деформаций с геофизическими полями, имеющими геодинамическую интерпретацию.

9. Обоснование и построение обновленной тектонической карты ЭСА с учетом новых тектонических элементов, получаемых при анализе современной фактурной базы.

Решение задач 10–14, относящихся к детальным данным, проведено в **Главе 5**.

10. Определение фоновой и локальной компонент осадочного чехла с наложенными внутриплитными деформациями, выделяемыми по особенностям волнового поля.

11. Выделение закономерностей акустического фундамента полиразломной системы Сан-Паулу под осадочным чехлом.

12. Изучение деформаций осадочного чехла восточной пассивной части разлома Богданова, зоны конвергенции пассивных частей в районе уступа Кабо-Верде, южной части котловины Зеленого Мыса, северного обрамления возвышенности Сьерра-Леоне. Выделение возможных геодинамических режимов, при которых физически реализуемо установленное рязнообразие деформаций.

13. Выделение особенностей флюидонасыщения слабоконсолидированных осадков на сейсмических записях. Формирование причинно-следственной цепочки геологических явлений, конечным элементом которой являются аномалии акустического освещения разреза типа «газовая труба» и горизонтальные линзы акустической прозрачности.

14. Определение типов и общих закономерностей пространственного распределения деформационных структур с вертикальным подъемом блоков фундамента. Сопоставление статистических характеристик деформаций с геофизическими полями и построение возможной геодинамической схемы образования деформаций.

Новизна исследований

Новизна исследований обеспечивается в первую очередь преимущественной изученностью района маршрутным и полигонным геофизическим промером, выполненным ГИН РАН в 1985-2006 гг. в пределах ЭСА, по сравнению с материалами других исследований. Материалы экспедиций, частично опубликованные в первичных статьях при участии автора, обобщены с позиций обновленного подхода к геодинамической модели. Материал представлен как конечный элемент причинно-следственной цепочки явлений от неоднородностей глубинного реологического состояния мантии до поверхностных структур. Проведенные в работе сопоставления сделаны впервые и показывают наличие существенной гетерогенности свойств верхней мантии по данным отношения V_p/V_s , коррелируемой с поверхностными структурами. Для ЭСА проведено сопоставление зон внутриплитных деформаций с геофизическими полями, отражающими геодинамические особенности коры и верхней мантии на длинных геотравверсах, пересекающих разные морфоструктурные зоны глубоководной части океана. Построена карта тектонических элементов ЭСА по актуализированному набору геофизических данных, существующему для всей акватории. Проведен анализ внутриплитных деформаций с использованием их морфометрических характеристик и сопоставлением с геофизическими полями; сделан вывод о возможных геодинамических обстановках, в которых могли формироваться деформационные комплексы.

Теоретическая и практическая значимость

Основная значимость работы относится к решению фундаментальных задач, связанных с взаимной адаптацией новых данных и обновленной геодинамической модели. Многочисленные примеры сейсмических разрезов, приведенных в работе, и их сопоставление с другими геофизическими характеристиками показывают правильность рассмотрения литосферного пространства в блоковом и расслоенном виде, в котором фрагменты плиты имеют возможность к независимым друг от друга горизонтальным и вертикальным смещениям. В этой концепции интерпретация происхождения внутриплитных деформационных структур становится физически реалистичной и обоснованной при допущении геодинамических режимов со сдвиговой компонентой и вертикальными движениями, связанными с преобразованием и разуплотнением мантийного вещества. Главная практическая значимость работы заключается в том, что такие явления в верхней части разреза, как дегазация, современные разрывные нарушения, деформации слабоконсолидированного осадочного чехла и др. приобретают новую теоретическую базу для истолкования закономерностей их распределения и эволюции. Перечисленные явления представляют опасность для техногенной деятельности и навигации, поэтому всестороннее изучение геодинамических условий их возникновения имеет и практическое значение.

Защищаемые положения

1. Латеральные вариации геодинамического состояния верхней мантии под срединно-океаническим хребтом и котловинами Атлантического океана, определенные через отношение скоростей продольных и поперечных волн, отражают гетерогенность глубинного строения и определяют макротрещиноватость, изменение геометрии главных тектонических элементов, деформации фундамента и осадочного чехла, неоднородность горизонтальных смещений и скоростей спрединга, сейсмичность, сочетания геофизических характеристик и состав продуктов магматизма. (Глава 3)

2. В экваториальном сегменте Атлантического океана по сейсмическим данным и геофизическим полям установлены положительные вертикальные движения блоков фундамента, возникающие при серпентинизации пород верхней мантии. Происхождение внутриплитных деформаций и зон дегазации в осадочной толще связано с разуплотнением, выделением флюидов и дополнительной намагниченностью пород верхней части фундамента, неоднородным состоянием верхней мантии и макротрещиноватостью. (Глава 4)

3. За пределами Срединно-Атлантического хребта выявлены внутриплитные деформации, которые в условиях сдвигов в комбинации со сжатием и растяжением

формируют цветочные, чешуйчато-надвиговые, взбросовые и диапировые структуры, медианные хребты, штамповые складки и другие структуры, сопровождающиеся акустическим осветлением осадочной толщи в форме линз и «газовых труб» и подъемом блоков фундамента в среднем на 400 м. (Глава 5)

Структура и объем работы

Работа содержит 385 страниц, включая 167 рисунков, 9 таблиц и список литературы и данных из 337 названий. Работа состоит из введения, 5-ти глав и заключения. В 1-й главе приведен обзор используемых данных, геодинамических моделей, энергетического баланса Земли, существующих проблем во взаимном соответствии геодинамических моделей и накопленных данных. Во 2-й главе проанализировано строение объекта на разных масштабных уровнях – глобальном, региональном и детальном, и имеющиеся противоречия в адаптации новых данных к теоретической геодинамической модели. Следующие 3 главы посвящены описанию решения вышеуказанных 3-х групп задач, связанных с соответствующими уровнями детальности данных и отображаемых в них процессов: 3-я глава – описанию тектоники, геодинамики и гетерогенности по геофизическим полям Атлантики в целом; 4-я глава – особенностям ЭСА как сегмента океана, ограниченного длинными разломными системами и имеющего контрастное по сравнению с обрамлением строение, нарушенное внутриплитными деформациями; 5-я глава – описанию детальных полигонных и маршрутных промеров, фиксирующих деформационные структуры, и их сопоставлению с геофизическими данными. В заключении сформулированы наиболее важные результаты работы и даны комментарии. В конце каждой главы приведен синтез ее содержания, коротко отражающий сущность каждого подраздела.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались автором на 31, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49 и 50-м Всероссийских Тектонических совещаниях; на 16, 17, 18, 19, 20, 21 и 22-й Международных научных конференциях (Школах) по морской геологии; на 2, 3, 5, 6, 7, 9 и 10-м Рабочих совещаниях Российского отделения международного проекта InterRidge; 5, 6 и 7-м Симпозиумах им. Л.П. Зоненшайна “Тектоника литосферных плит”. Также работы докладывались на 33-м Международном геологическом конгрессе, 26-й сессии Европейского геофизического общества, конференции Гольдшмидта 2004 г. Промежуточные итоги данного исследования докладывались на конкурсных чтениях и Тектонических коллоквиумах Геологического института РАН. Автором по теме работы опубликовано самостоятельно и в соавторстве (статистика получена из elibrary.ru 13.02.2018): 66 статей по индексу РИНЦ, 47 статей по списку ВАК, 26 по списку WOS или SCOPUS. В тексте работы цитируются 46 публикаций автора. Список наиболее значимых работ состоит из 35 статей.

Используемые данные

В работе использовались данные 2, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 16, 18, 19, 22, 23-го рейсов ГИН РАН (АН СССР до 1991 г.) проведенных на НИС «Академик Николай Страхов». Автор принимал участие в большинстве этих экспедиций. Также использовались данные 12-го рейса НИС «Академик Борис Петров» (ГЕОХИ АН СССР). Автор использовал в работе данные сейсмопрофилирования, многолучевого эхолотирования и высокочастотного профилирования, полученные в перечисленных экспедициях. В списке данных и литературы перечислены рейсовые отчеты, в которых приведена первичная интерпретация полученных экспедиционных данных. Кроме этого, использовались открытые международные базы данных по альтиметрии (Sandwell, Smith, 2009), рельефу (GEBCO30", ETOPO5), сейсмичности (ANSS, NORSAR), глубоководному бурению (DSDP-ODP), геофизическому промеру (GEODAS), геохимии (GEOROC), векторам смещений плит (GPS), донному опробованию осадков (LDEO), аномальному магнитному полю (Maus et al., 2009) и сейсмомографии (Grand et al., 1997; Van der Hilst et al., 1997).

Поддержка работы

В течение многих лет работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ №№ 97-05-65359, 98-05-64212, 01-05-64168, 04-05-64905, 06-05-65223, 11-05-00628, 13-05-12076, 15-05-

05888. Работа выполнялась в рамках государственных тем: «Оценка связи рельефа дна Атлантического и запада Северного Ледовитого океанов, деформаций осадочного чехла, процессов дегазации и опасных геологических явлений с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии» (№ 0135-2014-0015), «Опасные геологические процессы в Мировом океане: связь с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии и новейшими движениями в океане» (№ 0135-2016-0013); Программы Президиума РАН №15 «Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики».

Благодарности

Автор всегда будет помнить ученых, под чьим руководством шло его становление и начинались первые шаги в морских геолого-геофизических экспедициях – Л.В. Дмитриева и Г.Б. Удинцева. Автор выражает глубокую признательность коллегам, постоянное общение и дискуссии с которыми явились неотъемлемой частью научной жизни и источником идей – А.О. Мазаровичу, Ю.Г. Леонову, В.Н. Ефимову, В.Г. Гайнанову, Л.Р. Мерклину, В.В. Ярмолуку, Ю.Н. Авсюку, Г.В. Агаповой, Н.П. Чамову, М.Д. Хуторскому, Б.Г. Поляку. Научным руководителем большинства экспедиций, материалы которых использованы в работе, являлся Ю.М. Пушаровский.

Автор благодарен за наиболее продуктивное обсуждение экспедиционных данных и рабочей геодинамической теории, имевшее место в разное время: Ю.Н. Разницыну, С.Г. Сколотневу, А.А. Пейве, Н.Н. Турко, Э. Бонатти, М. Лиджи, Л. Гасперини, А.А. Бульчеву, С.А. Силантьеву, Е.П. Дубинину, Н.М. Суцевской, Г.Н. Савельевой, М.К. Иванову, О.В. Левченко, Ю.П. Непрочнову, М.Ю. Токареву, Л.И. Лобковскому, В.Г. Трифонову, А.В. Хортову, А.В. Соловьеву, С.Ю. Колодяжному, А.С. Перфильеву, А.Ф. Бересневу, Ю.А. Воложу, К.О. Добролюбовой, А.А. Разумовскому, А.В. Кольцовой.

В рейсах НИС «Академик Николай Страхов» автор работал в разное время в период с 1988 г. по 2013 г. вместе с А.С. Абрамовой, С.Б. Аверьяновым, М.П. Антиповым, Г.Г. Ахмановым, В.Р. Ахмедзяновым, Ю.Е. Барамыковым, И.А. Бересневым, Дж. Бортолуцци, Д.А. Гилод, В.М. Голодом, П.А. Гладких, Я.Е. Губановой, Б.Я. Гуревичем, Л.Г. Домарацкой, А.Е. Ескиным, А.В. Ермаковым, С.А. Ерофеевым, П.Н. Ефимовым, В.Н. Ефремовым, А.В. Зайончекон, Ю.А. Зарайской, А.С. Зверевым, М.В. Захаровым, Н. Зиттелини, А.И. Иоффе, Н.Д. Калинин, Г. Каррарой, Л.И. Коганом, В.Ю. Колобовым, Д.В. Коростом, А.В. Коханом, К.В. Кривошей, В.Ю. Лаврушиным, Э. Лодолю, Ю.Я. Маликиной, Е.А. Морозом, А.Д. Мутовкиным, О.И. Окиной, Д.М. Ольшанецким, А.Н. Перцевым, В.В. Петровой, В.М. Побржинским, А.С. Пономаревым, В.А. Равенковым, Э.П. Радионовой, В.П. Расторгуевым, А.А. Рихтером, В.Н. Семеновым, Г.Н. Стрельниковой, В.А. Симоновым, Е.А. Сухих, В.Г. Удинцевым, П. Фабретти, Дж. Холлом, Н.В. Цукановым, А.А. Черных, А.М. Чиликовым, А. Чиприани, В.В. Шиловым, А.А. Шматковым, Ф. Шуто, Р. Экиньяном, К.П. Ямпольским.

Во всех рейсах работа научного состава обеспечивалась самоотверженным трудом экипажа НИС «Академик Николай Страхов», низкий поклон которому от всех ученых, чьи достижения основаны на повседневном труде моряков – от капитана до палубной команды. Отдельная благодарность службе НТС и В.В. Велинскому.

Автор особо признателен своим родным и близким за поддержку и долготерпение.

ГЛАВА 1. Обзор данных, геодинамических моделей, энергетического баланса и существующих проблем

В главе приведено обоснование проведенного в ЭСА исследования: от обзора используемых данных и существующих проблем, в стыковке рабочей геодинамической модели с накопленной фактурой, энергетического баланса Земли, до мотивации и направления поиска реалистичной геодинамической модели при интерпретации современной структуры дна ЭСА, зарисованной в экспедициях ГИН РАН.

1.1. Обзор компиляции используемых данных

Экспедиционные данные формируются по системе маршрутных и полигонных промеров (рис.1) и обладают неравномерным характером покрытия пространства. Наличие

международных баз данных дистанционного зондирования со спутников, а также других источников, позволяет получить фоновую топоснову, с помощью которой заполняются пустоты между набортными съемками с научных судов. Априорная информация состоит из гравитационного поля, аномального магнитного поля, их трансформант, предсказанного рельефа, теплового потока, сейсмичности, сейсмической томографии, результатов донного пробоотбора и др. Оперативное манипулирование большим объемом геолого-геофизических данных с пространственной привязкой в среде ArcGIS и сейсмоакустическими данными в среде RadExPro позволяет рассматривать любой объект и любой вид данных в контексте накопленной «базы знаний» и получать объективную его оценку. Наличие такой базы в рабочем пространстве исследователя позволяет изучать объект с «более открытыми глазами» как на этапе планирования работ, так и при анализе полученных новых данных. Необходимость использования средств сбора пространственных баз данных, интегрирующих разные типы в одной оболочке, диктуется также мультидисциплинарным характером фундаментальных задач. Изученность, собранная ГИН РАН в ЭСА (рис.1) с 1985 по 2006 гг., имеет по сравнению с международными и другими исследованиями значительно большую плотность. Это обеспечивает возможность получения приоритетных по научной новизне результатов в данном районе

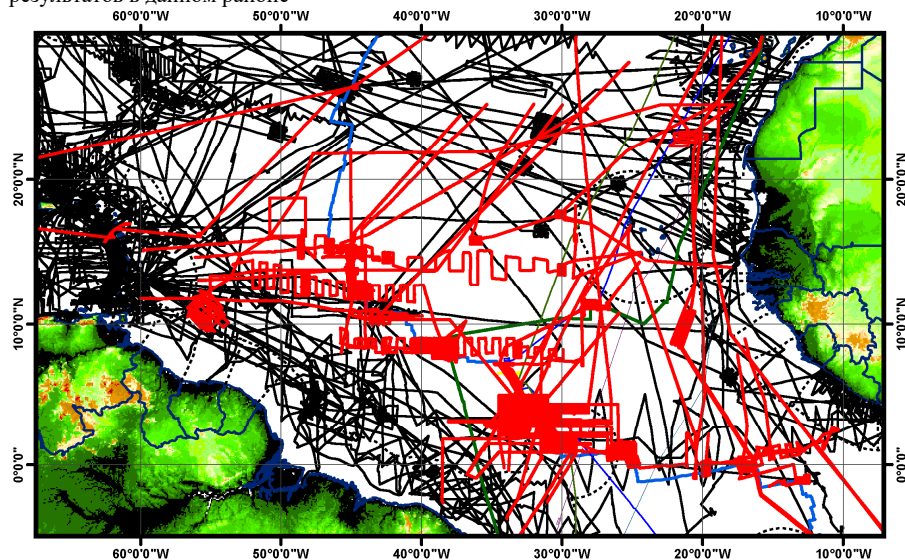


Рис.1. Схема изученности экваториального сегмента Атлантики полигонными и маршрутными геофизическими промерами (только сеймика и сейсмоакустика) по данным открытого доступа (GEODAS, 2010) – черные линии, и данным Геологического института РАН на НИС «Академик Николай Стрaхов» – красные линии.

1.2. Тектоника плит и факты, необъяснимые в ее рамках

Адаптация геодинамической модели тектоники плит к накопленному фактическому материалу приводит к частичному изменению и дополнению ее основных положений (Хаин, Ломизе, 2005). Это относится в первую очередь к постулату о жесткости плит и приводит к рассмотрению литосферы как объекта с блоковым и тектонически расслоенным строением (Тектоническая расслоенность литосферы, 1980). В ЭСА и его обрамлении (рис.2) кроме внутриплитных деформаций осадочного чехла на удалении от САХ, обусловленных вертикальными движениями отдельных блоков фундамента и неоднородной горизонтальной компонентой движения, наблюдаются следующие явления:

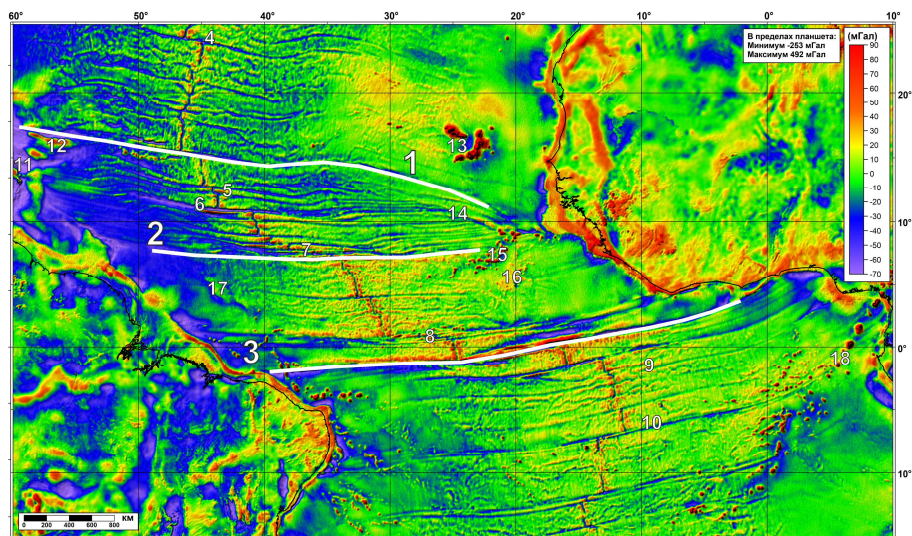


Рис.2. Аномалии силы тяжести в свободном воздухе по данным спутниковой альтиметрии (Sandwell, Smith, 2009) в ЭСА и его обрамлении. Демаркационные разломы: 1 – разлом $15^{\circ}20'$ (Зеленого Мыса), 2 – разлом $7^{\circ}10'$ (Богданова), 3 – разлом Романш. Другие объекты: 4 – разлом Кейн, 5 – сдвоенная система разломов Марафон и Меркурий, 6 – разлом Вима, 7 – полиразломная система Долдрамс–Вернадского– $7^{\circ}24'$ –Богданова– $6^{\circ}52'$, 8 – полиразломная система Сан-Паулу, 9 – разлом Шарко, 10 – разлом Вознесения, 11 – Антильская дуга, 12 – хребет Барракуда, 13 – острова Зеленого Мыса, 14 – уступ Кабо-Верде, 15 – горы Батиметристов, 16 – возвышенность Сьерра-Леоне, 17 – возвышенность Сеара, 18 – Камерунская линия вулканов.

– конвергенция пассивных частей трансформных разломов и увеличение их количества в ЭСА к востоку от САХ, проявленные в данных спутниковой альтиметрии;

– дискордантные зоны, не совпадающие по своей ориентации с трансформными разломами;

– дискретность петрологических параметров базальтового магматизма вдоль оси САХ, представленная двумя принципиально разными базальтовыми ассоциациями – спрединговой и плюмовой, характеризующимися резко контрастным проявлением геодинамических процессов разного уровня, что фиксируется формированием специфических структур хребта, его сегментацией, и отражается в геофизических полях (Дмитриев и др., 1999);

– наличие косо ориентированных по отношению к главным структурным элементам дна Атлантики разломных зон и приуроченных к ним внутриплитных землетрясений (Мазарович, Соколов, 2002);

– наличие анизотропии деформаций осадочного чехла котловин (Мазарович, Соколов, 2004) с максимальной интенсивностью деформаций на субмеридиональных разрезах;

– субширотные зоны, расположенные по обе стороны от САХ, в которых устойчивым является контрастное сочетание повышенных значений аномалии Буге и пониженных значений изостатической аномалии, подобное преддуговым областям (Sokolov et al., 2008);

– отсутствие по данным сейсмотомографии глубоких корней САХ и наличие аномалий типа «плюм» и их локальных ответвлений (рис.3).

