

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Рыжова Дарья Александровна

**Строение тектоносферы подводных поднятий
Африкано-Антарктического сектора Южного океана
по геофизическим данным**

1.6.9 – Геофизика (геолого-минералогические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: *Булычев Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор*
Дубинин Евгений Павлович, доктор геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты: *Захаров Владимир Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор*

Тевелев Александр Вениаминович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор

Рашидов Владимир Александрович, кандидат технических наук, ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, лаборатория петрологии и геохимии, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится 3 марта 2023 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.6/2388>

Автореферат разослан «__» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Африкано-Антарктический сектор Южного океана включает юго-восточную часть Атлантического и юго-западную часть Индийского океанов (рис. 1). Его развитие связано с расколом юго-западной Гондваны: отделением Африки и Южной Америки от Антарктиды и раскрытием Атлантического и Индийского океанов. Район исследований представляет собой литосферный клин между литосферой Атлантического и Индийского океанов, ограниченный крупными разломными системами Агульяс-Фолклендской, Дью-Туа-Эндрю Бейн – Принц Эдуард и южным сегментом Срединно-Атлантического хребта. Неоднократные кинематические перестройки границ плит, сопровождаемые наложенной магматической активностью горячих точек, сформировали сложный морфоструктурный план дна океана и сложную картину аномальных потенциальных полей, отражающих гетерогенное строение коры и литосферы, обусловленное суперпозицией эндогенных процессов. Африкано-Антарктический сектор Южного океана является наименее изученной территорией с геофизической и геодинамической точки зрения, где существует немало вопросов, касающихся строения коры и литосферы. Выявление особенностей глубинного строения тектоносферы на основе анализа геофизической информации и понимание геодинамической природы морфоструктур этого «тектонического узла» является актуальной задачей морской геофизики и геодинамики. Здесь расположены разнообразные по условиям формирования и развития морфоструктуры:

- подводные поднятия разного генезиса: Мозамбикский и Мадагаскарский хребты, плато Агульяс, поднятие Метеор, хребет Агульяс и Шона;

- котловины: Мозамбикская, Мадагаскарская, Агульяс, Капская и Африканско-Антарктическая;

- срединговые хребты: Юго-Западный Индийский (ЮЗИХ), южный сегмент Срединно-Атлантического хребта (ЮСАХ) и Американско-Антарктический хребет (ААХ);

- палеосрединговый хребет Агульяс.