Это указывает на то, что механизм тектогенеза в зоне САХ и котловинах должен учитывать наблюдаемое гетерогенное строение литосферы и мантии, которое отличается от

стандартных схем. Перечисленные факты плохо совместимы даже с модифицированной моделью. Это определяет круг новых фундаментальных задач, в частности, исследование структуры, генезиса и других свойств внутриплитных деформаций, имеющих место в глубоководных котловинах на удалении от границ плит и являющихся индикаторами блокового строения литосферы. Эта тема имеет фундаментальное значение для разработки непротиворечивой геодинамической модели, претендующей на аккомодацию новых фактов в своей рамке.

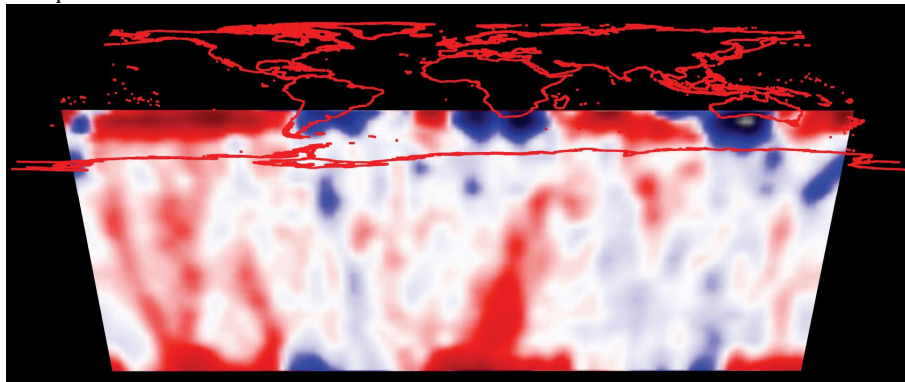


Рис.3. Вертикальный срез δV модифицированной сейсмотомографической модели NGRAND (Becker, Boschi, 2001) по S-волнам от кровли мантии до подошвы на широте 27° ю.ш.

1.3. Мотивация поиска альтернативной геодинамической модели

Теоретические механизмы, реализующие движение плит в Атлантике, имеют недостаточное обоснование. Затягивание субдуцируемой плиты (slab pull) в мантию маловероятно в этом океане, поскольку, за исключением сравнительно небольших дуговых систем морей Скоша и Карибского, отсутствуют зоны субдукции с наклоном от САХ, затягивание в которые могло бы поддерживать процесс раскрытия. Перенос литосферы астеносферным течением должен формировать хорошо распознаваемый динамический рельеф, увязанный с САХ. Но по данным (Kaban et al., 2003) динамический рельеф, формирующий изостатические аномалии, увязан не с системой САХ, а с системой локализованных областей восходящих плюмов. Это создает неопределенность в модели океанического структурообразования за счет одного фактора тепловой машины и заставляет предполагать наличие дополнительных. Свойства дополнительных факторов и механизмов могут быть получены в результате анализа закартированных структур, не вписанных в модель. Определение механизмов не является окончательным, но речь идет об объемных силах, воздействующих дифференцированно по направлению и амплитуде на блоковую и расслоенную литосферу с формированием наблюдаемых внутриплитных деформационных явлений и тектонических нарушений. Детальное изучение этих структур является основой для решения поставленных задач о механизмах тектогенеза.

1.4. Баланс выделения и расхода энергии в Земле и тектонический «остаток»

Оценка баланса энерговыделения и энергозатрат в теле Земли имеет значение $\sim 8 \times 10^{13}$ Вт и в целом сходится с точностью от 10 до 20 %. Вариации выделения энергии по любому из главных процессов (гравитационная аккреция, радиогенный разогрев, приливной разогрев и торможение) (Сорохтин, Ушаков, 1993) значительно превосходят мощность, необходимую для реализации тектонических процессов: перемещения плит по поверхности Земли с учетом трения, горообразования, разломообразования, деформаций и т.д. (Гогель, 1978). Энергетическая реализуемость этих процессов является физически обоснованной, а главные

проблемы состоят в исследовании механизмов передачи энергии между блоками расслоенных плит, участвующих в тектонических процессах.

1.5. Обзор количественных глобальных геодинамических моделей

Данный раздел содержит обзор эмпирических наблюдений и геодинамических моделей, наиболее значимых для формирования современных взглядов на тектонику океанов с учетом актуализированной фактурной базы. Особое внимание уделено возможности дифференцированного по глубине, амплитуде и направлению воздействия на блоки литосферы, приводящего к формированию внутриплитных структур, изучение которых проводится методами набортной съемки рельефа дна и верхней части осадочного разреза. В обзоре перечислены: тектоника плит с тепловой машиной конвекции в качестве механизма, гипотезы с переменным радиусом Земли, эффект изостатического выравнивания и силы, выводящие блоки литосферы из состояния равновесия, геодинамические процессы, выявленные сейсмической томографией, исследования тектонической расслоенности литосферы, гравитационные процессы, планетарная система макротрещиноватости. Особо отмечен вклад мобилизма в подход к сбору фактического материала, являющегося фундаментом современной модели. Приведено краткое описание моделей, аппроксимирующих инструментальные наблюдения, и моделей, опирающихся на прямые расчеты параметров из исходных физических условий и законов (причинно-следственные), а также моделей с космическим фактором.

Тектоническая расслоенность литосферы была определена открытием таких явлений, как перемещение близповерхностных геологических масс на большие расстояния: до сотен километров при формировании литопластин, сдвигов, надвигов и тектонических покровов с образованием внутрикоровых чешуйчатых структур, и до тысяч километров в процессе спрединга в зонах СОХ. Расслоенность является результатом дифференцированного субгоризонтального смещения масс (Лукьянов, 1980), амплитуда которого увеличивается при приближении к поверхности. Это указывает на фактор тектогенеза с тангенциальной компонентой, действующей в любой области тектоносферы аналогично объемным силам (например, гравитационным).

1.6. Обзор ротационных механизмов геодинамики

Ротационный механизм геодинамики описывает эффекты, связанные с вариацией параметров вращения сфероида – угловой скорости и положения оси вращения. Они могут инициировать в теле Земли и на ее поверхности напряжения, деформации и перемещения крупных блоков коры и литосферы, которые имеют циклический характер (Авсюк, 2001) и различные тектонические последствия: инверсия глобальных полей сжатия и растяжения в пространстве в зависимости от замедления или ускорения вращения (Долицкий, 1985); появление зон максимальной тектонической нестабильности около широт $\pm 45^\circ$ (Каримов, Усманов, 2007), подтверждаемой данными GPS; проскальзывание оболочек Земли с разными моментами инерции друг относительно друга при изменении режима вращения (Ricard et al., 1991; Филатьев, 2007; Оровецкий, Кобелев, 2006); смещение масс в меридиональном направлении к экватору и широтном параллельно экватору на вращающемся сфероиде (Ахвердиев, 2008); проскальзывание оболочек при действии закона сохранения момента количества движения Земли M_0 , разделенной на оболочки (Тяпкин, Довбнич, 2009).

ГЛАВА 2. Обзор тектоники и геодинамики Атлантики, строения осадочного чехла и деформаций экваториального сегмента

В главе приведен обзор строения Атлантики в целом и ЭСА на разных масштабных уровнях – глобальном, региональном и детальном, и имеющихся противоречий в адаптации новых данных к геодинамической модели.

2.1. Обзор тектоно-геодинамических взглядов на литосферу Атлантики в целом (глобальный уровень)

Основная концентрация исследований в Атлантике присутствует либо вдоль шельфовых зон и континентального склона по причинам хозяйственной целесообразности и

поисков энергоресурсов, либо вдоль САХ, как объектов, где происходит формирование современной океанической коры и ее спрединг от осевой зоны к периферии океана. Около 50% поверхности Земли, приходящейся на абиссальные котловины, выпадает из круга объектов с мотивированными научными задачами. Имеющиеся факты деформационных внутриплитных структур, полученные, в том числе в экспедициях ГИН РАН, не полностью вписаны в модель, согласно которой на пространстве от САХ до пассивной (или активной) окраины океана происходит, в основном остывание литосферы и накопление осадочного чехла. Массивы накопленных данных (рельеф, потенциальные поля, сейсмичность, тепловой поток, изученность глубинной сейсморазведкой консолидированной коры и верхней мантии, а также осадочного чехла сейсмоакустикой, сейсмотомография, данные донного опробования) позволяют обосновать следующее: гипотезу дрейфа континентов, рифтовую природу САХ, формирование асейсмичных поднятий, роль донных турбидитных и контурных течений в осадконакоплении, наличие астеносферного слоя с пониженной вязкостью, сегментацию Атлантики на области с разновозрастным стартом спрединга, наличие увеличенной мощности коры в зонах высокопродуктивного магматизма, выделение зон абиссальных холмов; трассировку крупных сдвиговых зон за пределы акватории океана, разделение осадочного чехла на датируемые бурением комплексы; обнаружение значительных вариаций геолого-геофизических параметров в меридиональном направлении; выявление роли серпентинизации пород верхней мантии в формировании аномального магнитного поля (АМП) при остывании литосферы, блоковое и расслоенное строение зоны САХ и абиссальных котловин; обнаружение повышенного уровня теплового потока и мощности коры в более молодых сегментах океана.

2.2. Обзор данных по переходному экваториальному сегменту Атлантики (региональный уровень)

В экваториальной Атлантике по разнице строения дна между демаркационными разломами выделяется зона к востоку и западу от САХ и между экватором и 25° с.ш. (см. рис.2), которая по степени экспедиционной изученности по сравнению с другими районами близка к белому пятну (см. рис.1). Данные ГИН РАН в ЭСА показывают несоответствие реальности общепринятой модели формирования осадочного слоя в абиссальных частях Атлантики и указывают на влияние дополнительных факторов тектогенеза на структурный план в условиях расслоенного и блокового строения литосферы. В 1960-е и 1970-е гг. проблемы внутриплитных деформаций в Атлантике практически не обсуждались, несмотря на фактический материал. Отмечалось только, что деформации возникают при остывании литосферы на флангах САХ либо при воздействии напряжений сжатия перед глубоководными желобами. В целом, установлено закономерное уменьшение мощности осадков при удалении от шельфа с переходом в дискретно-гнездовое их распределение в неровностях акустического фундамента с формированием сейсмокомплексов заполнения. В 1980-е гг. советскими геофизиками были обнаружены множественные проявления внутриплитных деформаций осадочного чехла в пределах Анголо-Бразильского геотраверса с характеристиками, отражающими асимметричное относительно САХ строение литосферы (Зверев и др., 1988; Разницын, Пилипенко, 1997). Также установлена обратная корреляция скоростей спрединга и интенсивности процессов серпентинизации с формированием дополнительной компоненты АМП и деформаций консолидированной коры и осадочного слоя (Астафурова и др., 1996). Обнаружены различия в скоростях спрединга в пределах разновозрастных зон, превышающие 100% (Машенков и др., 1992). Это подтверждает блоковое строение океанической литосферы с независимым и разноскоростным движением, которое обязано формировать внутриплитные сдвиговые деформации. Кроме этого, вдоль пассивных частей трансформных разломов отмечены вертикальные движения обоих знаков значительной амплитуды (Gasperini et al., 1997).

2.3. Обзор данных по деформациям осадочного чехла Атлантики (детальный уровень)

Деформации осадочного чехла глубоководной части Атлантики условно можно разделить на две группы: объяснимые рабочей геодинамической моделью и необъяснимые.

К первой группе относятся: наклоненные к САХ рефлекторы, сформированные в начальной стадии раскола континента и имеющие выполаживание плоскости сместителя в субмеридиональном и субширотном направлениях; малоамплитудные наклоны рефлекторов и сбросы на флангах САХ, связанные с деформациями остывания; сколы, возникающие в бортах трансформных разломов в транстензионных или транспрессионных условиях. Ко второй группе относятся взбросы с субмеридиональной вергентностью; сдвиговые деформации в пассивных частях трансформных разломов и в пределах котловины параллельно пассивным частям; складчатость поперечного изгиба (штамповая) за пределами флангов САХ; складчатость продольного изгиба (общего смятия). К числу явлений второй группы следует также отнести: акустическое субгоризонтальное осветление записи, «облекающее» кровлю акустического фундамента; проявления узких вертикальных зон акустического осветления; выделение локальных амплитудных аномалий, привязанных к вышеупомянутым типам аномалий поля и выступам фундамента (рис.4). Основной интерпретацией зон осветления любой формы является флюидонасыщенность. В абиссальных зонах Атлантики, кроме разнонаправленных разломов и флексурных изгибов, наблюдаются пликативные деформации и структуры протыкания. Котловины могут быть зонами как субширотного, так и субмеридионального сжатия (или торошения).

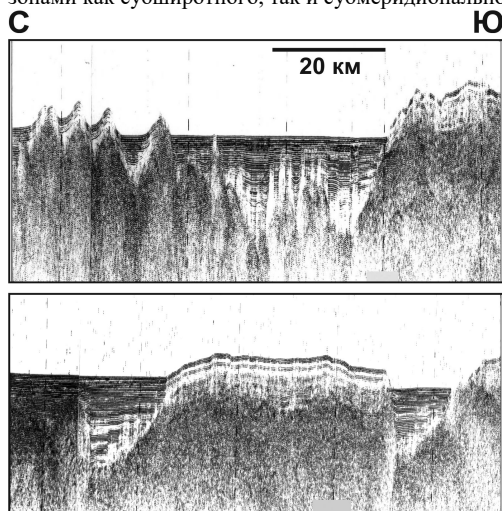


Рис.4. Примеры записи непрерывного сейсмического профилирования (НСП), иллюстрирующие деформации осадочного чехла, связанные с вертикальным подъемом блоков фундамента (штамповая складчатость), формированием чешуйчато-надвиговых структур, сдвиговых деформаций в пассивных частях трансформных разломов, структур протыкания и флюидным режимом, формирующем осветления сейсмической записи (9-й рейс НИС «Академик Николай Страхов», 1989 г.) (Соколов, Мазарович, 2009).

ГЛАВА 3. Тектоника и геодинамика литосферы Атлантики по новым данным и подходам (без активных окраинных фрагментов)

3.1. Общие понятия и определения

Расширение количества доступных баз геолого-геофизических данных и их качества по детальности и полноте покрытия пространства с одной стороны повышают объективность анализа, с другой стороны усложняют их совместный пространственный анализ и сопоставление. Это привело к росту использования в геологии методов многомерной статистики, в частности кластерного анализа. Наличие нескольких параметров (10 и более), имеющих геодинамическую интерпретацию как описание геометрии объекта (в данном случае литосферы), параметров его движения и энерговыделения, затрудняет традиционное сопоставление данных в общей топоснове и заставляет искать устойчивые сочетания и области их распространения при помощи новых методов анализа. Эти методы позволяют выявить гетерогенность строения литосферы, которая проявляется в сочетании значений разных параметров, имеющих стабильное распространение на больших территориях, и не коррелировать отдельные пиковые значения.

3.2. Тектонический и геодинамический смысл данных

Анализ геодинамики и гетерогенного строения литосферы Атлантики был проведен по следующим данным: рельеф дна, мощность осадочного чехла, аномалии Буге, сейсмотомография по поверхностным, продольным и поперечным волнам, тепловой поток, изостатические аномалии, АМП и плотность суммарного сейсмического момента. Эти параметры в соответствии с определением геодинамики, данным в (Хайн, Ломизе, 1995), описывают структурные характеристики литосферы, ее петрофизические свойства, выделение энергии и движение блоков, но не напрямую, а в виде результатов движения, выраженных в структуре. Поскольку важнейшие параметры геодинамики, доступные для инструментальных измерений на суше, недоступны для большей части океана, приходится ограничиваться тем, что некоторые параметры отражают движение в опосредованном виде.

3.3. Методика многомерной обработки

Методика кластерного анализа 10 параметров, покрывающих Атлантический океан вместе с пассивными окраинами (кроме конвергентных зон моря Скоша и Антильской дуги) методом *k*-средних состоит в поиске устойчивых сочетаний этих параметров в направлении увеличения числа сочетаний. Анализ прекращается при начале дробления пространства на зоны, в которых значения параметров в сочетаниях отличаются на малые величины, сопоставимые со среднеквадратичным отклонением по каждому параметру. Как правило, это состояние возникает лавинообразно.

3.4. Интерпретация результатов тектоногеодинамического районирования Атлантики

Площадное районирование литосферы Атлантического океана методом *k*-средних классифицирует регион на 4 группы кластеров (всего 15 кластерных сочетаний параметров), которые не могут быть выделены визуально по какому-либо параметру в отдельности или в их ограниченной комбинации (рис.5). Полученные группы обладают геологически обоснованными особенностями:

1 – группа САХ (7 кластеров – 2, 5, 7, 10, 11, 8, 14), показывающая существенную неоднородность геодинамических условий вдоль простирания хребта и его флангов (до ~300 км);

2 – группа глубоководных котловин (2 кластера – 6, 12), показывающая характеристики абиссальных областей и некоторых переходных зон;

3 – группа континентальных окраин (4 кластера – 4, 9, 13, 15), показывающая дифференциацию литосферы в области пассивной окраины;

4 – группа наложенных явлений (2 кластера – 1, 3), характеризующая преимущественно субширотные зоны, пересекающие предыдущие три.

Неоднородность геодинамических условий вдоль простирания хребта представлена чередованием «горячих» и «холодных» блоков, особенно контрастно различающихся по тепловому потоку, суммарному выделившемуся сейсмическому моменту, гравитационной аномалии Буге, отражающей в данном контексте продуктивность магматизма, и томографии по поперечным волнам, отражающей степень частичного плавления мантии и наличие изолированных ветвей плюмов, уходящих глубоко в мантию (до 700 км и более). Выделенные зоны хорошо согласуются с литературными данными о дискретности Р-Т условий формирования базальтовых расплавов срединных хребтов, имеющей место на малых расстояниях. Это свидетельствует о факте суперпозиции двух независимых источников аккреции вещества океанической коры и ее дальнейшей динамики в зоне САХ. Этим источникам соответствуют две геодинамические обстановки: фоновая – спрединг в условиях медленного растяжения, проявленный на всей длине САХ спрединговой ассоциацией базальтов, и локальные наложения на него ответвлений суперплюма, формирующие проявления базальтов плюмовой ассоциации. На фланговых частях САХ выделяются зоны кластеров, имеющие северо-западную ориентацию по отношению к основным структурным элементам Атлантики, пересекающие котловины, САХ, а также впадающиеся на континентальные окраины.

Наложенные субширотные явления вне САХ представляют собой зоны, сформированные импульсами магматизма повышенной продуктивности (в ряде случаев активными в современную эпоху), аналогичные современным проявлениям плюмов под САХ, образовавшие из-за спрединга псевдосимметричные формы по обе стороны от хребта. Прослеживание следов этих явлений по геофизическим параметрам показывает, что в целом плотность подобных проявлений в литосфере Атлантики неизменна с момента ее раскрытия.

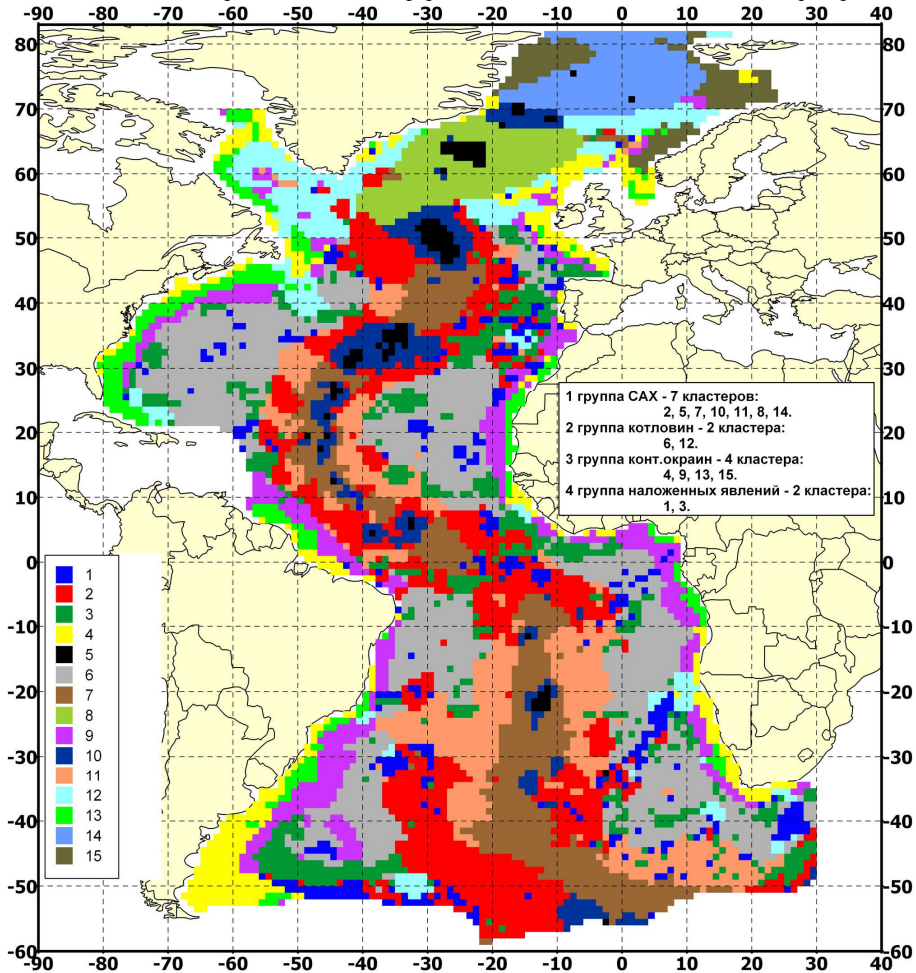


Рис.5. Геодинамическое районирование Атлантического океана по результатам кластерного анализа и группы кластеров по главным структурным зонам.

Другой тип субширотных наложенных явлений представлен зонами, в которых устойчивым является контрастное сочетание повышенных значений аномалии Буге и пониженных значений изостатической аномалии, подобное которому встречается в преддуговых областях Тихого океана. Данный кластерный тип коррелирует в пространстве с аномальной геохимией базальтов, конвергентными зонами пассивных частей трансформных разломов и анизотропией осадочного чехла котловин.

3.5. Сопоставление новых данных с известными ранее представлениями

Основная часть кластерных сочетаний совместима с классической геодинамической моделью тектоники плит и формирует представление о площадном распределении неоднородностей литосферы. Нетривиальным результатом является гетерогенность геодинамических условий вдоль оси САХ, выраженная в вариациях кластерных сочетаний, не совпадающих с разнообразием отображения САХ ни в каком из отдельных использованных параметров. В меридиональном направлении чередуются: «горячие» и «холодные» по данным томографии мантийные блоки, области различных средних значений теплового потока и суммарного сейсмического момента, аномалии Буге, имеющие сильную вариацию вдоль осевого минимума и отражающие продуктивность магматизма и мощность коры рифтовой зоны. Ветви суперплюмов формируют изолированные кластеры, наложенные на кластеры котловин и осевой зоны. Это показывает, что вариации составов базальтов как срединных хребтов, так и островных систем, отражающих Р-Т условия формирования магмы (Дмитриев и др., 2006), находят непосредственное выражение в комплексном сочетании значений геофизических полей.

Другим результатом, полученным по кластерной классификации, является выделение границ между кластерами с северо-западной ориентацией по отношению к главным структурным элементам. Этот азимут кривой ориентации совпадает с азимутом множества мелких форм, выявленных в результате многолучевого картирования океанского дна, а также в результате картирования деформаций осадочного чехла сейсмопрофилированием. Нетривиальным результатом является сочетание параметров кластера 3, свойственное преддуговым зонам. Субширотная ориентация зон этого кластера предполагает наличие субмеридиональной компоненты движения, что никак не объясняется рабочей геодинамической моделью. Данный кластер в частности образует широтную зону между 22° и 28° с.ш. в районе работ Канаро-Багамского геотраверса (Глубинное..., 1998), где отмечается наличие деформаций осадочного чехла и наклонных рефлекторов в консолидированной коре, имеющих субмеридиональный азимут падения.

3.6. Сейсмотомографическая основа для корреляции вдольосевых характеристик САХ

Для сравнения площадного распределения неоднородностей литосферы с вертикальным была определена и опробована простая методика расчета атрибута $\delta(V_P/V_S)$ по моделям распределения вариаций скоростей δV_S и δV_P в мантии, основанная на восстановлении абсолютных значений скоростей из вариаций с использованием скоростной модели первого приближения PREM (Соколов, 2014). Данный атрибут зависит от коэффициента Пуассона среды и приобретает максимумы при его приближении к 0.5 (состояние жидкости). Интерпретация этих максимумов состоит во флюидонасыщенности среды и ее способности течь (реология), что для мантии означает повышенную степень частичного плавления, прогретое состояние или наличие глубинного флюида. Поскольку аномалии атрибута фиксируются в геодинамически активных зонах, можно условно определить атрибут как показатель «подвижности» недр. Также уместна термальность терминология, согласно которой эти области называются «горячими», а зоны с минимумами – «холодными».

На разрезе атрибута $\delta(V_P/V_S)$ и S-волн вдоль САХ в мантии над уровнем ~700 км наблюдаются линзы пониженной подвижности мощностью 200-300 км в районе разломов Романш, Чарли Гиббса и зоны хребта Книповича, и зоны резкого усиления отрицательных аномалий между разломами Романш и Зеленого Мыса (рис.6). С этими областями «холодной» мантии хорошо коррелируется геохимическая сегментация САХ. При сравнении положения этих зон с конфигурацией САХ в плане видно, что они находятся около разломных зон, формирующих главную сегментацию Атлантического океана и его перехода к Арктике с большой длиной активной части трансформных разломов (от 180 до 1050 км) с левосдвиговой морфологией и большим субширотным смещением оси САХ (за исключением южной Атлантики). Отличие этих объектов в северной Атлантике состоит в наличии базальтового магматизма типа TOP-Na, который представляет наиболее обедненные

базальты с высоким содержанием натрия, самой низкой степенью плавления и продуктивностью (Дмитриев и др., 2006). Он распространен в пределах участков САХ с медленным и ультрамедленным спредингом и хорошо коррелируется с отрицательными аномалиями подвижности.

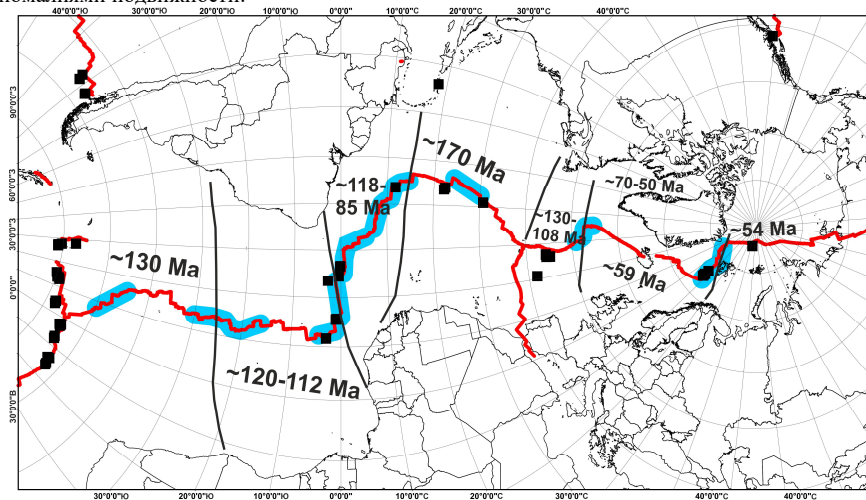


Рис. 6. Положение «холодных» блоков верхней мантии на плане (голубые полосы под осью САХ) по расчетам атрибута $\delta(V_P/V_S)$ вдоль САХ по данным (Соколов, 2014) и положение базальтов типа TOP-Na (черные квадраты) по данным (Дмитриев и др., 2006). Цифрами показан возраст начала спрединговых процессов (Müller et al., 2008) в разных сегментах Атлантики. Красная линия – ось САХ, черные линии – границы сегментов.

3.7. Статистические характеристики структурных элементов вдоль САХ

Кросс-корреляция длин активных структурных элементов зоны САХ – сегментов хребта и трансформных зон смещения – показывает, что основная частота событий на кросс-корреляции сосредоточена в самом коротком интервале сегментов САХ от 20 до 55 км и равномерно распределена по диапазону длин активных частей трансформных разломов 10-80 км. Сегменты САХ с этими параметрами формируют в экваториальной Атлантике компактно расположенные цепочки, которые представляют собой полиразломные трансформные системы. В них короткий шаг по сегменту САХ сочетается с в 2-3 раза более длинным шагом в зонах смещения, и это сочетание периодически повторяется. Статистические характеристики позволяют выделить эти системы в отдельный тип трансформных нарушений. Полиразломные и сдвоенные трансформные системы встречаются между сегментами, где ось САХ приобретает максимальное субширотное смещение, и где в верхней мантии по данным сейсмографии наблюдаются «холодные» блоки. С проявлением трансформных систем такого вида также связана повышенная плотность общих длин разломов, включая пассивные части, и по данным сейсмичности и потенциальных полей наличие зон с субмеридиональной компонентой сжатия, приводящей к возникновению транспрессионного режима вдоль разломов. Средний шаг пространственных «пульсаций» этих параметров составляет около 12° (1320 км).

3.8. Корреляция геолого-геофизических параметров САХ с осевым томографическим разрезом

Гравитационные аномалии в свободном воздухе и аномалии Буге, сейсмичность, длины трансформных разломов, типы магматизма и кластерные сочетания геолого-геофизических параметров образуют систему фактов, которая вдоль оси САХ имеет непротиворечивую

геодинамическую интерпретацию в терминах взаимодействия «холодных» участков верхней мантии с относительно жесткой литосферой с одной стороны, и прогретых и подвижных – с другой. Геодинамическое состояние верхней мантии по сейсмотомографическим данным, определяет в целом наблюдаемое распределение сопоставляемых на поверхности вдоль оси САХ параметров. Наличие субмеридиональной компоненты движения по данным GPS объясняет формирование кластерного сочетания геолого-геофизических параметров, свойственного преддуговым зонам (см. рис.5), а в сочетании с субширотной компонентой – его пространственную синхронизацию с зонами повышенной макротрещиноватости с активацией напряжений сжатия и соответствующих деформаций. Можно предположить, что текущим геодинамическим режимом вдоль разломных зон, разграничивающих сегменты Атлантики, является транспрессия при сохранении режима растяжения вдоль САХ. Это позволяет определить указанные области как зоны активации напряжений и деформаций, сопряженные с наличием субмеридиональных надвиговых структур, выявленных сейсморазведкой, и с новейшими деформациями осадочного чехла, имеющими анизотропию структурной ориентации (см. главу 5) (Мазарович, Соколов, 2004).

Наряду с фоновым тектогенезом, формирующим структуры растяжения САХ и сдвига вдоль активных частей разломов, обнаруживаются признаки действия дополнительного источника тектогенеза. Таким дополнительным источником может быть субгоризонтальное вдольосевое растекание в верхах мантии вещества плюмов, а также действие объемных сил с тангенциальной компонентой. Их суперпозиция формирует нетипичную для классической теории компоненту движения, хотя существенный вклад в последнюю может быть сделан ответвлениями суперплюмов и их латеральными смещениями в верхней мантии. Учитывая блоковый и расслоенный характер строения коры и верхней мантии, действие тангенциальных приводит к перемещениям блоков внутри крупных плит и разнообразным тектоническим деформациям на внутриплитном пространстве, а также формировать условия дифференцированного горизонтального смещения масс. Указанные явления наблюдаются в данных маршрутных и полигонных съемок ГИН РАН.

Сопоставление глубинных геолого-геофизических характеристик с поверхностными вдоль САХ приведено на рис.7 и показывает следующее.

Наблюдаются существенные отклонения полускоростей спрединга ($\geq 200\%$) вдоль изохрон для соседних блоков океанической литосферы, разделенных трансформными разломами. Размеры сегментов с локальными вариациями полускоростей сопоставимы с глубинами кровли «холодных» линз, что говорит о сохранении главной масштабной сопоставимости глубины мантийных неоднородностей с размером поверхностных. Асимметрия полускоростей спрединга сводится практически к нулю на сегментах САХ, которые совпадают с положением «холодных» линз и максимумами модуляции длин трансформных разломов. Между линзами асимметрия полускоростей достигает максимальных значений. Отрицательная корреляция максимумов полускоростей на западном и восточном флангах с устойчивым средним значением вдоль изохрон означает, что суммарное спрединговое наращивание коры остается стабильным вдоль САХ, но его сегменты обладают различными и независимыми друг от друга кинематическими характеристиками. Это подтверждает тезис о неоднородной и «нежесткой» структуре плит и о возможности независимого движения ее частей под действием сил объемного типа с горизонтальной компонентой. Сравнение профилей полускоростей показывает, что существуют зоны инверсии с западного преобладания увеличенных скоростей на восточное. Указанные инверсии имеют место в пространстве между «холодными» подлитосферными линзами. Очевидно, зоны пониженной вязкости мантии усиливают нестабильность и вариации кинематики преимущественного направления процесса спрединга по сравнению с «холодными» зонами.

Сопоставление геофизических атрибутов (см. рис.7) с данными классификации геодинамических типов литосферы Атлантики (см. рис.5) показывает, что за пределами осевой зоны САХ кластеры геофизических параметров обладают меридиональной

дифференциацией, совпадающей с наличием «холодных» подлитосферных линз. Различие кластеров состоит в среднем тепловом потоке. Для зон с линзами он составляет 52 мВт/м^2 , а для промежуточных зон с пониженной вязкостью – 67 мВт/м^2 . Из этого следует, что характеристики поверхностной макротрещиноватости, зональности литосферы по степени деформированности, энерговыделение через поверхность и сейсмотомографические аномалии связаны в более или менее непротиворечивую причинно-следственную группу, позволяющую судить о влиянии геодинамического состояния мантии на поверхностные структуры.

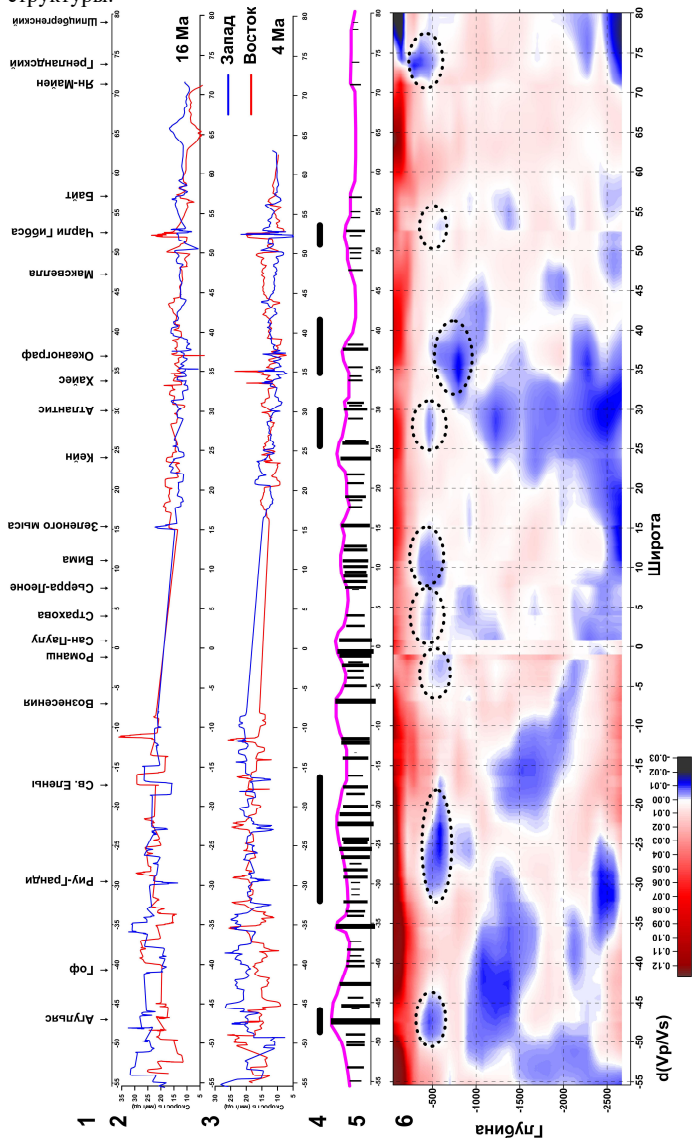


Рис.7. Корреляция геолого-геофизических атрибутов вдоль оси САХ по данным (Соколов, КРАУНЦ, 2016; Соколов, Тектоника..., 2016) с изменениями. 1 – положение на оси САХ пересечений с наиболее крупными разломами и их названия; 2, 3 – значения полускоростей спрединга (мм/год) вдоль изохрон 16 и 4 млн лет соответственно, показанные парами для западного (синяя линия) и восточного (красная линия) флангов САХ, построенные по данным (Müller et al., 2008) с фильтрацией интервала от 8° юж. до 15° с.ш.; 4 – положение зон с минимальной асимметрией скорости спрединга для районов с достоверной идентификацией линейных магнитных аномалий; 5 – положения пересечений трансформных разломов с САХ с размером символа, линейно пропорциональным общей длине с пассивными частями, и их отбрасывающая; 6 – вариации отношения V_p/V_s , рассчитанные по сейсмотомографическим данным для Р и S волн (Besker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997; Van Der Hilst et al., 1997), пунктирными кругами обозначены «холодные» аномалии верхней мантии Атлантики под зонами САХ и его флангами.

При неоднородном профиле скорости спрединга вдоль сегментов САХ возникают сдвиги между блоками, выраженные деформациями в рельефе кровли базальтового слоя и, соответственно, в осадочном чехле, где он есть. Эти деформации выражены в остаточном рельефе на длинах волн менее 75 км (рис.8). Разница скоростей соседних сегментов формирует сдвиговые смещения вдоль трансформных разломов и зоны растяжения под углом 25-45° к сдвиговому разрыву, которые формируют дискордантные образования в сегменте с более медленной скоростью. С тех же позиций скоростной дифференциации, эволюционирующей во времени, объясняется наличие разломов-«отшельников» (Мазарович, 2000). Кроме АМП, остаточный рельеф является основой для восстановления кинематической эволюции спредингового субстрата и деформаций осадочного чехла. Насыщенность дискордантных нарушений является параметром, определяющим зональность литосферы по ее деформациям. Наличие «холодных» подлитосферных линз и менее вязкой мантии в промежутках между ними активизирует процессы на сегментах САХ и усиливает асимметрию движения. Скоростная дифференциация приводит к образованию асимметричных относительно оси САХ дискордантных форм рельефа. Симметричные формы, скорее всего, формируются при вдольосевом перетоке менее вязкого вещества верхней мантии, контролирующем образование дополнительных трогов между прямыми трансформными разломами, сегментирующими САХ. Локальные депрессии вдоль оси САХ, являются индикаторами осей этих трогов и меняют положение во времени на оси САХ. Между сегментами в пассивной части разлома формируется дефект в виде серпентинитов и брекчий вдоль разрыва, который «вмораживается» в плиту и может быть местом активизации смещений между блоками плит при любой неоднородности их движения. Использование остаточного высокочастотного рельефа позволяет оценить пространственно-временную динамику вещества оси САХ на всем пространстве котловин, где разломные и дискордантные трогов не полностью выровнены осадконакоплением, включая области АМП без инверсий полярности.

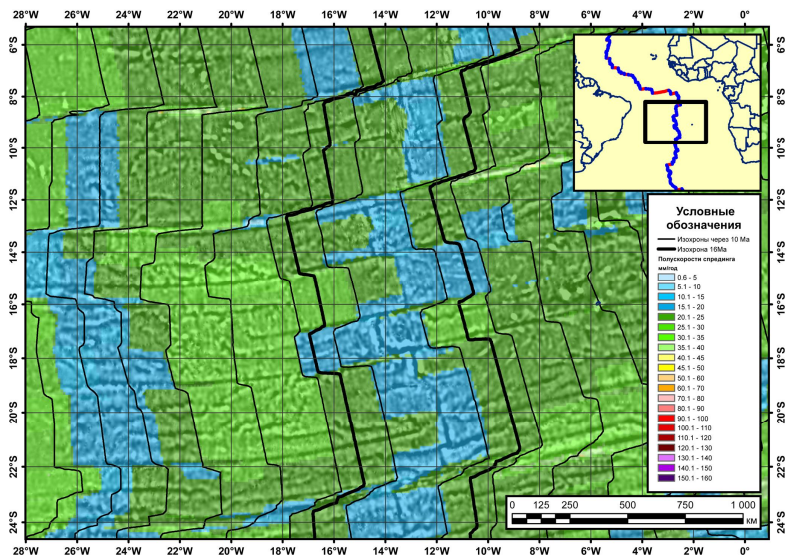


Рис.8. Остаточный рельеф осевой зоны САХ и флангов между 7° и 24° ю.ш., полученный высокочастотной фильтрацией полного рельефа (GEBCO, 2014) на 30-секундной матрице значений для длин волн менее 75 км. Утолщенными линиями показано положение изохроны 16 млн лет с обоих флангов САХ, другие изохроны построены с шагом 10 млн лет. Значения полускоростей даны по (Müller et al., 2008).

Существует корреляция значений АМП по профилю вдоль осевой аномалии САХ с содержанием FeO, в особенности севернее 65° с.ш. (Силантьев, Соколов, 2010) Эта корреляция обеспечена наличием контрастных (по FeO и по глубинности) типов базальтов. В северном сегменте САХ наблюдается очевидная взаимосвязь содержания FeO и глубинных плюмовых аномалий сейсмотомографического атрибута в районе Исландского и Азорского плюмов. Плюмовые базальты, указывающие на магмообразование в САХ из различных по глубинности источников, увеличивают вариацию FeO и, соответственно, магнитное поле с заметным псевдолинейным трендом. Проявления сульфидной минерализации тяготеют не только к зонам пониженной сейсмичности (Мазарович, Соколов, 1998), но и к зонам, ассоциированным с плюмовыми явлениями в верхней мантии. Наличие плюма, приповерхностное ответвление которого продвигается на юг вдоль хребта, приводит к возникновению дополнительной трещиноватости коры по границам области его растекания или на фронте его продвижения, что создает условия для функционирования гидротермальных систем и зон серпентинизации пород верхней мантии.