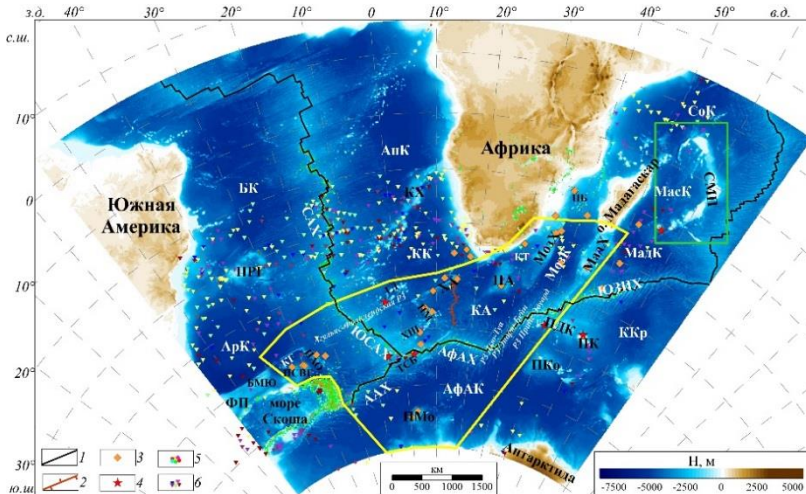


Рис. 1. Батиметрическая карта изучаемого региона по [Sandwell et al., 2014]. Желтой линией выделена область исследования. Зеленым прямоугольником выделено поднятие с хорошо изученными гетерогенными блоками коры. Условные обозначения: 1 – ось срединно-океанических хребтов; 2 – ось палеосрединного хребта; 3 – скважины глубоководного бурения (DSDP, ODP, IODP); 4 – горячие точки; 5 – сейсмическая активность разной магнитуды; 6 – данные теплового потока. Срединно-океанические хребты: ААХ – Американско-Антарктический, АФАХ – Африканско-Антарктический, САХ – Срединно-Атлантический, ЮЗИХ – Юго-Западный Индийский, ЮСАХ – южная часть Срединно-Атлантического, ТСБ – тройное соединение Буве; котловины: АнК – Ангольская, АрК – Аргентинская, АФАХ – Африканско-Антарктическая, БК – Бразильская, КА – Агульяс, КГ – Георгия, КК – Капская, ККр – Крозе, КТ – Транскей, МадК – Мадагаскарская, МасК – Маскаренская, МозК – Мозамбикская, СоК – Сомалийская; асейсмические хребты: КХ – Китовый, МадХ – Мадагаскарский, МозХ – Мозамбикский, ХА – Агульяс, ХШ – Шона; поднятия: БМЮ – банка Мориса Юинга, ГД – подводные горы Дискавери, ПАО – Айлос Оркадас, ПБ – Бейра, ПДК – Дель-Кано, ПК – Крозе, ПКо – Конрад, ПМ – Метеор, ПМо – Мод, ПРГ – Риу Гранди, ПСВГ – Северо-Восточная Георгия; плато: ПА – Агульяс, СМП – Сейшельско-Маскаренское, ФП – Фолклендское

Перечисленные структуры различаются по своим геофизическим характеристикам и морфологической выраженности, и представляют собой линейно-вытянутые и дугообразные хребты и плато, сложенные как утоненной континентальной корой, так и утолщенной океанической. Многочисленные подводные горы и поднятия образуются как на современных, так и на палеограницах плит вблизи срединно-океанических хребтов и трансформных разломов.

Геологические и геофизические данные свидетельствуют о различном глубинном строении коры и тектоносферы исследуемых структур и их различном происхождении [Allen, Tucholke, 1981; Barker, 1979; Barrett, 1977; Ciesielski et al., 1988; Coffin, Eldholm, 1994; Fisher et al., 2017; Goul, Uenzelmann-Neben, 2001; Gohl et al., 2011; Kristoffersen, LaBrecque, 1991; LaBrecque, Hayes, 1979; Marks, Stock, 2001; Marks, Tikku, 2001; Parsiegla et al., 2008; Roex et al., 2010; Scrutton, 1973; Sleep, 2002; Tucholke et al., 1981; Uenzelmann-Neben et al., 1999; Zhang et al., 2011].

Обширный банк открытых геолого-геофизических материалов, отражающих последние достижения региональной геофизики и геологии, позволяет актуализировать и выявить строение коры и литосферы отдельных структур с разной детальностью, и на базе анализа созданных плотностных моделей восстановить условия формирования подводных поднятий и развития исследуемого региона в свете пространственно-временной эволюции.

Степень разработанности

Знание особенностей эволюции спрединга морского дна между Африкой, Южной Америкой и Антарктидой является ключом к пониманию первоначального распада Гондваны. На сегодняшний день существует ряд моделей реконструкции Гондваны и отдельных поднятий, основанных на геофизических данных [LaBrecque et al., 1987; Cox, 1992; Lawver et al., 1998; Дубинин и др., 1999; Reeves, Wit, 2000; Eagles, König, 2008; Parsiegla et al., 2008; König, Jokat, 2010; Vérard et al., 2012; Leinweber, Jokat, 2012; Reeves et al., 2016; Hahyu et al., 2017; Mueller, Jokat, 2019]. В тоже время, многие вопросы формирования, строения и эволюции подводных поднятий остаются дискуссионными.

Наличие в открытых источниках геолого-геофизической информации (batimетрические данные, данные о гравитационных и магнитном полях, сейсмические и др. данные), полученной в ходе экспедиций советских, российских и зарубежных ученых, оказало существенное влияние на изучение строения коры и эволюции подводных поднятий Африкано-Антарктического сектора Южного океана. Значительный вклад в исследование структур и эволюции юго-восточной части Атлантического и юго-западной части Индийского океанов внесли Гайнанов А.Г., Пуцаровский Ю.М., Лейченков Г.Л., Удинцев Г.Б., Ушаков С.А., Шрейдер А.А., Хаин В.Е., Дубинин Е.П., Булычев А.А., Литвин В.М., Сушевская Н.М., Соколов С.Ю., Кристоферсен Ю., Лабрек Дж.Л., Пейве А.А., Бонати Э., Хейс Д.Е., Раймонд К.А., Роекс А.Л., Йокат В., Мюллер Р.Д., Голь К., Эванс Х.Ф. и многие другие.

Объект исследования

Объектами исследования настоящей работы являются подводные поднятия и литосфера Антарктического сектора Атлантического океана и юго-западной части Индийского океана. Наибольшее внимание уделено поднятиям Африкано-Антарктического сектора Южного океана, к которым относятся: асейсмические хребты (Мозамбикский и Мадагаскарский), плато (Агульяс и Сейшельско-Маскаренское), срединный хребет ЮСАХ, поднятие Метеор и сопряженное с ним поднятие Айлос Оркадас. Исследуемые поднятия различаются по строению коры и литосферы, морфологии и происхождению.

Цели и задачи

Цель исследования: на основе анализа геофизической информации выявить особенности глубинного строения подводных поднятий и котловин Африкано-Антарктического сектора Южного океана и установить условия их формирования в свете пространственно-временной эволюции литосферы этого региона.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Анализ геолого-геофизических данных на акваторию Антарктического сектора Атлантического и юго-западную часть Индийского океанов;
2. Выявление геофизических характеристик подводных поднятий с разной морфологией;
3. Анализ моделей эволюции литосферы региона и изучаемых морфоструктур данной области исследования;
4. Построение плотностных моделей тектоносферы на основе геолого-геофизической информации и выявление особенностей строения коры подводных поднятий;
5. Построение схемы структурного районирования литосферы региона на основе анализа аномальных гравитационных и магнитного полей.

Новизна исследования

Полученные в работе результаты легли в основу построения схемы структурного районирования и новых моделей строения коры и литосферы подводных поднятий различных типов.

На основе анализируемой информации аномального гравитационного и магнитного полей установлено, что:

1. Мозамбикский и Мадагаскарский хребты имеют различия в строении тектоносферы. Мадагаскарский хребет представляется блоками базальтовой океанической коры, утолщенной за счет

андерплейтинга. Мозамбикский хребет сложен утоненной континентальной корой на севере и корой смешанного типа на юге.

2. Плато Агульяс было образовано как крупная магматическая провинция вместе с поднятиями Северо-Восточная Георгия и Мод под действием горячей точки Буве. На севере плато вероятно сложено утоненной континентальной корой, на юге – утолщенной океанической.

3. Поднятия Айлос Оркадас и Метеор характеризуются утолщенной океанической корой, сформировавшейся под действием горячей точки Шона.

4. Строение коры подводных поднятий зависит от условий их образования, связанных с реорганизацией границ плит и магматической активностью горячих точек.

5. Схема структурного районирования Африкано-Антарктического сектора Южного океана, построенная на основе анализа потенциальных полей, показывает, что литосфера этого региона сложена гетерогенными блоками, сформированными на разных спрединговых хребтах и разделенными структурами палеограниц плит разных типов.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты являются частью решений фундаментальных задач по выяснению глубинного строения литосферы Африкано-Антарктического сектора Южного океана, строения коры подводных поднятий разного генезиса, а также геодинамической эволюции этого региона. Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что выделенные характеристики аномальных гравитационных и магнитного полей создают основу для построения схем районирования. На примере изученного региона определено место и роль плотностного моделирования при реконструкции условий формирования подводных поднятий. Используемый подход может быть применен в других регионах.

Методология и методы исследования

В исследовании использованы:

- цифровые модели батиметрических данных Глобальной батиметрии (Global Predicted Bathymetry) [Sandwell et al., 2014], GEBCO [Weatherall et al., 2015, <https://www.gebco.net/>], а также ETOPO1 [Amante, Eakins, 2009];
- аномалии силы тяжести в свободном воздухе модель Д.Сандвелла [Sandwell, 2014] и модель WGM2012 [Balmino, 2012];
- модели аномального магнитного поля EMAG2 [Maus et al., 2009], EMAG2v3 [Meyer et al., 2017], WDMAM [Lesur et al., 2016,

<https://wdmam.org/>;

- модель земной коры GEMMA [Reguzzoni et al., 2014];
- данные о мощности осадков [Whittaker, 2013; Straume et al., 2019];
- превышения геоида над эллипсоидом относимости [Palvis et al., 2008, Barthelmes, 2013].

Помимо этого, в работе использовались модели сейсмотомографии LLNL-G3Dv3 [Simmons et al., 2012] и SL2013sv [Schaeffer, Lebedev, 2013], а также материалы, хранящиеся в базе данных GEODAS [<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/>].

Кроме этого, для более полного анализа и углубленной интерпретации геофизических данных рассчитано аномальное гравитационное поле в редукции Буге, с помощью программ, разработанных на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ [Булычев и др., 1998, Булычев и др., 2002]. В этой работе рассмотрены аномалии поля силы тяжести в редукции Буге с плотностями $\sigma_{cl}=2.67$ г/см³ и $\sigma_{cl}=2.80$ г/см³. Далее, для разделения полученных аномалий силы тяжести в различных редукциях и аномалий магнитного поля на составляющие были использованы различные линейные трансформации, среди которых пересчет полей в верхнее и нижнее полупространство, метод Саксова-Нигарда, полосовые частотные фильтрации, а также вычисление вертикального градиента. На основе анализа геолого-геофизической информации и трансформант полей проведено плотностное моделирование исследуемых структур.