Проведенная корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси САХ с атрибутом отношения $\delta(V_p/V_s)$ (см. рис.7) показывает их синхронизацию с полем атрибута на глубине около 500 км. Минимумы атрибута связаны с максимумами длин трансформных разломов, преддуговыми кластерными сочетаниями значений потенциальных полей, большими субширотными смещениями оси САХ, нетипичными механизмами очагов землетрясений, минимумами асимметрии полускоростей спрединга. Максимумы атрибута связаны с длинными сегментами САХ без трансформных разломов, минимумами аномалий Буге, максимумами асимметрии полускоростей спрединга, максимумами содержания FeO в высокопродуктивном базальтовом магматизме.

3.9. Площадное распределение геологических свойств в мантийном слое между глубинами 400 и 670 км

Геодинамическое состояние мантии на средней глубине около 500 км в слое мощностью около 300 над разделом 670 км определяет распределение изученных характеристик на поверхности, а также тектоническую раздробленность литосферы и коры. Возможны следующие варианты интерпретации происхождения корреляции вдольосевых характеристик САХ: в движение плит может быть, кроме собственно литосферы, вовлечен поверхностный слой мощностью до 400 км, трение подошвы которого с «холодными» блоками создает повышенную трещиноватость на поверхности. В пространстве между «холодными» блоками мантия менее вязкая, и число крупных разломов, а также их длина снижаются. Другим вариантом интерпретации сделанных наблюдений является тезис, что «холодные» блоки с типичными значениями параметров на поверхности литосферы являются фоновым состоянием, а области над «горячими» блоками являются нарушениями, возникающими в местах ответвлений плюмовых аномалий. В этом случае вовлечение слоя мощностью 400 км не обязательно для обоснования фактов. Более интенсивная динамика, создающая тектоническое разнообразие, протекает в «горячих» блоках, что и определяет обособление «холодных» зон в цепочке вдоль САХ. Площадное распределение аномалий подвижности на срезе куба атрибута на глубине 470 км показывает, что общая конфигурация аномального поля содержит группу изолированных «горячих» максимумов, соответствующих ответвлениям плюмов, встроенных в фоновое «холодное» поле. Разломная сеть формируется в участках над «холодными» блоками, прилегающими к «горячим» и более подвижным блокам. «Холодное» состояние мантии, являющееся фоновым, может быть более распространено, чем это следует из томографических данных используемой детальности. В природе могут быть реализованы оба упомянутых варианта, конкурирующие друг с другом.

3.10. Параметры, характеризующие тип коры и границу континент-океан

Области проявления «гранитных» по сейсмическим скоростям характеристик 2-го и 3-го слоев в условиях шельфовых зон окраинных морей и аномальных океанических структур имеют диапазон значений аномалий Буге от 0 до ~175 мГал и диапазон аномалий томографии по волнам Лява <0 , что является типичным для континентальной коры и

проявлениям высокопродуктивного магматизма над плюмовыми аномалиями в мантии. Области со значениями аномалий Буге более 175 мГал и аномалиями томографии по волнам Лява >0 являются океаническими.

ГЛАВА 4. Тектоника и геодинамика экваториального сегмента Атлантики (ЭСА) по мелкомасштабным данным

4.1. Особенности ЭСА

ЭСА (рис.2) в литосфере всей Атлантики выделяется кластерными сочетаниями геофизических параметров с промежуточными значениями между САХ и котловинами, которые определяют «холодный» блок, ограниченный с севера и юга кластерами с преддуговыми свойствами. На разрезе атрибута $\delta(V_p/V_s)$ под ЭСА наблюдаются «холодные» линзы пониженной подвижности мощностью 200-300 км с осью на глубине ~ 470 км, в плане распространенные почти на всем сегменте. ЭСА имеет повышенную плотность полиразломных и сдвоенных трансформных систем над этими линзами. Вдоль северного обрамления ЭСА имеет аномальные механизмы очагов землетрясений сдвиговой кинематики, которые проявлены в зоне смены векторов движения, зафиксированных по данным GPS. Это объясняет механизмы очагов, наличие транспрессионного режима вдоль разлома Зеленого Мыса и соответствующие деформации внутри ЭСА с анизотропией структурной ориентации.

4.2. История тектонического развития ЭСА

В процессе тектонического развития ЭСА в северной части происходила неоднократная смена сдвигового режима от транстенсии к транспрессии через фазу простого сдвига, имевшую псевдопериодический характер с интервалами от 15 до 25 Ма (рис.9). Кинематика плит – скорость и положение полюсов – также меняла характеристики во временных интервалах смены геодинамического режима. Начиная с конца эоцена по настоящее время, преимущественным режимом развития является транспрессия. Наличие на северном обрамлении ЭСА тройного сочленения плит типа рифт-разлом-рифт (САХ и западная часть разлома $15^\circ 20'$) подтверждается сейсмичностью со сдвиговыми и взбросо-сдвиговыми механизмами по разлому и механизмами растяжения по рифтовым сегментам. Большая часть деформаций ЭСА проявлена на менее подвижном блоке к югу от разлома $15^\circ 20'$.

4.3. Глубинное строение сегментов ЭСА и его обрамления по данным сейсмотомографии и расслоенность литосферы

По данным субширотных сейсмотомографических разрезов вдоль ЭСА, а также к северу и югу от него, хорошо видны «столбы» Африканского суперплюма, питающие системы островов Зеленого Мыса и Канарских островов (рис.10). Наблюдается отсутствие продолжения осевой аномалии САХ глубже 300 км и симметричные относительно САХ безкорневые «горячие» аномалии в интервале глубин от 100 до 700 км, которые на востоке могут быть связаны с глубинным подводящим каналом Африканского суперплюма, а на западе с Восточно-Тихоокеанским поднятием. Другой особенностью субширотных разрезов ЭСА являются «холодные» блоки на глубинах от 400 до 700 км, более распространенные на восточном фланге, чем на западном. Заметен тренд к формированию «холодной» расслоенности под осью САХ и на восточном фланге до глубин 1000 км, в особенности к югу от ЭСА на широте Анголо-Бразильского геотраверса (АБГТ) – 12° ю.ш. Исследования глубинным сейсмическим зондированием 1980-1986 гг., проведенные вдоль него, показали блоковое и расслоенное строение литосферы как под осью САХ, так и на флангах (Павленкова и др., 1993). Особенно контрастна расслоенность на востоке АБГТ в Ангольской котловине, где в литосфере обнаружена инверсия скоростей с максимумом 8.8 км/с и минимумом 8.2 км/с. Сопоставление геофизических полей вдоль АБГТ с другими районами Атлантики допускает возможность рассматривать блоковость и расслоенность как универсальное явление в Атлантике. Современная динамика плит, сейсмичность, специфические деформации осадочного чехла, томографические данные вдоль северного сегмента ЭСА и западного продолжения в Карибский регион (James, 2009), а также

специфическая морфология рельефа дна, конфигурация разломных трогов с групповым изгибом и структурами типа «кинк-банд» к востоку и к западу от САХ (см. рис.2) и появление дополнительных трогов указывает на то, что эта область представляет собой широкую сдвиговую зону. При этом формируется конфигурация основных структурных элементов САХ с максимальным широтным смещением.

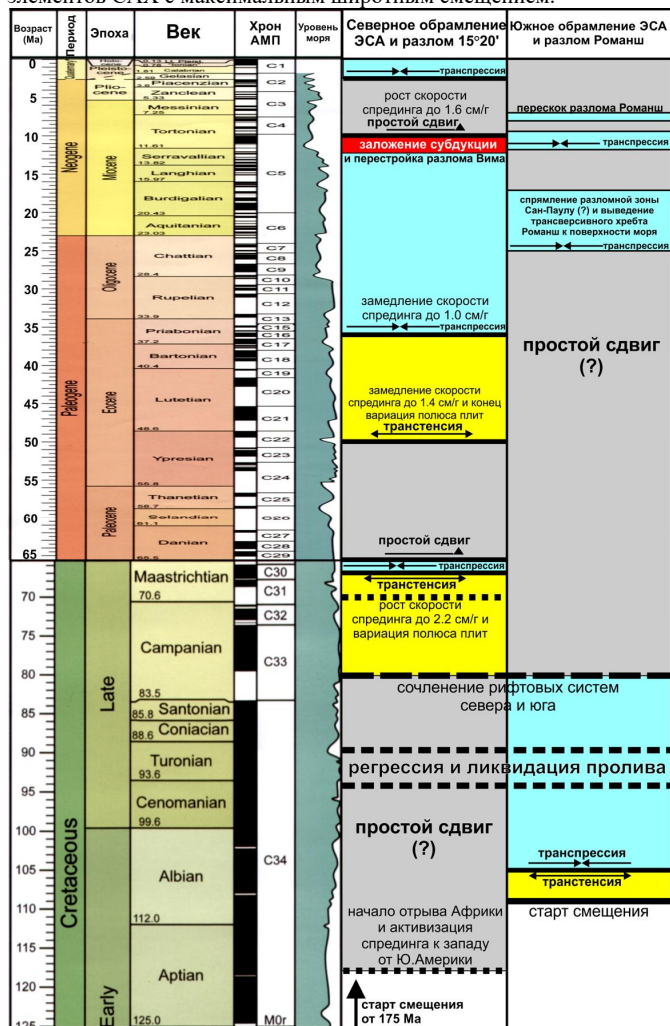


Рис.9. Схема тектонических событий ЭСА и его обрамления по литературным данным. (см. таблицу 4.1 в диссертации)

4.4. Некоторые особенности строения дна вдоль демаркационных разломов

Сейсмичность выделяет активные в настоящее время сегменты спрединговой системы с увеличивающимся с востока на запад амплитудами смещения по разломным трогам. Осевые мантийные аномалии Буге САХ имеют продолжение к северу на 120 км от активных сегментов зоны Сан-Паулу и оканчиваются субширотной зоной вулканических построек (см. рис.2). Полиразломная трансформная система с 5-тью трогам, кроме сдвиговой компоненты движения находящаяся под воздействием субмеридионального сжатия, возможно переменного во времени и по направлению, является неустойчивой по положению внутри

нее рифтовых сегментов (рис.11), которые могут перескакивать в ее пределах в соответствии с перераспределением напряжений и образованием более оптимальных условий рифтинга в другом положении. В системе Сан-Паулу наблюдается тренд на спрямление трансформного перехода между двумя удаленными сегментами САХ (см. рис.11).

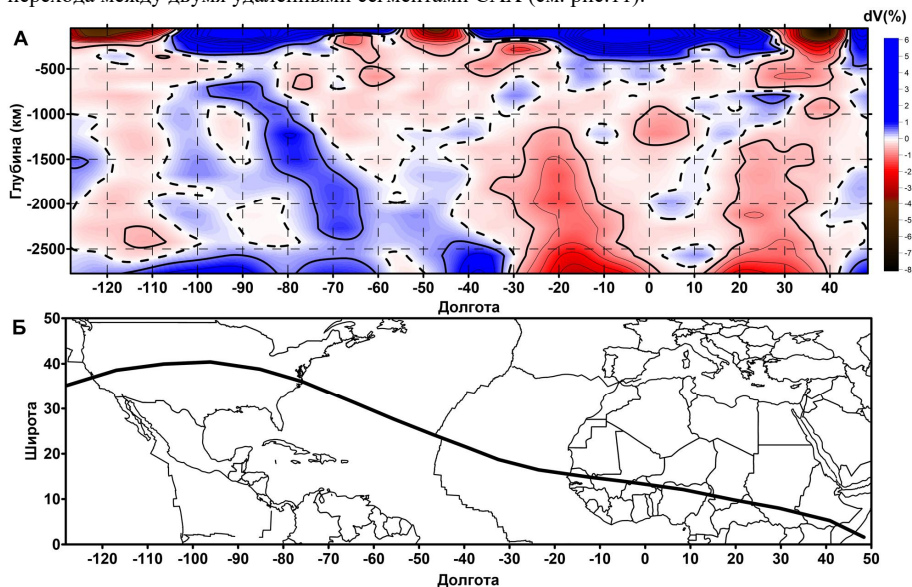


Рис.10. Субширотный сейсмотомографический разрез мантии (А) в центральном сегменте Атлантики, рассчитанный по данным (Boschi, 2002; Grand et al., 1997), пересекающий САХ по 24° с.ш. (пунктирная изолиния – нулевое значение, жирные сплошные изолинии – пределы $\pm 0.5\%$ и далее с этим шагом); положение профиля, совпадающее с горизонтальной координатой разреза (Б).

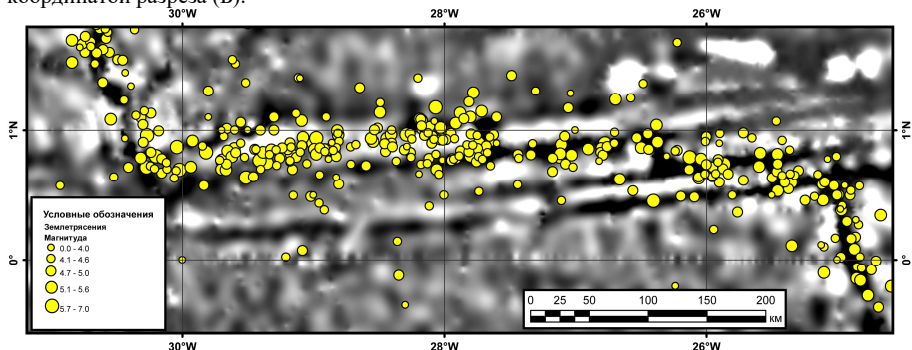


Рис.11. Сейсмичность полиразломной трансформной системы Сан-Паулу (ANSS, 2014).

Разлом Романш (см. рис.2) состоит из нескольких разрывов, осложненных сколами Риделя и возникших при смене положения текущей тектонической активности, произошедшей 7-8 Ма назад. Активная часть разлома Романш расположена с перекрытием сегментов САХ, неустойчивым при субширотной динамике. Эта конфигурация может иметь тенденцию к спрямлению по кратчайшей траектории между сегментами САХ, смещаемыми разломной зоной. В этих условиях имеет место торошение на северном борту разлома и

подъем блоков поперечного хребта с формированием изостатической аномалии амплитудой ~160 мГал. Это указывает на действие, которое вывело значительные избыточные массы над условной компенсационной поверхностью. Последствием подъема блоков северного борта Романш к уровню моря является формирование рифогенных карбонатных построек, совпадающих с изостатической аномалией (Gasperini et al., 1997). Наблюдаются линеаменты, обозначающие спрямление в зоне, охватывающей разломы Романш и Чейн.

4.5. Деформации осадочного чехла и геофизические поля

Сформулированы отличия и признаки деформаций осадочного чехла абиссальных котловин, необходимые для их картирования. Такими признаками являются рефлекторы в осадочной толще с углами наклона > 1°; постоянная мощность между рефлекторами, отклоненными от горизонтального залегания более 1°; дизъюнктивные нарушения, структуры протыкания, наличие структурных несогласий, ассоциации структур с акустическим осветлением осадочной толщи в виде линз и газовых труб; гипсометрически приподнятое положение деформированных структур над региональным уровнем.

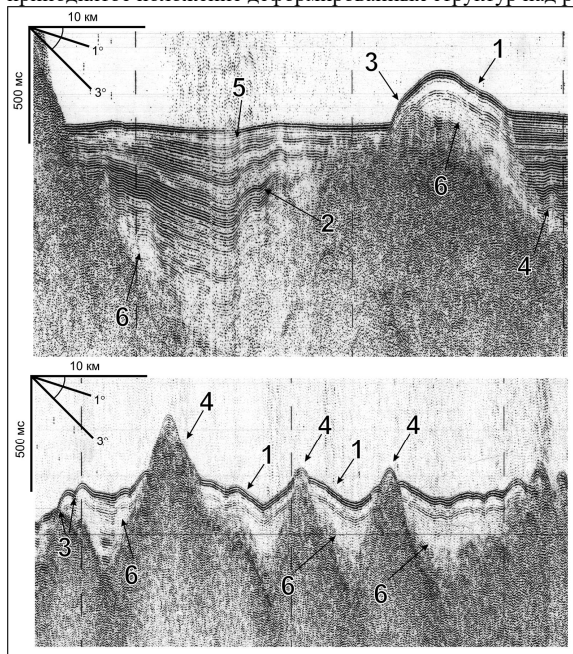


Рис.12. Признаки деформаций осадочного чехла абиссальных котловин по данным экспедиций ГИН РАН на НИС «Академик Николай Страхов» (Соколов, 2017).

1 – наклонные рефлекторы в осадочной толще с углами > 1°;
 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

В ЭСА 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 формируются 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, формирующей наклонные рефлекторы и поднимающей деформированные блоки над общим уровнем дна, выровненного осадконакоплением. Данное сочетание структур дна и геофизических характеристик хорошо проявлено на субширотном геотраверсе к западу от САХ (рис.13). Деформации осадков на сейсмическом разрезе расположены над холодной линзой в мантии, что видно из положения геотраверса на врезке, где в качестве топосовы использованы значения атрибута $\delta(V_P/V_S)$.

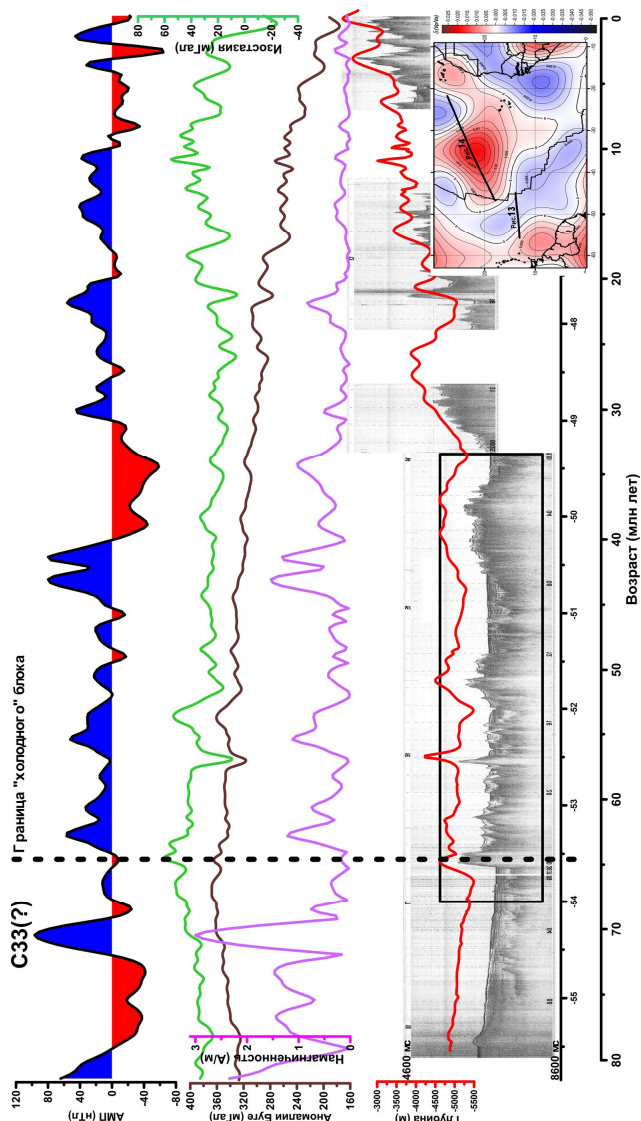


Рис.13. Геотраверс западного фланга САХ: разрез НСП от передовых частей Барбадосской аккреционной призмы (13°7' с.ш., 55°53' з.д.) до САХ (13°51' с.ш., 44°48' з.д.) в абиссальной котловине Демарара (положение см. рис. 4.19). 9-й рейс НИС "Академик Николай Страхов" (ГИН АН СССР, 1989; начальник рейса – Разинкин Ю.Н., начальник НСП – Побержин В.М.). Графики потенциальных полей (снизу вверх): рельеф (метры) (СЕВСО, 2014), намагниченность фундамента (Ам), аномалии Буге (мГал), изостазия (мГал), общее магнитное поле (нТл) (Maus et al., 2009). Общая длина геотраверса – 1230 км. Шкала возраста дана по (Müller et al., 2008). На врезке – горизонтальный срез куба вариации отношения $\delta(V/p/s)$, рассчитанного по сейсмомографическим данным для Р и S волн (Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997; Van Der Hilst et al., 1997) на глубине 470 км и – положение разрезов НСП и графиков потенциальных полей.

Геотраверс восточного фланга САХ (рис.14) показывает аналогичный переход к деформированному состоянию осадочного чехла от обычных сейсмофаций заполнения на границе холодного блока (см. рис.13, врезка). В восточной части фрагмента проявлены акустические осветления разреза в виде газовых труб и в виде горизонтальной линзы. Поскольку последняя примыкает к вулканическим постройкам, интерпретация ее происхождения может быть связана с внутриплитным магматизмом. Происхождение вертикальных труб связано с большей вероятностью с серпентинизацией, исходя из данных потенциальных полей. Основание всех труб находится на акустическом фундаменте, что указывает на эндогенный источник флюидов. Вершины утыкаются в рефлектор на глубине

120-150 мс под дном, что указывает на существование локального флюидоупора. По данным ближайшей скважины DSDP 138 на глубинах, соответствующих этому времени, появились плотные породы, снизившие скорость проходки в 4 раза.