Построение плотностных моделей по данным аномального гравитационного поля осуществлялось в программных комплексах TG- 2 [Булычев, Зайцев, 2008] и GravMagInv2D [Чепиго, 2019]. Первое программное обеспечение предназначено для интерактивного подбора в рамках блоковых моделей (с постоянной плотностью), во втором – реализованы как полигональные, так и сеточные (грид) модели. Приложение GravMagInv2D характеризуется более высокой скоростью счета и было использовано для моделирования по трансатлантическим профилям, отличающиеся первоначальной сложностью разреза по сравнению с остальными моделями.

Защищаемые положения

1. Совокупность геофизических характеристик и диапазон их вариаций служат индикаторами особенностей строения коры и разных условий происхождения подводных поднятий Африкано-Антарктического сектора Южного океана.

2. Глубинные модели строения коры и литосферы, полученные на основе плотностного моделирования, позволяют выявить основные

типы коры, слагающие подводные поднятия и прилегающие котловины.

3. Структурное районирование аномальных гравитационных и магнитного полей свидетельствует о том, что литосфера Африкано-Антарктического сектора Южного океана сложена гетерогенными блоками, которые сформированы на разных спрединговых хребтах и разделены подводными поднятиями и палеограницами плит разных типов.

4. Вариации геофизических характеристик аномальных полей, плотностное моделирование и структурное районирование литосферы вместе с анализом пространственно-временных вариаций тектономагматической активности позволяют выявить основные типы подводных поднятий, различающихся строением коры, условиями формирования и эволюцией: современные спрединговые и палеоспрединговые хребты; хребты, частично отделенные от континента; хребты, сформированные в результате плюмового магматизма и сложенные утолщенной океанической корой; поднятия, образованные при формировании нового спредингового хребта на старой океанической литосфере в результате перескока оси спрединга; погруженные плато и поднятия, представляющие собой фрагменты крупной магматической провинции; микроконтиненты.

Степень достоверности

Полученные в ходе написания настоящей работы результаты основаны на современных геолого-геофизических данных [Barthelmes, 2013; Heath, 1984; Maus et al., 2009; Meyer et al., 2017; Palvis et al., 2008; Reguzzoni et al., 2014; Sandwell et al., 2014; Schaeffer, Lebedev, 2013; Simmons et al., 2012; Straume et al., 2019; Whittaker, 2013], не противоречат существующим представлениям о тектоническом развитии Африкано-Антарктического сектора Южного океана и дополняют их. Проведенное плотностное моделирование строения коры и тектоносферы подводных поднятий совместно с анализом дополнительной геолого-геофизической информации подтверждают их гетерогенное строение и условия формирования.

Апробация результатов

Результаты исследований опубликованы в научных журналах, которые входят в список RSCI и доложены на научных конференциях и совещаниях:

- 9 и 10-я Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование: MARESEDU» – 2020, 2021 гг.;
- 27, 28 и 29-я Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» – 2020, 2021 и 2022 гг.;

- 4 и 5-я Международная геолого-геофизическая конференция и выставка: «ГеоЕвразия» – 2021, 2022 гг.;
- 53-е Тектоническое совещание – 2022;
- 48-е Заседание Международного научного семинара имени Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова – 2022 г.;
- 24-я Международная научная конференция (Школа) по морской геологии – 2022 г.

Личный вклад

В ходе исследований автором самостоятельно проведены:

1. Сбор и анализ априорной и новейшей геолого-геофизической информации о строении морфоструктур Африкано-Антарктического сектора Южного океана;
2. Составление единой базы геологических и геофизических данных на Африкано-Антарктический сектор Южного океана;
3. Расчёт дополнительных геофизических параметров, выбор информативных характеристик полей и анализ полученных результатов;
4. Плотностное моделирование строения тектоносферы по трансатлантическим и опорным профилям, пересекающим подводные поднятия разного генезиса;
5. Построение актуальной схемы структурного районирования Африкано-Антарктического сектора Южного океана по результатам анализа потенциальных полей.

Автором, в соавторстве с руководителями и сотрудниками кафедры, подготовлены статьи и тезисы докладов, отражающие основные результаты исследований. Выполнено их оформление для публикации, представление их в редакции журналов и переписка с редакторами. Результаты исследований представлены автором докладами на 10-ти международных конференциях и совещаниях.

Объем и структура работы

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение и список литературы, состоит из 144 страниц текста, 52 иллюстраций и 5 таблиц.