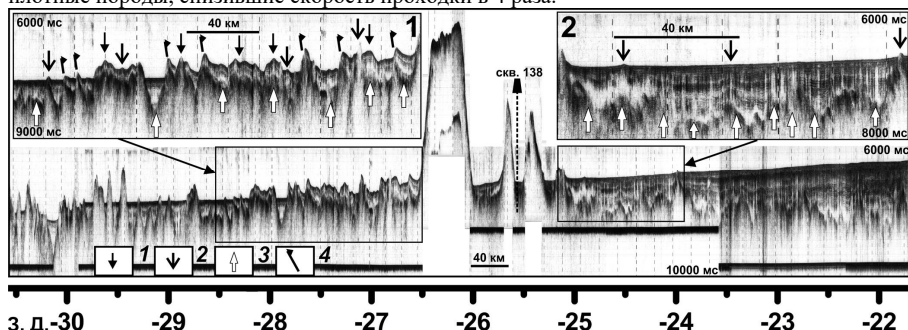


Рис.14. Фрагмент геотраверса к востоку от САХ (положение см. рис.13, врезка) с деформациями осадочного чехла. 12-й рейс НИС «Академик Борис Петров» (ГЕОХИ АН СССР, 1989; начальник рейса – Дмитриев Л.В., начальник НСП – Ефимов В.Н.). Фрагмент 1 – увеличенный вид деформаций к западу от подводной горы. Фрагмент 2 – акустическое осветление осадочной толщи к востоку от подводной горы. Показана проекция скважины DSDP 138 (Hayes et al., 1970) на линию разреза. 1 – центры штамповых складок; 2 – структуры протыкания; 3 – зоны акустического осветления; 4 – взбросовые нарушения.

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. Сопоставление положения деформаций с «холодными» блоками на срезе $\delta(V_p/V_s)$ на глубине 470 км показывает, что граница деформаций совпадает с нулевой изолинией атрибута $\delta(V_p/V_s)$. При отсутствии нарушения изостазии в ЭСА это поле совпадает с точностью до константы с аномалиями Буге. Расхождения фиксируются там, где равновесие нарушено, и проявляются на горизонтальных неоднородностях не менее 200 км, например в зоне САХ. Исключение могут составлять области проявления деформаций.

4.6. Отображение структур ЭСА в геофизических полях

При неравномерной плотности набортных промеров объективная картина для регионального анализа структур может быть получена по данным дистанционных зондирований методом альтиметрии (см. рис.2). Поле аномалий в свободном воздухе для океанической части отображает рельеф дна. Выделена четкая сегментация ЭСА по различному уровню поля, плотности линеаментов и насыщенности пространства дискордантными зонами и другими нестандартными структурами (см. главу 1). Отметим также возникновение структур типа пулл-апарт в пассивных частях трансформных разломов и наложенные цепочки вулканических построек, ориентированные косо к основным структурным элементам.

Минимум аномалий Буге вдоль оси САХ (рис.15) указывает на зону прогретого и частично расплавленного вещества мантии. Эффективная ширина этого минимума увеличивается к югу в соответствии с удалением от полюса вращения плит и увеличением скорости спрединга. ЭСА является сегментом с максимальным вдольосевым уровнем поля аномалий Буге. Наблюдаемые в его пределах минимумы являются локальными. Более глубокие минимумы видны в местах пересечения САХ с ветвями суперплюмов (см. рис.15, врезка), указывая на влияние термального и разуплотненного состояния мантии в пределах ветвей плюмовых структур. Вдольосевая аномалия САХ совпадает по пространственной конфигурации и амплитуде с минимумом вариации скоростей S-волн в диапазоне глубин от

поверхности до 150 км. Уровень поля аномалий Буге в котловинах увеличивается и выполаживается в соответствии с охлаждением литосферы. Имеются несимметричные относительно САХ минимумы магматической системы островов Зеленого Мыса и Камерунской линии вулканов и подводных гор, питаемые боковыми ответвлениями Африканского суперплюма. В ЭСА также присутствует парная система возвышенностей Сьерра-Леоне и Сеара, образующих симметричные минимумы. Такая конфигурация могла сформироваться при кратковременном действии плюма под осью САХ. Данные по составу базальтов Сеара (Kharin et al., 1977) указывают на их отличие от обычных базальтов N-MORB и сходство с базальтами плюмовой ассоциации.

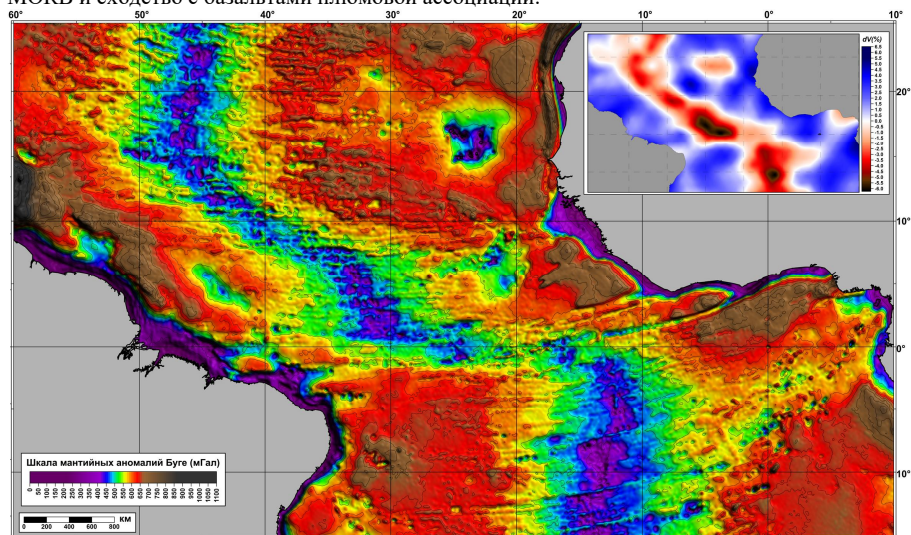


Рис.15. Мантийные аномалии Буге в ЭСА и его обрамлении. На врезке показан срез сейсмографической модели SL2013sv (Schaeffer, Lebedev, 2013) вариаций скоростей S-волн на глубине 75 км.

Расчет остаточных аномалий Буге, проведенный для пороговых значений длин волн 65 км, формирует поле, представляющее эффект от источников в коре и прилегающей мантии. Его отклонения формируют аномалии гор и хребтов вдоль бортов всех трансформных разломов. В следующих областях этот уровень нарушен усилением симметричных минимумов и максимумов: демаркационные разломные зоны, области около разломов Кейн и Вознесения с малыми ветвями Африканского суперплюма. Происхождение этих аномальных зон интерпретируется как результат выведения плотных ультраосновных пород вверх по бортам разломов и формирование разуплотненных из-за серпентинизации зон. Эти комплексы пород многократно были драгированы с бортов разломов в экспедициях ГИН РАН (Мазарович, 2000). Выделяется зона с сильными отрицательными значениями аномалий Буге на флангах хребта между разломами 15°20' и Богданова с максимальным субширотным смещением системы САХ, где по данным о составе пород среди ультрамафитов велика доля сильно серпентинизированных разновидностей. Распространение серпентинизации наблюдается вдоль демаркационных нарушений.

АМП в ЭСА имеет мозаичный характер. Природа мозаичных аномалий на флангах обусловлена серпентинизацией пород верхней мантии. Выделяются высокоамплитудные аномалии парных возвышенностей Сьерра-Леоне – Сеара, указывающие на дополнительный источник магнитоактивного материала от продуктивного магматизма. Линейные аномалии классического вида проявлены за демаркационными разломами, ограничивающими ЭСА.

Осевая аномалия САХ сильнее АМП на флангах. Начиная с удалений 300-400 км, наблюдается закономерный рост АМП. Вторичный намагниченный материал формирует поле, которое накладывается на линейный рисунок и приводит к формированию сложной суммарной картины. С питающей областью магматического центра островов Зеленого Мыса связана высокоамплитудная аномалия кольцевой формы диаметром около 200 км, смещенная к западу от них, что может быть объяснено западным дрейфом плит.

4.7. Векторизация элементов тектоники ЭСА

Тектонические элементы ЭСА, показанные на карте (рис.16), условно делятся на две группы: главные и дополнительные. Главные элементы – рифтовые сегменты САХ, одиночные трансформные разломы и, отдельно, их активные части, нетрансформные смещения, зона САХ с флангами и отдельные магматические возвышенности – имеют геодинамическую интерпретацию, вполне согласованную с представлениями о параметрах основных действующих горизонтальных сил тектоники плит вне зависимости от источника этих сил и его комбинации с ветвями суперплюма. Дополнительные элементы – полиразломные системы, разломы-«отшельники», параллельные ветви и дискордантные нарушения, как симметричные, так и несимметричные, палеооси спрединга, впадины пулл-апарт – могут интерпретироваться как результат действия следующих дополнительных факторов:

1. Вдольосевое перетекание прогретого вещества, приводящее к образованию дискордантных зон и вырождению сегментации САХ трансформными разломами или появлению дополнительной сегментации.
2. Взаимодействие блоков океанической литосферы на разных флангах трансформных разломов, включая пассивные части, возникающее из-за разной скорости спрединга в блоках.
3. Возникновение дополнительной разломной сети из-за изменения режима вращения Земли и кривизны поверхности.
4. Дополнительное смещение северной части ЭСА при боковом воздействии со стороны Анtilьской дуги и возникновение соответствующих деформаций.

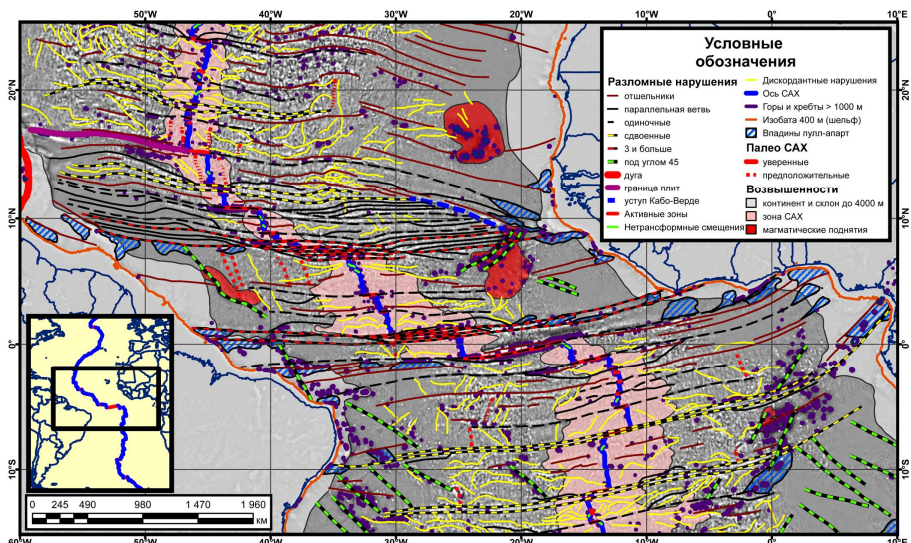


Рис.16. Тектоническая карта ЭСА и его обрамления, составленная на основе векторизации линейных элементов в данных спутниковой альтиметрии и общих соображений, вытекающих из съемочных геофизических данных.

От других известных вариантов векторизации тектонических элементов экваториальной Атлантики (Мазарович, 2000; Matthews et al., 2011) предложенная схема отличается наличием принципиально новых элементов и дифференциацией разломных нарушений.

4.8. Особенности распределения осадочного чехла

Мелкомасштабное отображение распределения основной мощности осадочного чехла указывает на ее убывание в зависимости от расстояния до источника сноса. Основной объем осадочного материала с мощностью свыше 1000 м сосредоточен в прибрежной полосе шириной 500-800 км. Зависимость мощности осадочного чехла от квадратного корня из возраста от оси САХ к периферии также является описанием фонового осадконакопления, но его вклад в накопление общей осадочной толщи мал. Этот процесс, протекающий со средней скоростью от 5 до 8 мм/1000 лет, формирует, как правило, изолированные осадочные тела мощностью от 0 до 500 м на большей части глубоководной акватории. Этот осадочный чехол не имеет принципиального значения для свойств генерализованной структуры коры. Раздробленность осадочного чехла повторяет впадины фундамента. В ЭСА имеется перемячка с выдвиганием осадков мощностью до 1000 м практически к рифтовой зоне САХ и повышенная мощность в трогах пассивных частей трансформных разломов (рис.17). ЭСА и САХ являются структурным барьером для донных течений, которые отклоняются от прямых траекторий и образуют замкнутые контуры со сменой параметров движения, что приводит к дополнительной разгрузке осадков. Трансформные разломы являются каналами для преодоления течениями структурного барьера (Mogozov et al., 2010), в которых также происходит накопление осадков, превышающее фоновое значение.

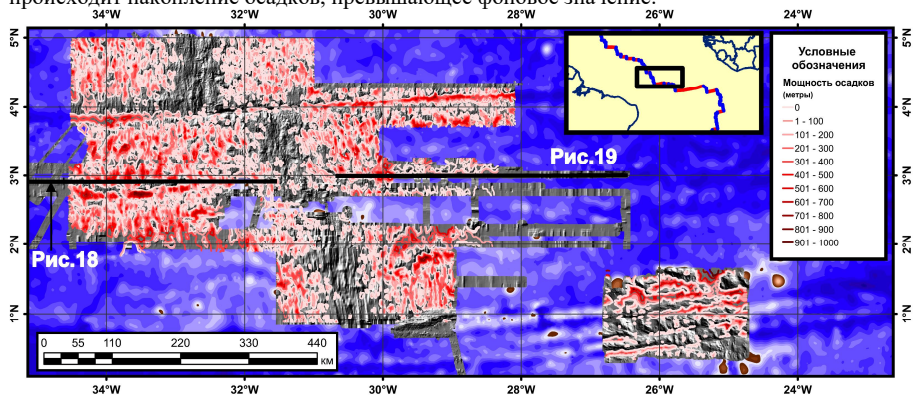


Рис.17. Карта мощности осадков южного сегмента ЭСА в пределах зоны САХ и восточной части полиархальной системы Сан-Паулу по данным НСП, выполненного в 7, 11 и 12 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988-1991, начальник рейсов – Удинцев Г.Б.) (Efimov et al., 1996; Мазарович и др., 2001). Жирными линиями показаны положения фрагментов разрезов и подписаны соответствующие им номера рисунков.

Анализ крупномасштабного распределения мощностей (см. рис.17) показывает сохранение тенденции к наращиванию мощности при удалении от оси САХ. Троги пассивных частей трансформных разломов заполнены осадками мощностью до 600-800 м, что не укладывается в принцип корня из возраста. Заметна тенденция к увеличению общей мощности с севера на юг на западном фланге САХ, сформированная донными течениями юго-западной части Гвианской котловины, отсутствующая на восточном фланге. При малых мощностях заполнения впадин акустического фундамента осадочные тела отделены друг от друга, и непрерывная корреляция рефлекторов неосуществима, но при больших мощностях они покрывают перемячки между впадинами фундамента, и верхние горизонты могут быть прослежены на значительные расстояния. Наблюдается пространственная миграция

глубоких впадин, заполненных осадками, в северном направлении, указывающая на вдольосевое смещение режима спрединговых процессов, симметричное относительно САХ. К югу от широты 2°20'с.ш. миграция впадин идет в южном направлении. Вне полосы от 1°30'с.ш. до 4°00'с.ш. признаки миграции не наблюдаются, и осадочные карманы вытянуты субмеридионально и параллельны оси САХ. К югу от разлома Страхова (4°00'с.ш.) впадины фундамента с осадками объединены в прямые и узкие трог северо-западного направления под углом около 60° к разлому (см. рис.17).

Субширотный сейсмический разрез к западу от САХ (рис.18) пересекает впадины с осадками мощностью до 800 м с более контрастной акустической стратификацией, указывающей на наличие примесей вулканокластики в осадочном материале. Установлены деформации, имеющие штамповую морфологию, а также структуры протыкания при слабо выраженной акустической стратификации и пониженной мощности. Это указывает на условия с высокими скоростями осадконакопления. На разрезе протяженностью около 400 км зависимость нарастания мощности при удалении от САХ не наблюдается.

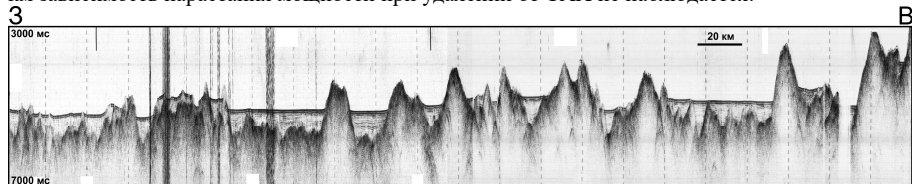


Рис.18. Фрагмент регионального профиля S07-06 к западу от САХ. 7-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988; Отчет 7-го..., 1988; Equatorial..., 1996). Положение разреза показано на рис.17.

Субширотный сейсмический разрез к востоку от САХ на протяжении 500 км показывает тренд увеличения мощности с возрастом. Это интерпретируется как следствие меньшего влияния течений, формирующих возмущения в тренде пространственного распределения мощностей. Деформации осадочного чехла на восточном фланге проявлены меньше и выражены редкими структурами протыкания и сбросовыми малоамплитудными нарушениями между протяженными блоками с субгоризонтально залегающими осадками с контрастной стратификацией. В центральной части профиля выявлены аномалии типа «яркое пятно», которые интерпретируются как локальные проявления продуктивного магматизма, формирующего выровненные высокоамплитудные рефлекторы. Эти аномалии расположены в толще осадков с превышением 300-500 м над уровнем окружающего фундамента. Возраст формирования выявленных магматических тел с горизонтальными размерами по 15 км составляет около 5 Ма. Данные тела относятся к удаленному звену цепочки подводных гор, трансерирующей затухающий плюмовый импульс, сформировавший магматическое поднятие Сьерра-Леоне.

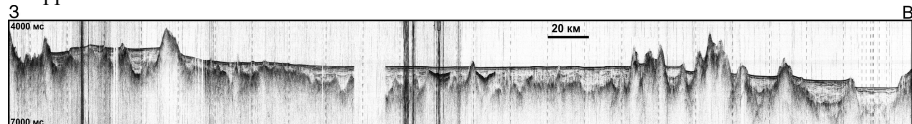


Рис.19. Фрагмент регионального профиля S07-05 к востоку от САХ. 7-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988; Отчет 7-го..., 1988; Equatorial..., 1996). Положение разреза показано на рис.17.

Разрезы вкрест разломных трогов показывают наличие сбросовых нарушений, что позволяет сделать вывод о наличии локального растяжения на флангах. В наиболее глубокой части трого разлома Страхова наблюдается разрез, характерный для интенсивной разгрузки осадков из потока, формирующего прирусловые валы или дрефты. Мощность осадочного заполнения трого разлома практически постоянна вдоль восточной пассивной части на

протяжении около 350 км (рис.17) и равна в среднем 400-500 м с небольшими вариациями, что указывает на фактор донных течений, не зависящий от возраста фундамента.

ГЛАВА 5. Особенности строения ЭСА и его обрамления по детальным сейсмическим данным

5.1. Фоновые и локальные особенности строения осадочного чехла

Океанический осадочный чехол можно условно разделить на фоновую и локальную компоненты. Фоновой является генерализованная структура осадочного чехла с устойчивым пространственным распределением, формируемая выносом материала с суши и осаждением вещества из толщи воды в глубоководной части, неравнозначными по вкладу в суммарную мощность. Детальное исследование осадочного чехла показывает наличие локальных отклонений от генерализованной картины, которые формируются тектоническими движениями и донными течениями. Течения и потоки формируют локальные увеличения мощностей около структурных барьеров, вдоль трогов разломов и глубин контурной циркуляции. Особо мощные турбидиты на удалениях в несколько сотен километров от конуса выноса могут создавать аномальные мощности за счет суперпозиции прирусловых валов гравитационных потоков. Тектонический фактор приводит к образованию штамповой складчатости, структур протыкания, акустическому осветлению низов разреза, сбросовым и взбросовым нарушениям, образующим в некоторых случаях эшелонированную чешуйчатонадвиговую систему. Кроме того, осадочный чехол осложнен внутриплитным магматизмом, формирующим на записи аномалии типа «яркое пятно». Имеются признаки сдвиговых деформаций осадочного чехла в пассивных частях трансформных разломов. В сочетании с акустическим осветлением могут наблюдаться прорывы флюида в водную толщу.

5.2. Зона полиразломной трансформной системы Сан-Паулу

Данные НСП показывают наличие аномальных рефлекторов типа «яркое пятно», которые соответствуют выровненному магматическому фундаменту, возникающему в условиях продуктивного магматизма, отличающегося от обычного для медленно-спрединговых зон. Эти аномалии покрыты осадочным чехлом с уменьшающейся к югу мощностью и преимущественно горизонтально залегающим.

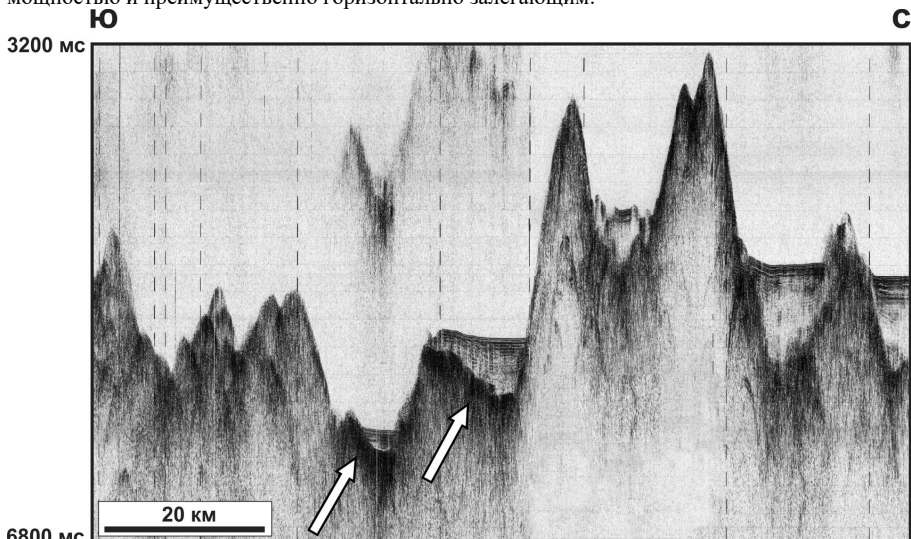


Рис.20. Профиль S07-SP-20. 7-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988) вкост восточных пассивных частей полиразломной системы Сан-Паулу. Стрелками указаны аномалии типа «яркое пятно» в выровненной кровле фундамента.

Деформации акустического фундамента в основном носят доседиментационный характер. Современные деформации также имеют место, но меньшей чем в фундаменте амплитуды, и сопровождаются вертикальным акустическим осветлением осадочной толщи (рис.20). Имеются признаки поступления флюидов в водную толщу. Структура акустического фундамента содержит сегменты рифтовых палеодолин и палеонадальную впадину, не совпадающие с положением современных активных зон (рис.11). Расположение палеоформ фундамента, полученных вычитанием мощности осадков из рельефа дна (рис.21, 22), показывает, что перескоки активных рифтовых сдвиговых сегментов могли проходить в несколько этапов. В группе из нескольких разломных трогов при переменном внешнем воздействии (смена транспрессии и транстенсии) перескоки рифтовых и сдвиговых сегментов внутри группы могли происходить непредсказуемым образом. Данные указывают на то, что правилом, определяющим направление перескоков, могло являться спрямление траектории перехода между сегментами САХ, осуществляемого по полиразломной трансформной системе (см. рис.11).

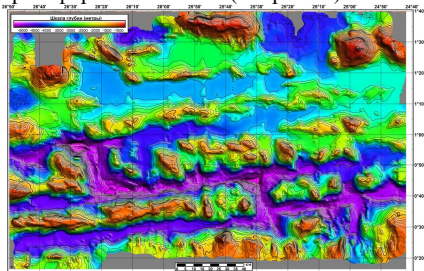


Рис.21. Батиметрическая карта востока активной части полиразломной трансформной системы Сан-Паулу, составленная по данным 7-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988) по данным (Мазарович и др., 2001). Цифровая модель составлена Г.В. Агаповой и К.О. Добролюбовой

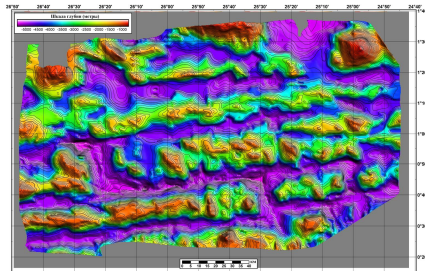


Рис.22. Рельеф акустического фундамента в районе работ 7-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН АН СССР, 1988) на полигоне в восточной части полиразломной трансформной системы Сан-Паулу по данным (Мазарович и др., 2001). Цифровая модель составлена С.Ю. Соколовым и В.Н. Ефимовым

5.3. Северный борт трансформного разлома Романиш

По данным рельефа и сейсмических разрезов НСП установлено, что на северном борту разлома Романш в неогене происходили вертикальные движения земной коры, которые имели значительную амплитуду (более 1000 м) и носили колебательный характер (Gasperini et al., 1997). Это подтверждается наличием рифогенных построек, продуктами их разрушения при повторном выведении блока к уровню моря, двух эрозионных террас с уровнями 1350 и 1050 м. Разница уровня верхней террасы и минимальной глубины хребта составляет около 200 м и дает оценку минимальной амплитуды колебаний положения выступа фундамента. Современный уровень главной эрозионной террасы, равный 1350 м, значительно превосходит эту оценку. Имеющиеся факты могут быть объяснены наложением двух процессов: длиннопериодного, связанного с тектоническим воздействием в условиях транспрессии (см. рис.9), сдвиговых процессов со сложной конфигурацией разрыва и формированием изостатических аномалий на бортах разломного трогов с большой амплитудой вертикальных движений, и короткопериодного (0.7-0.9 Ма) колебания уровня моря с малой амплитудой.

5.4. Восточная часть трансформного разлома Богданова

Восточная часть полиразломной системы Долдрамс-Вернадского-7°24'с.ш.-Богданова-6°52'с.ш. (см. рис.2) образует сложную суперпозицию отдельных пассивных частей с не типичными для зоны САХ структурами: субмеридиональные гряды фундамента,

перегораживающие трог разлома Богданова, и продолжение осевого гравитационного минимума к северу от разлома. Это указывает на возможное продвижение рифтовых структур на север, а также латеральную перестройку геодинамической ситуации, при которой происходит перескок сегментов САХ внутри полиразломной системы и «отключение» активных частей с перемещением их в сегменты разломов, бывших ранее пассивными. Осадочный чехол в пределах желоба разлома Богданова, разделенный грядами фундамента, указывает на активизацию вертикальных движений в два этапа: современный и на момент образования горизонта с глубиной залегания под дном 100-150 мс. Происхождение палеодеформации можно отнести к периоду формирования и воздействия Анtilьской дуги на северный сегмент ЭСА. В трог разлома наблюдается аномалия типа «яркое пятно», сходная с аномалиями на востоке южного сегмента ЭСА, сформированная продуктивным магматизмом на субстрате с возрастом ~15 Ма. Над этой аномалией сформирован дрейфт, указывающий на возможность активных течений вдоль трого разлома. Современные взбросовые нарушения с поднятым западным крылом имеют признаки взбросо-надвига с восточной вергентностью. Наблюдается сочетание деформаций сжатия и растяжения в области конвергенции разломов Богданова и 7°24'с.ш (рис.23). Медианный хребет активной части разлома Богданова показывает сдвиговый генезис данной структуры с элементами транспрессии. При этом медианный хребет может быть аналогом положительной «цветочной» структуры с выдавливанием кристаллических пород корового комплекса. Медианные хребты встречаются также в пассивных зонах разломов, что указывает на существование сдвиговых смещений далеко за пределами геодинамически активных частей трансформных разломов.

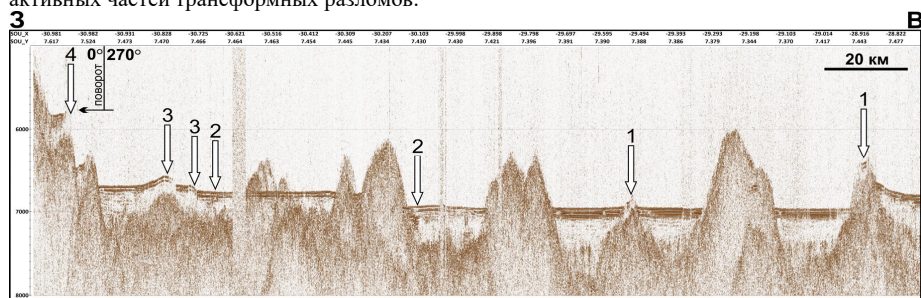


Рис.23. Разрез НСП S22-7В 22-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2000) вдоль восточной пассивной части разлома 7°24'с.ш. 1 – современные деформации; 2 – палеодеформации; 3 – взбросовые нарушения; 4 – сбросовые нарушения.

5.5. Зона уступа Кабо-Верде

Зона азимутального несогласия между пассивными частями трансформных разломов и уступом Кабо-Верде содержит деформационные проявления, не свойственные типичным структурам САХ и прилегающих котловин (рис.24). Провинция к северу от уступа содержит современные деформации, охватывающие весь осадочный чехол, состоящий из двух сейсмокомплексов суммарной мощностью около 300 мс. Чехол к югу от уступа (рис.25) также имеет два сейсмокомплекса, но его мощность увеличена до 700 мс. В ряде субширотных трогов наблюдаются приповерхностные вариации осадочного рельефа дна, связанные с деятельностью течений, которые образовали канал Нева с террасами вдоль берегов (рис.26). Аккумулятивные структуры выражены достаточно четко, и деятельность течений является фактором увеличения мощности в системе трогов, утыкающихся в уступ Кабо-Верде. Конфигурация грядовых форм фундамента в ряде случаев имеет овальную форму, указывающую на вероятность образования кальдер (см. рис.24). Эта интерпретация поддерживается наличием рефлекторов с повышенной отражающей способностью, которая может быть сформирована примесью вулканического материала.

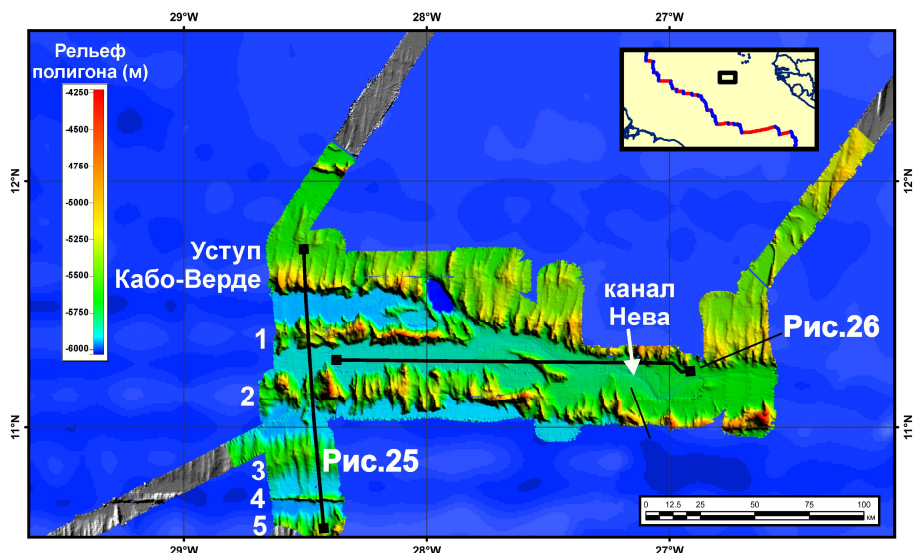


Рис.24. Район азимутального несогласия уступа Кабо-Верде с параллельными ответвлениями трансформных разломов, оттененный рельеф многолучевого эхолота и положение фрагментов сейсмических разрезов 22-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2000) (Отчет 22-го..., 2000; Мазарович и др., Докл.РАН, 2001). На врезке – положение основного планшетов в Атлантике относительно САХ. Номера линий указывают на рисунки с соответствующими фрагментами сейсмических разрезов. Пронумерованы хребты к югу от уступа Кабо-Верде.

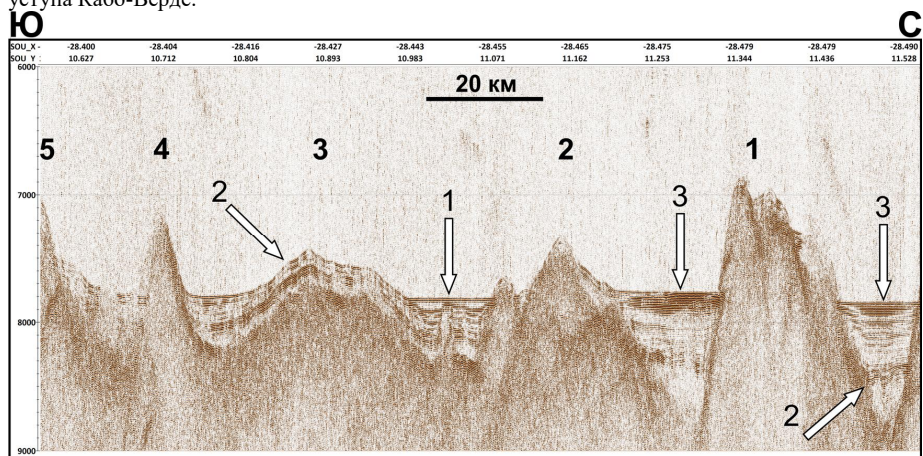


Рис.25. Разрез НСП S22-PCV-02 22-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2000) вкост хребтов к югу от уступа Кабо-Верде. Положение разреза показано на рис.24. Пронумерованы хребты с севера на юг. Стрелками указаны: 1 – вертикальное осветление записи; 2 – пликативные деформации; 3 – осадки с повышенной отражающей способностью.

Пликативные деформации в осадочном чехле к югу от уступа (см. рис.26) охватывают в основном нижний сейсмокомплекс. К складкам часто приурочены вертикальные осветления

записи. Грубые оценки возраста кровли деформированного комплекса по мощности позволяют отнести их ко времени заложения Антильской дуги ~10 Ма. Верхний комплекс в этих случаях несогласно и горизонтально залегает на нижнем. Исключение составляет хребет 3 на широте 10°52' с.ш. (см. рис.24), который кроме выступа фундамента выполнен деформированными осадками обоих комплексов, а в трог к северу от него современная толща со структурным несогласием залегает на крыле складки. Источником материала для этой толщи, помимо фонового осадконакопления, может служить размыв осадков. Локальная ориентация сжатия имеет субмеридиональное направление. Также наблюдаются вертикальные осветления акустической записи с аномалиями типа «яркое пятно» над вершиной, указывающими на флюидную природу записи. Хребет 4 на широте 10°42' с.ш. (см. рис.24) имеет длину не менее 100 км при ширине, не превышающей 4 км, и высоте не более 500 м, и является телом внедрения. Его морфология аналогична медианным хребтам, что указывает на его сдвиговый генезис, проявленный в пассивных частях трансформных разломов. Зона пликативных деформаций с востока ограничена штамповой складкой с небольшими взбросовыми нарушениями чехла на ее поверхности, которая перегораживает трог. Приведенные данные свидетельствуют о широком развитии многофазных тектонических движений, как древних, так и современных, сопровождавшихся внутриплитным вулканизмом.

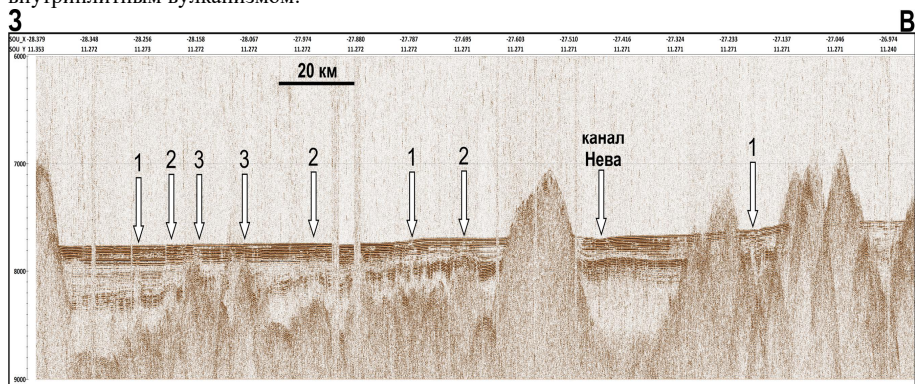


Рис.26. Разрез НСП S22-PCV-08 22-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2000) вдоль трога между хребтами 1 и 2. Положение разреза показано на рис.5.14. Стрелками указаны: 1 – вертикальное осветление записи; 2 – пликативные деформации; 3 – структура протыкания.

5.6. Юго-восточное обрамление котловины Зеленого Мыса

Ромбовидная субширотная депрессия между восточными пассивными частями трансформных разломов Меркурий и 15°20' интерпретируется как впадина пулл-апарт (см. рис.16), возникшая при смещении этих пассивных частей. В ее пределах выявлена система из трех гряд с амплитудами до 400 м, шириной до 25 км и длиной в восточном направлении не менее 50 км, самая большая из которых является субширотным сводовым поднятием, осложненным взбросо-надвиговыми деформациями с южной вергентностью, и пликативными деформациями нижних сейсмокомплексов между грядами. Мощность осадочных образований по данным НСП составляет не менее 500 мс. В поднятых частях структур наблюдается сокращение мощности верхнего комплекса приблизительно на 100 мс за счет эрозии. Образование выявленных структур может быть связано со сдвигом вдоль непрямого разрыва и формированием изгибов торшения. Осадочный чехол уступа Кабо-Верде, сходный по строению с чехлом котловины, также деформирован. Тектонические движения в районе уступа Кабо-Верде продолжались с рубежа олигоцена и миоцена до четвертичного времени.

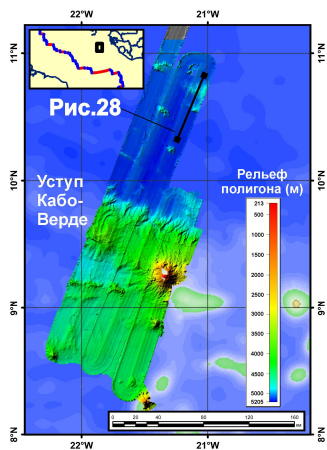


Рис. 27. Район юго-восточного обрамления котловины Зеленого Мыса и сочленения уступа Кабо-Верде с цепочкой гор Батиметристов, оттененный рельеф многолучевого эхолота и положение фрагментов сейсмических разрезов 23-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2006) (Сколотнев и др., 2007).

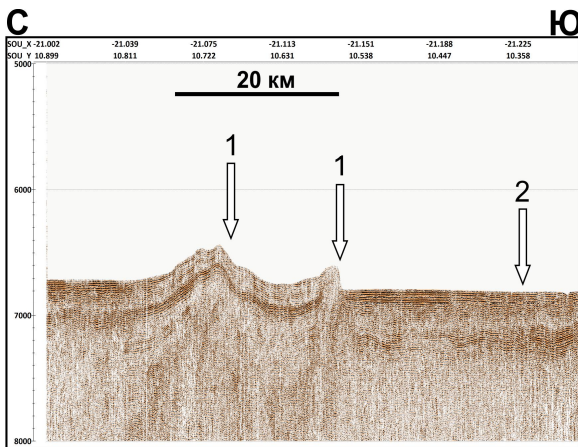


Рис.28. Фрагмент разреза НСП S23-P1-3 23-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2006) (Отчет 23-го..., 2006; Сколотнев и др., 2007) вкрест юго-восточного обрамления котловины Зеленого Мыса. Положение разреза показано на рис.27. 1 – взбросо-надвиговые нарушения; 2 – пликативные палеодеформации.

5.7. Зона перехода от уступа Кабо-Верде к возвышенности Сьерра-Леоне

Район сочленения уступа Кабо-Верде, гор Батиметристов, пассивной части разлома Богданова, косых разломов и возвышенности Сьерра-Леоне (рис.29) представляет собой сложнейший узел, в котором сочетаются сдвиговые деформации с разнообразными структурами парагенеза, впадины пулл-апарт и вулканические постройки, сформированные наложенным продуктивным магматизмом плюмового ответвления. В целом разделение характера структур проходит по пассивной части разлома Богданова, отделяющего северный сегмент ЭСА от южного. К северу от него расположены квестообразные структуры с пологим северным крылом, взбросо-надвиговыми деформациями и пликативными деформациями на южном крыле при южном векторе смещения масс. Эти деформации имеют современный возраст и указывают на активизацию деформационных структур конца эоцена (Мазарович и др., 1997). В районе проявлены два этапа деформаций. Первый – эоценовый, второй – современный. Существует смещение и локализация зоны деформаций во времени с юга на север. К югу от разлома Богданова на северном склоне возвышенности Сьерра-Леоне квестообразные деформационные структуры (рис.30) имеют пологий южный склон и крутой северный, примыкающий к пассивной части разлома. Деформации охватывают весь разрез и являются современными. В средней части разреза наблюдается положительная «цветочная» структура с плоскостью сместителя, указывающая на условия транспрессии. Около вулканической постройки наблюдается серия из 7 взбросовых нарушений, смещающих выровненный акустический фундамент, сформированный продуктивным магматизмом. Осадочный чехол на склоне структуры имеет небольшие вертикальные смещения, указывающие на современную активизацию по этим взбросам, и вертикальные акустические осветления от поступления флюида из цоколя вулканической постройки. В данном районе сочетание горизонтальных и вертикальных смещений сформировало уникальную структуру

осадочного чехла (см. рис.30), редко встречающуюся в абиссальных разрезах и не имеющую тривиальной интерпретации геодинамической обстановки, в которой она была сформирована.

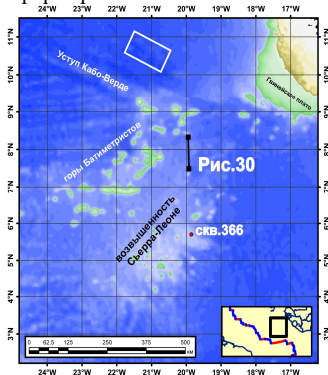


Рис.29. Район возвышенности Сьерра-Леоне, сочленения уступа Кабо-Верде с цепочкой гор Батиметристов и положение фрагмента сейсмического разреза 16-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 1993) (Отчет 16-го..., 1993; Мазарович и др., 1997

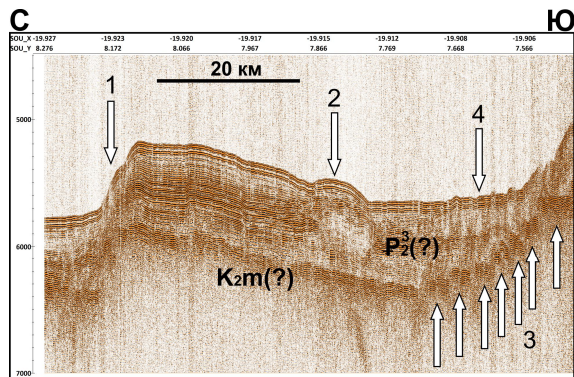


Рис.30. Фрагмент разреза НСП S16-01 16-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 1993) (Отчет 16-го..., 1993; Мазарович и др., 1997) вкрест зоны перехода от гор Батиметристов к возвышенности Сьерра-Леоне. Положение разреза показано на рис.29. 1 – крутой северный склон со взбросовым нарушением; 2 – положительная «цветочная» структура с наклонной плоскостью смещения; 3 – серия взбросовых нарушений; 4 – вертикальные осветления записи.

5.8. Проявления деформаций осадочного чехла по данным НСП

Проявления деформаций показывают, что основными структурами, которые устанавливаются методом НСП и многолучевым эхолотированием являются: пологие антиклинальные складки с углами падения слоев в первые градусы и размахом крыльев от первых миль до многих десятков миль; складки могут формировать структурные ансамбли различного масштаба, флексуры разных типов, моноклинали, разрывы (сбросы, взбросы) с амплитудами от первых метров до многих десятков метров, разломы с разными простираниями, пересекающимися трансформные разломы или рифтовые долины и зоны изломов (кинк-банд). Развитие этих деформаций приобретает наибольшую выраженность вдоль субмеридионального направления. На сейсмических профилях, ортогональных к этому направлению, деформации выделяются редко. Это дает основание говорить об анизотропии деформаций осадочного чехла. Наибольшая разница в деформированности осадочного чехла в зависимости от направления наблюдается в северном сегменте ЭСА. Она не коррелирует с главными структурными элементами – сегментами САХ и активными частями трансформных разломов. Деформации имеют наложенный характер на все структуры дна, где они выявлены. Отсутствие равновесия сил на внутриплитном пространстве вне главных элементов выявляется структурой изостатических аномалий и широтной сегментированностью аномальных зон. Литосфера ЭСА является подвижной системой, в которой блоки испытывают воздействия, нарушающие равновесие. Изостатический отклик на эти воздействия приводит к тому, что система масс кора – верхняя мантия эволюционирует в направлении равновесия архимедовой и гравитационной сил. Дополнительный фактор тектогенеза, выводящий систему из равновесия, имеет тангенциальный вектор (за исключением пловых проявлений). ЭСА также находится под воздействием Антильской дуги, давящей с запада на северный сегмент ЭСА, где обнаружено

максимальное количество деформаций, кинк-банд структур, параллельных ветвей и пулл-апарт депрессий.

5.9. Деформации в пассивных частях разломов в Ангольской котловине

Пространство между пассивными частями трансформных разломов в Ангольской котловине на удалении до 1800 км от САХ (рис.31) осложнено положительными «цветочными» структурами, структурами протыкания – древними и современными, взбросовыми нарушениями в бортах трогов, а также эффектами флюидонасыщенности – вертикальным акустическим осветлением и горизонтальными газовыми «шапками» (рис.32). Последние наблюдаются на глубине 100-150 мс, сходной с расположением флюидоупора в других котловинах. Аномалии сейсмической записи в абиссальной котловине указывают на наличие факторов, деформирующих фундамент и осадочный чехол. Таковыми являются сдвиговые смещения с элементами растяжения и сжатия. В совокупности эти движения приводят к деформациям не только вдоль бортов, но и в межразломном пространстве. В качестве источника флюида предполагается серпентинизация при повышенной трещиноватости коры и верхней мантии.

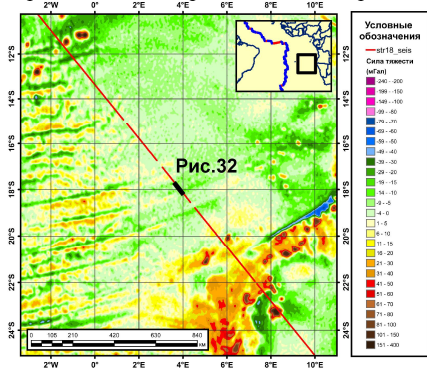


Рис.31. Положение маршрутного промера 18-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» и фрагмента разреза НСП в Ангольской котловине в сопоставлении с аномалиями силы тяжести в свободном воздухе (ГИН РАН, 1994) (Отчет 18-го..., 1994; Мазарович, Соколов, 1999).

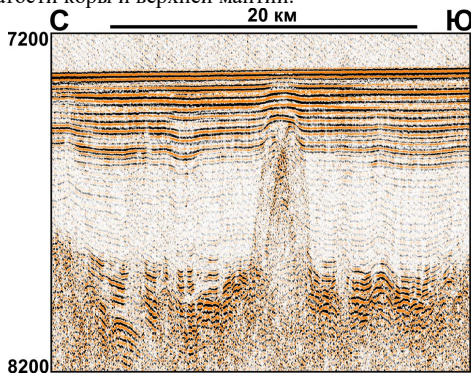


Рис.32. Увеличенный фрагмент геотраверса НСП S18-01 18-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 1994) (Отчет 18-го..., 1994; Мазарович, Соколов, 1999) с дегазационным проявлением и флюидной «шапкой». Положение разреза показано на рис.31.

5.10. Дегазация: признаки причин и следствий

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 и 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 обычными 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°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. Причинно-следственная цепочка внутрилитных явлений, приводящих к наблюдаемой дегазации, выглядит следующим образом:

1. Контрастное по горизонтали геодинамическое состояние мантии.
2. Неоднородные горизонтальные движения, формирующие на фоне остывания литосферы с возрастом повышенную макротрещиноватость.
3. Доступ воды в верхнюю мантию по образованной системе нарушений.
4. Серпентинизация пород верхней мантии с образованием зон разуплотнения, локальных отрицательных гравитационных аномалий и повышенной намагнитченности.
5. Образование деформаций вертикального подъема блоков фундамента и осадочного чехла и генерация флюидов (в основном метан).
6. Аккумуляция флюидов в осадочном чехле, формирование аномалий сейсмоакустической записи и прорывы в водную толщу.

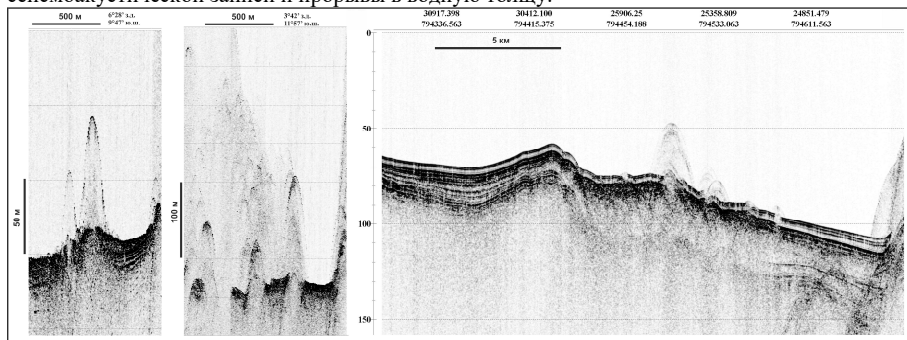


Рис.33. Акустические изображения разгрузки флюидов в водную толщу. (Записи 3.5 кГц профилографа EdgeTech 3300, 23-й и 24-й рейсы НИС «Академик Николай Страхов», 2006)

5.11. Характеристики деформационных структур: первичный подход

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 (см. рис.2), пересекающих северный сегмент ЭСА. Распределение высот структур, недифференцированных по типу, имеет главный максимум около 400 м. При серпентинизационном происхождении вертикального выдавливания блоков фундамента мощность слоя, охваченная этим процессом, достигает 2 км. Полиmodalность распределения может указывать на 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 (рис.34). 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, 27-38 и 43-53 млн лет (средне-поздне-миоценовая, олигоценная, ранне-средне-эоценовая). Подобное распределение может возникнуть из-за периодичности образования 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 иллюстрировать эволюцию температурного состояния. В интервалах между зонами с большими высотами структур находятся точки излома рельефа, связанные с фазовыми переходами в подошве литосферы (Приставакина, 1984).

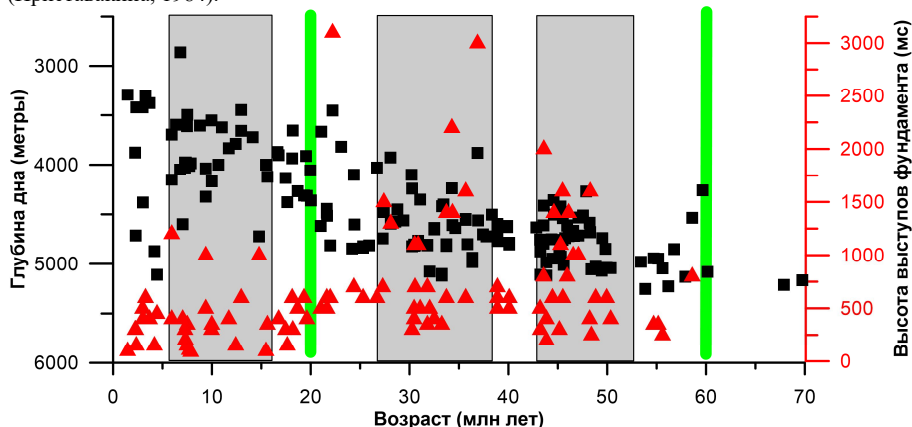


Рис.34. Распределение высот диапировых структур (красные треугольники) и глубин дна структур (черные квадраты) в зависимости от возраста магматического субстрата по данным (Мазарович, Соколов, 1997) с изменениями. Серыми областями показаны возрастные интервалы с повышенными значениями высот выступов фундамента. Зеленые линии соответствуют возрастам перегиба рельефа дна по (Приставакина, 1984).

5.12. Типы деформационных структур

Систематизация типов деформационных структур по 2D данным НСП построена по видимому направлению смещения масс в вертикальной плоскости разреза. Проявлены следующие типы: чешуйчато-надвиговые деформации (скупивание при горизонтальном смещении); диапировые структуры или структуры протыкания (положительные вертикальные движения); при большой ширине блока фундамента – штамповые складки; деформации, связанные с подъемом флюидов. Отдельно выделим типы деформаций, связанные со сдвиговыми смещениями – отрицательные и положительные «цветочные» структуры (рис.35), обнаруженные в пассивных частях трансформных разломов. Данные о разнице скоростей спрединга вдоль САХ позволяют предположить, что сдвиги в пассивных частях трансформных разломов возможны и теоретически.

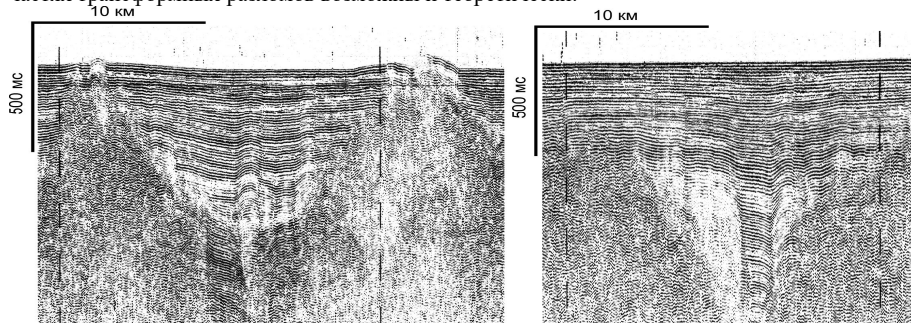


Рис.35. Типы деформационных структур, связанные с положительными и отрицательными «цветочными» структурами в пассивных частях трансформных разломов, по данным НСП 9-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 1990).

Деформации, связанные с отрицательными вертикальными движениями, свойственны флангам САХ, где наиболее интенсивно происходит остывание литосферы, но, так как в этих областях слабо развит осадочный покров, их трудно выделить по его нарушениям. Отрицательные движения также встречаются при возникновении трансенсии в пассивных частях разломов. Особо отметим аномалии напластования осадочного материала, связанные с контурными течениями и турбидитными потоками, не имеющими тектонической природы. На практике в изученной котловине есть области, где эта сейсмифация практически не наблюдается. Наиболее распространенными по частоте встречаемости видами деформаций осадочного чехла в пределах района работ 9-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» являются: вертикальные акустические осветления (газовые трубы), штамповые складки, структуры протыкания, взбросовые нарушения, чешуйчато-надвиговые структуры, горизонтальные акустические осветления сейсмической записи.

5.13. *Общее пространственное распределение деформаций*

Общее пространственное распределение деформационных и других аномальных видов сейсмической записи показывает их максимальную концентрацию в зонах повышенной макротрещиноватости над «холодными» блоками (см. рис.13, врезка), 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.

5.14. *Распределение сдвиговых деформаций*

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, указывающие на транспрессионный режим, расположены на изгибе разломов Марафон и Меркурий, обрамляющих с севера структурную зону типа «кинк-банд». Внутри этого обрамления редкие проявления отрицательных «цветочных» структур указывают на локальную компоненту растяжения в мозаичном распределении напряжений. С юга район исследований обрамляется западной пассивной частью разлома Вима, в которой в поле альтиметрии и по данным НСП наблюдается медианный хребет, указывающий на существование сдвига со сжатием. Таким образом, условия транспрессии наблюдаются в большинстве пассивных частей разломов, обрамляющих зону «кинк-банд» структур.

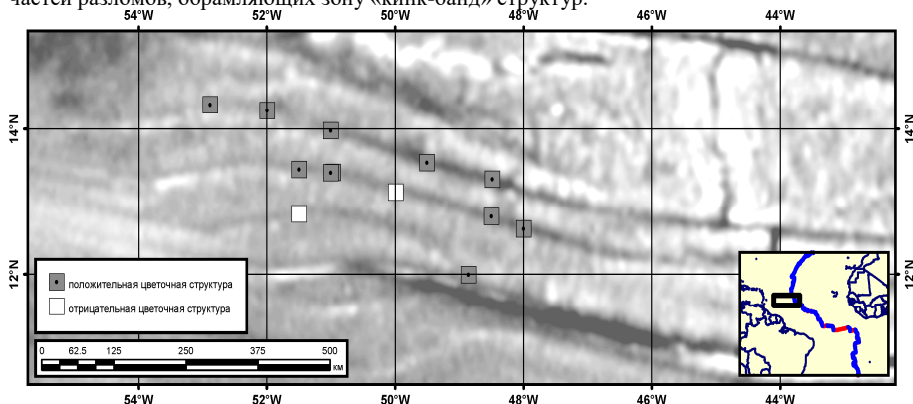


Рис.36. Пространственное распределение сдвиговых деформаций цветочного типа в осадочном чехле разломных трогов, обнаруженных по данным 9-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 1990). Для топосновы использована спутниковая альтиметрия (Sandwell, Smith, 2009). На врезке показано положение основного планшета.

5.15. Корреляция деформаций с геофизическими полями

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. Сходное распределение наблюдается для положительных «цветочных» структур (в трогах разломов) (см. рис.36) и для структур протыкания, штамповых складок (рис.37), надвиговых форм, взбросов (в межразломных блоках и вдоль их бортов). При этом формируется мозаичная картина с минимумом встречаемости и амплитуды этих структур в центральной части района между 50°30' и 48°30' з.д., указывая на возможный характер распределения напряжений. Особенностью распределения взбросо-надвиговых форм является субширотная вергентность переменного направления. Сопоставление с намагненностью указывает на прямую связь высот структур протыкания с ее интенсивностью и развитием процессов серпентинизации. Ширина штамповых складок имеет обратную зависимость от намагненности, показывая на тенденцию к формированию протрузий при небольшой ширине зон серпентинизации (см. рис.37).

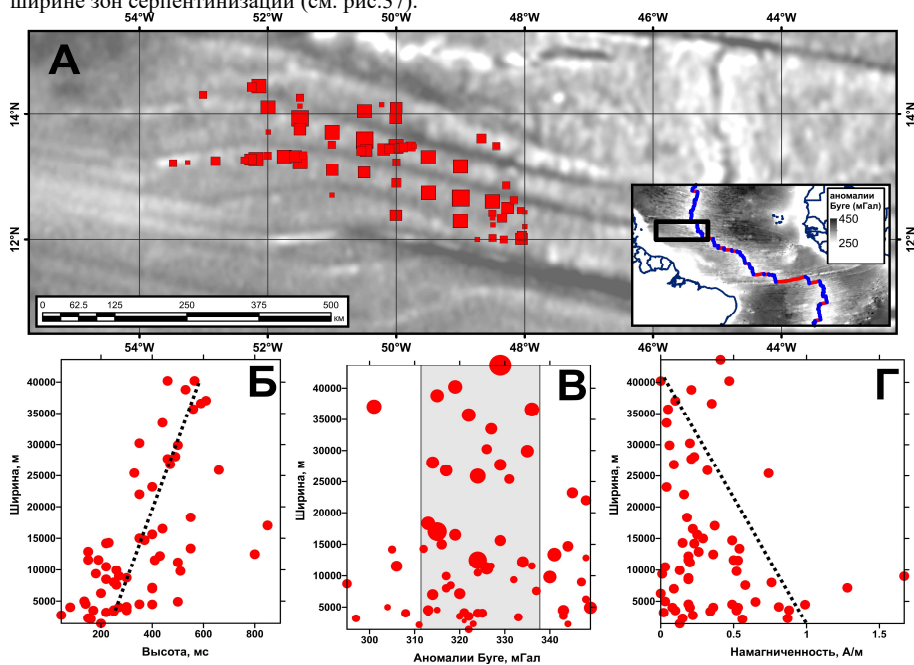


Рис.37. Штамповые складки в ЭСА к западу от САХ по данным 9-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 1990): А – общее пространственное распределение штамповых складок (центры), отградуированных по высоте складок; Б – корреляция высоты и ширины складок; В – корреляция ширины складок и аномалий Буге, размер символа отградуирован по высоте складок; Г – корреляция ширины складок с намагненностью, рассчитанной по данным АМП и рельефа. Пунктиром показаны тренды; заливкой дан интервал аномалий Буге с увеличенной встречаемостью складок. На врезке показано положение основного планшета на обычных аномалиях Буге.

Отсутствие связи намагненности и взбросо-надвиговых форм указывает на их преимущественно сдвиговый генезис. Сопоставление с аномалиями Буге показывает

развитие деформаций в диапазоне значений $\sim 310\text{--}340$ мГал, который ниже фонового для соседних абиссальных котловин (рис.37, врезка), что указывает на связь деформационных объектов (5-й элемент цепочки внутриплитных явлений) с разуплотнением (4-й элемент) и механизмом его формирования (1-й и 2-й элементы) 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 достаточно мощный осадочный чехол для их выявления по характерным видам сейсмической записи.

Распределение аномалий, связанных с флюидным фактором (6-й элемент), показывает, что они наблюдаются повсеместно в пределах интервала 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 (рис.38) с возрастом и развитием процессов серпентинизации.

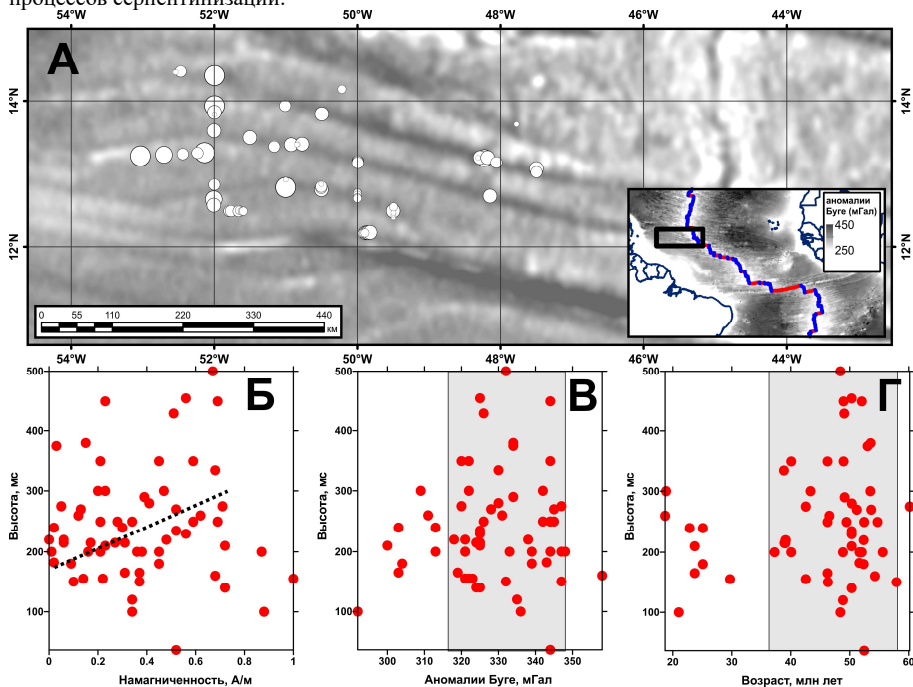


Рис.38. Вертикальные акустические осветления (газовые трубы) в ЭСА к западу от САХ по данным 9-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 1990): А – общее пространственное распределение газовых труб, отградуированных по их ширине; Б – корреляция высоты газовых труб с намагниченностью, рассчитанной по данным АМП и рельефа; В – корреляция высоты газовых труб и аномалий Буге; Г – корреляция высоты газовых труб и возраста. Пунктиром показан тренд. Заливкой даны интервалы аномалий Буге и возраста с увеличенной встречаемостью газовых труб. На врезке показано положение основного планшета на обычных аномалиях Буге.

Это говорит о том, что аномалии записи, связанные с потерей акустической стратификации за счет проникновения флюида, сформированы одним и тем же источником, но выводятся из фундамента в слабоконсолидированную осадочную толщу по различным

системам трещин. И трубы и линзы имеют практически одинаковую высоту и мощность в осадках, что указывает на одинаковую скорость проникновения флюида вверх по разрезу. Сопоставление с намагнитченностью показывает их закономерный рост со всплесками амплитуд в двух интервалах намагнитченности. Особо отметим странное, практически полное отсутствие флюидных аномалий над фундаментом с возрастом моложе 40 млн лет, область которого примерно совпадает с областью уменьшенной амплитуды тектонических деформаций, отмеченной выше (см. рис.36). Это может происходить либо из-за специфики проникновения флюида из фундамента в осадок, формирующей запаздывание в формировании флюидных аномалий, либо из-за специфики напряжений в литосфере, при которой в зоне обрамления «кинк-банд» структуры формируются участки с локальным растяжением, облегчающим процесс выделения флюида.

5.16. Схема геодинамики

Западная часть северного сегмента ЭСА, расположенная в области отрицательных значений атрибута $\delta(V_p/V_s)$, а также проявлений трансформных разломов с большим латеральным смещением сегментов САХ и общим разуплотнением между разломами 15°20' и Вима имеет увеличенные на 10% скорости спрединга по сравнению с сегментами плиты к северу и югу (рис.39). Вдоль пассивных частей разломов 15°20' и Вима обозначены сдвиговые смещения правого и левого вида соответственно. Заложение Анtilьской дуги имеет возраст ~10 млн лет, и ее воздействие на северный сегмент ЭСА приводит к формированию «кинк-банд» зоны, меняющей конфигурацию пассивных частей трансформных разломов в интервале широт дуги.

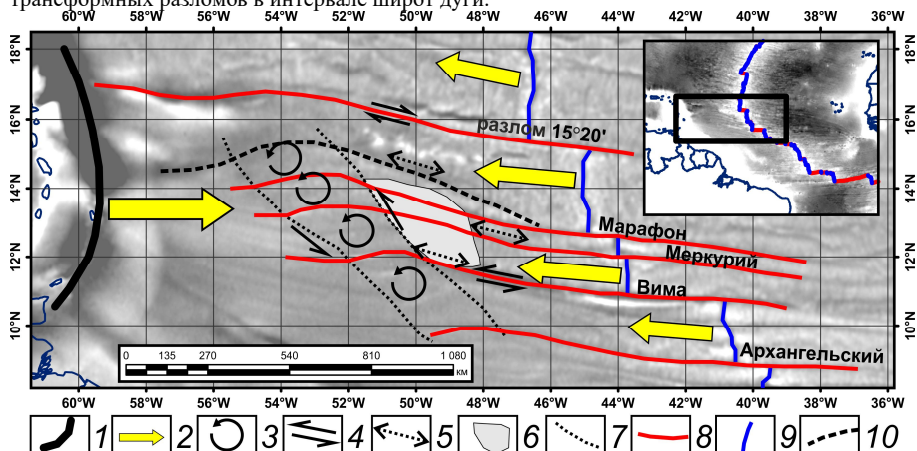


Рис.39. Схема геодинамики в ЭСА к западу от САХ. На врезке показано положение основного планшета на обычных аномалиях Буге. 1 – Анtilьская дуга; 2 – направление воздействия Анtilьской дуги и движение плиты от САХ; 3 – проворот блоков против часовой стрелки; 4 – сдвиговые смещения; 5 – сдвиговые смещения с переменным направлением; 6 – область минимума деформаций; 7 – граница «кинк-банд» зоны; 8 – трансформные разломы; 9 – ось рифта; 10 – параллельное ответвление разлома.

При формировании «кинк-банд» зоны возникают смещения блоков литосферы с элементами поворота против часовой стрелки. Возникают деформации, связанные со сжатием и вертикальным подъемом фрагментов коры, и образуются локальные растяжения, облегчающие дегазацию эндогенного флюида. Субширотно ориентированные чешуйчатонадвиговые формы с различной вергентностью указывают на неравномерность и переменное направление сдвиговых смещений при латеральном воздействии на межразломные блоки. Суперпозиция общего вектора движения плиты от САХ с воздействием Анtilьской дуги

формирует восточнее «кинк-банд» зоны область, где деформации имеют минимальное проявление, а максимальные амплитуды деформаций сконцентрированы в ее периферии и «кинк-банд» зоне. Формирование «кинк-банд» зоны произошло вдоль возрастного диапазона фундамента от 70 до 50 млн лет, обладающего изначально заданной неоднородностью, возникновение которой объясняется отскоком Эйлеровых полюсов плит обрамления Атлантики в этот временной интервал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ принципиальных расхождений рабочей геодинамической модели с накопленными фактическими данными показал актуальность основного положения модели – горизонтального перемещения плит. Вместе с тем, те же фактурные компиляции для внутриплитного пространства, содержащие деформационные структуры, показали нарастающее их расхождение с другим положением модели – жесткостью плит. В научной литературе в XXI веке устоялся подход, рассматривающий литосферу как оболочку с расслоенным и блоковым строением, которое допускает независимое горизонтальное и вертикальное смещение фрагментов литосферы друг относительно друга в пределах основной плиты. С этих позиций адаптация внутриплитных деформационных структур в модифицированную геодинамическую модель становится реалистичной. Анализ факторов тектогенеза, которые были обозначены в рабочей парадигме как основные, в Атлантике выглядят малозначащими для интерпретации внутриплитных структур. Это допускает наличие дополнительных сил, имеющих тангенциальную (субгоризонтальную) компоненту, которая может обеспечить дифференцированное объемное воздействие на фрагменты плит. Энергетически процессы тектогенеза с горизонтальной компонентой обеспечены избыточно, но механизмы реализации не вполне ясны. Исследование внутриплитных деформационных структур показывает, что наблюдаемую картину можно объяснить суперпозицией объемных тангенциальных сил различного генезиса и, в ряде районов, растеканием ветвей плюмов под литосферой. Этот подход требует дальнейшего развития и в настоящий момент не является полностью разработанным. Тем не менее, основа, указывающая на существование дополнительных факторов тектогенеза и объемных сил, имеется, и внутриплитные деформации, возникновение которых объяснимо с их помощью, закартированы.

По данным набора геофизических полей и сейсмических записей в работе обосновано введение дополнительных элементов в легенду тектонической карты ЭСА и построена ее новая версия. Предыдущая версия была построена в 1998 году А.О. Мазаровичем (Мазарович, 2000). Обособление ЭСА в геодинамических характеристиках и данных сейсмотомографии позволяет ввести дополнительные тектонические элементы, отражающие это обособление на поверхности дна. Полученная обновленная тектоническая карта может быть дополнена возрастной нагрузкой, отражающей время формирования фундамента, но время формирования наложенных деформационных структур в текущей версии осуществить не представляется возможным.

Основной материал, использованный в работе, представлен полученным в экспедициях ГИН РАН геофизическим полигонным и маршрутным промером в ЭСА, плотность которого превышает международные данные, а в ряде районов ЭСА является единственной информацией о строении дна. Анализ этого материала был выполнен таким образом, чтобы проиллюстрировать гетерогенность строения Атлантики и ЭСА в ее пределах на различных масштабных уровнях: глобальном, региональном и детальном. Глобальные данные показывают обособление ЭСА в общей структуре океана, региональные – его соотношение со структурами обрамления, детальные – мозаику деформационных структур в его пределах. Поскольку наиболее обоснованным направлением причинно-следственной последовательности является воздействие глубинного геодинамического состояния на структуры поверхности, порядок анализа использованных в работе данных был выстроен от глобальных и наиболее глубинных параметров (глава 3) через региональные (глава 4) к

детальным (глава 5). В соответствии с этим могут быть сформулированы защищаемые положения и выводы работы.

Защищаемые положения

1. Латеральные вариации геодинамического состояния верхней мантии под срединно-океаническим хребтом и котловинами Атлантического океана, определенные через отношение скоростей продольных и поперечных волн, отражают гетерогенность глубинного строения и определяют макротрещиноватость, изменение геометрии главных тектонических элементов, деформации фундамента и осадочного чехла, неоднородность горизонтальных смещений и скоростей спрединга, сейсмичность, сочетания геофизических характеристик и состав продуктов магматизма

Комментарий. Механизмом указанной связи может быть либо вовлечение в движение поверхностного слоя существенно большей мощности, чем литосфера, и его «заякоривание» на «холодных» линзах в мантии, либо увеличение геодинамической подвижности за счет наложения ветвей плюмов на фоновое «холодное» состояние мантии. Возможное воздействие дополнительных сил с объемной тангенциальной компонентой на неоднородную внутри плиты поверхностную оболочку может формировать сдвиговые смещения в ее пределах.

2. В экваториальном сегменте Атлантического океана по сейсмическим данным и геофизическим полям установлены положительные вертикальные движения блоков фундамента, возникающие при серпентинизации пород верхней мантии. Происхождение внутриплитных деформаций и зон дегазации в осадочной толще связано с разуплотнением, выделением флюидов и дополнительной намагниченностью пород верхней части фундамента, неоднородным состоянием верхней мантии и макротрещиноватостью.

Комментарии. Глубинные характеристики, термальное состояние мантии и возможность проникновения воды по зонам с повышенной макротрещиноватостью создают возможность развития вторичных процессов: серпентинизации, разуплотнения, химической остаточной намагниченности, деформаций коры с вертикальным подъемом блоков фундамента, отраженных в сейсмических записях осадочного чехла, и генерацией флюидов, формирующих в осадочном чехле аномальные записи с акустическим осветлением.

3. За пределами Срединно-Атлантического хребта выявлены внутриплитные деформации, которые в условиях сдвигов в комбинации со сжатием и растяжением формируют «цветочные», чешуйчато-надвиговые, взбросовые и диапировые структуры, медианные хребты, штамповые складки и другие структуры, сопровождающиеся акустическим осветлением осадочной толщи в форме линз и «газовых труб» и подъемом блоков фундамента в среднем на 400 м.

Комментарии. Большинство деформаций сдвигового парагенеза привязаны к трогам пассивных частей трансформных разломов и имеют современный и новейший возраст. Проявления деформаций в пространстве имеют псевдопериодический характер, который, возможно, связан с этапами метаморфических преобразований мантийного вещества при остывании. Амплитуда движения структур указывает на глубину и объем преобразования вещества мантии. Сформированные плотностные неоднородности определяют нарушение изостатического равновесия за пределами САХ, которое в дальнейшем выравнивается. В ЭСА данный процесс осложнен воздействием Антильской дуги и переменным характером направления сдвиговых смещений.

Обобщающий вывод

На основе анализа разномасштабных геофизических полей предлагается следующая причинно-следственная последовательность процессов, определивших внутриплитные геодинамические явления. (1) Контрастное (по латерали) геодинамическое состояние мантии обуславливает неоднородные горизонтальные и вертикальные движения, которые в остывающей со временем литосфере определяют положение зон повышенной макротрещиноватости и сдвиговых деформаций и изостатическую компенсацию локальных смещений. (2) Вода проникает по разрывам в верхнюю мантию, где возникают условия для

серпентинизации пород с образованием зон разуплотнения, локальных отрицательных гравитационных аномалий и повышенной намагниченности. (3) Разуплотнение приводит к деформациям подъема блоков фундамента и осадочного чехла и генерации флюидов. (4) Происходят аккумуляция флюидов в осадочном чехле и их прорывы в водную толщу, образуются аномалии сейсмоакустической записи.

Комментарии. Указанная последовательность базируется на реальных данных различной детальности, анализ которых был проведен в работе. Реализация процессов, перечисленных в этой цепочке, возможна при наличии блокового и расслоенного строения литосферы в условиях дифференцированного по направлению и глубине объемного горизонтального геодинамического воздействия.

Наиболее значимые работы по теме диссертации

- Дмитриев Л. В., Соколов С. Ю., Мелсон В. Г., О'Хирн Т.* Плюмовая и спредингвая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта // Российский журнал наук о Земле. 1999. Ноябрь. Т.1. №.6. С.457-476
- Дмитриев Л. В., Базылев Б. А., Силантьев С. А., Борисов М. В., Соколов С. Ю., Буго А.* Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т.1. №.6. С.511-519.
- Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю.* Геодинамика трех контрастных типов магматизма океана и их отражение в данных сейсмотомографии // Петрология. 2003. том 11. № 6. С. 655-672.
- Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Плечова А.А.* Статистическая оценка вариаций состава и Р-Т условий эволюции базальтов срединно-океанических хребтов и их региональное распределение // Петрология. 2006. Том.14. №3. С.227-247.
- Ефимов В.Н., Соколов С.Ю., Ефимов П.Н., Гасперини Л., Лиджи М.* Особенности строения поперечного хребта в пассивной части разлома Романш // Докл. РАН. 1996. Т. 348. № 6. С. 786-789.
- Зайончек А.В., Брекке Х., Соколов С.Ю. и др.* Строение зоны перехода континент-океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24, 25 и 26 рейсов НИС «Академик Николай Страхов», 2006-2009 гг.) // Строение и история развития литосферы. Вклад России в Международный Полярный Год. Том.4. М.: Paulsen. 2010. С.111-157.
- Мазарович А.О., Кольцова А.В., Соколов С.Ю., Ефимов В.Н.* Строение пассивной части разлома Страхова на востоке Срединно-Атлантического хребта // Докл.РАН. 1996. Т. 349. № 4. С. 511-515.
- Мазарович А.О., Агапова Г.В., Ефимов В.Н., Лиджи М., Соколов С.Ю., Турко Н.Н., Рихтер А.А.* Пассивные части трансформных разломов Атлантического океана между 16° с.ш. и экватором // Геотектоника. 1997. № 5. С. 85-94.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Новейшие деформации осадочного чехла в пассивных частях разломов Архангельского, Долдрамса и Вернадского (Атлантический океан) // Докл.РАН. 1997. Т. 357. № 6. С.801-804.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте // Литология и полезные ископаемые 1998. № 4. С. 436-439.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Разломы Ангольской котловины // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т.1. № 3. С.251-269
- Мазарович А. О., Соколов С. Ю., Агапова Г. В., Добролюбова К. О., Ефимов В. Н.* Компьютерные технологии как инструмент получения новой информации о строении океанических разломов (на примере активной части разлома Сан-Паулу, Центральная Атлантика) // Российский журнал наук о Земле. 2001. Т. 3. №.1. С.69-89.
- Мазарович А.О., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н., Соколов С.Ю., Турко Н.Н.* Разлом Богданова в Центральной Атлантике - первое описание (рельеф и осадки) // Геотектоника. 2001. № 6. С. 75-83.

- Мазарович А.О., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н., Соколов С.Ю., Турко Н.Н.* Рельеф и деформации океанической коры южнее островов Зеленого Мыса (Атлантический океан) // Докл.РАН. 2001. Т. 379. № 3. С.362-366.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Разломные зоны северо-западного простираения Центральной Атлантики // Геотектоника. 2002. № 3. С. 87 - 94.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Анизотропия внутриплитных деформаций Атлантического океана // Современные проблемы геологии. М.: Наука, 2004. С. 221-250. (Тр.ГИН РАН. Вып. 565)
- Сколотнев С.Г., Турко Н.Н., Соколов С.Ю. и др.* Новые данные о геологическом строении зоны сочленения Зеленомыского поднятия, котловины Зелёного мыса и подводных гор Батиметристов (Центральная Атлантика) // Докл. РАН. 2007. Т. 416. № 4. С. 525–529
- Соколов С.Ю., Ефимов В.Н., Мазарович А.О., Аверьянов С.Б., Ерофеев С.А., Евграфов Л.М., Бортолуцци Д., Гасперини Л., Лиджи М.* Строение осадочного чехла на западе Африкано-Антарктического хребта (южная Атлантика) // Докл.РАН. 1999. Т. 366. №.2. С.231-235.
- Соколов С.Ю., Мазарович А.О.* Газогидраты в осадочном чехле пассивных океанических окраин: возможности прогноза по данным спутниковой альтиметрии в Атлантике и Арктике // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 5. С. 483–492.
- Соколов С.Ю.* Структура мантии по данным томографии на трансатлантическом субширотном профиле, пересекающем САХ на широте разлома Кейн // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. Материалы XLIII Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2010. С.293-296.
- Соколов С.Ю.* Тектоническая эволюция хребта Книповича по данным аномального магнитного поля // ДАН. 2011. Т. 437. № 3. С. 378–383.
- Соколов С.Ю., Трифионов В.Г.* Роль астеносферы в перемещении и деформации литосферы (эфиопско-афарский суперплюм и альпийско-гималайский пояс) // Геотектоника. 2012. № 3. С. 3–17.
- Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О., Добролюбова К.О.* Современная тектоническая обстановка северной части хребта Книповича, Атлантика // Геотектоника. 2014. № 3. С. 16–29.
- Соколов С.Ю.* Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмоотомографии и отношению скоростей Р и S волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2 (24). С. 55-67.
- Соколов С. Ю., Зарайская Ю. А., Мазарович А. О., Ефимов В. Н., Соколов Н. С.* Пространственная неустойчивость рифта в полиразломной трансформной системе Сан-Паулу, Атлантический океан // Геотектоника. 2016. № 3. С. 3–18
- 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.
- Соколов С. Ю.* Деформации осадочного чехла Экваториальной Атлантики и их сопоставление с геофизическими полями // Геотектоника. 2017. № 1. С. 81–96
- Соколов С.Ю.* Сдвиговый фактор тектогенеза в Атлантическом океане и его связь с геодинамическим состоянием верхней мантии и внутриплитными деформациями // Докл.РАН. 2018. Т. 480. №.5. С.573-577.
- Трифонов В.Г., Соколов С.Ю.* На пути к постплейт-тектонике // Вестник РАН. 2015. Т.85. № 7. С. 605–615
- Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu., Sokolov N.S.* Migration of the Azores superplume: geophysical and petrologic evidence // Russian Journal of Earth Sciences. V. 3. №. 6. December 2001. P. 395-404.
- 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.

Gasperini L., Bonatti E., Ligi M., Sartori R., Borsetti A., Negri A., Ferrari A., Sokolov S.Yu. Stratigraphic Numerical Modelling of a Carbonate Platform on the Romanche Transverse Ridge, equatorial Atlantic // *Marine Geology*. 1997. V. 36. Issue 3-4. P.245-257.

Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu., Turko N.N., Dobrolyubova K.O. Seafloor topography and structure of the rift zone of the Mid-Atlantic Ridge between 5° and 7°18'N // *Russian Journal of Earth Sciences*. Vol. 3. № 5. November 2001. P. 353-370.

Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu. Hydrothermal fields in the Mid-Atlantic ridge: Setting and prospects for futher discoveries // *Russian Journal of Earth Sciences*. Vol. 4. № 6. December 2002. P. 423-431.

Sokolov S.Yu., Sokolov N.S., Dmitriev L.V. Geodynamic zonation of the Atlantic Ocean lithosphere: Application of cluster analysis procedure and zoning inferred from geophysical data // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2008. V. 10. № 4. ES4001, doi:10.2205/2007ES000218. P.1-30

ОБРАЗЕЦ

ОТЗЫВ

На автореферат диссертации **Петрова Петра Петровича**

« **Название диссертации** »,

Представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности **указывается шифр и название специальности**

Текст, текст, текст, текст, текст, текст, текст, текст, текст, текст, текст, текст, текст...

Фамилия Имя Отчество

Ученая степень

Ученое звание

Должность, структурное подразделение

Полное наименование организации

Адрес: 000 000, г. _____, ул. _____, д. _____

Интернет сайт организации

Email: _____

раб. тел.: (000) 000-0000

Я, **Иванов Иван Иванович**, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

« ____ » _____ 2019 г.

Место печати

Подпись

Подпись Иванова И.И. заверяю (подпись заверяется заведующим канцелярией, с указанием его должности и фамилии, и скрепляется печатью организации).