Поддержка работы

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 18-05-00127 и 18-05-00378) и Российского научного фонда проект № 22-27-00110.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность научным руководителям: доктору физико-

математических наук, профессору Андрею Александровичу Булычеву и доктору геолого-минералогических наук, профессору Евгению Павловичу Дубинину за многолетнюю всестороннюю поддержку и помощь в изучении глубинного строения Земли и эволюции океанических районов.

Автор искренне признателен сотрудникам кафедры геофизических методов исследования земной коры: Косныревой Марии Владимировне, Кузнецову Кириллу Михайловичу, Лыгину Ивану Владимировичу, Соколовой Татьяне Борисовне за всестороннюю поддержку и ценные советы при выполнении работы. За предоставление сейсмического материала автор благодарит доктора геолого-минералогических наук Соколова Сергея Юрьевича.

Слова особой благодарности автор выражает заместителю главного геолога по геологическому моделированию ООО «ИНГЕОСЕРВИС» Зайцеву Андрею Николаевичу и своим коллегам за огромную поддержку, оказанную при написании настоящей работы.

Отдельную благодарность за терпение, моральную поддержку и понимание автор выражает членам своей семьи и друзьям.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулированы актуальность, цели и задачи исследования.

Глава 1. Используемые геолого-геофизические материалы

Глава 1 разделена на восемь разделов, в каждом из которых рассматриваются существующие геолого-геофизические материалы.

В разделах *1.1.* и *1.2.* кратко описаны батиметрические и гравиметрические материалы разной детальности и точности. Указываются основные используемые в работе данные –Глобальная модель батиметрии (Global Predicted Bathymetry) [Sandwell, Smith, 2014] и аномалии силы тяжести в свободном воздухе, представленные Д. Сандвеллом [Sandwell et al., 2014]. Точность гравиметрической модели составляет ± 2 мГал. На основании этих данных рассчитаны аномалии силы тяжести в редукции Буге, а также различные трансформанты.

В разделе *1.3.* и *1.4.* рассмотрены основные модели аномального магнитного поля (EMAG2v2, EMAG2v3 и WDMAM [Maus et al., 2009; Meyer et al., 2017; Lesur et al., 2016]) и модели сейсмотомографии (LLNL-G3Dv3 [Simmons et al., 2012] и SL2013sv [Schaeffer, Lebedev, 2013]).

В разделах *1.5.* – *1.8.* представлено описание дополнительной геолого-геофизической информации:

- возраст океанического дна [Müller et al., 2008],

- мощность осадков [Whittaker et al., 2013],
- распределение теплового потока [Hasterok et al., 2021] и
- данные глубоководного бурения: Deep Sea Drilling Project (DSDP) [Simpson et al., 1974], Ocean Drilling Program (ODP) [Cooper et al., 2004] и International Ocean Discovery Program (IODP) [Hemming et al., 2017].

Глава 2. Гипотезы тектонического развития Африкано-Антарктического сектора Южного океана

По опубликованным данным [Fischer et al., 2017; Hanyu et al., 2017; Hoernle et al., 2016; König, Jokat, 2010; Kristoffersen, LaBrecque, 1991; Martin et al., 1982; Mueller, Jokat, 2019; Pérez-Díaz, Eagles, 2014; Parsieglia et al., 2008; Tikku et al., 2002] рассмотрена история раскрытия Антарктического сектора Южной Атлантики, которая показывает разнообразие и сложное строение исследуемого региона. Формирование непростого структурного плана следует из кинематических перестроек границ плит, сопровождаемых отмиранием старых и формированием новых спрединговых хребтов, а также проявлением плюмовой активности в Африкано-Антарктическом секторе Южного океана.

Глава 3. Геолого-геофизическая характеристика поднятий и их глубинное строение

В главе описаны разнообразные по истории возникновения и развитию структуры тектоносферы Африкано-Антарктического сектора Южного океана, которые сложены как океанической, так и утоненной континентальной корой. Геофизические характеристики подводных поднятий, использованные в качестве индикаторов особенностей строения их коры и разных условий происхождения обобщены в таблице 1. В качестве эталонного поднятия с гетерогенным строением коры использовано Сейшельско-Маскаренское плато. Проведенный анализ научной литературы по строению и эволюции изучаемых морфоструктур и геофизической информации показал, что:

- Сейшельско-Маскаренское плато на севере характеризуется пониженными значениями поля силы тяжести в свободном воздухе (до 70 мГал), что указывает на наличие утоненной континентальной коры и согласуется с теориями строения этого участка. Южная часть характеризуется интенсивными положительными аномалиями (до 450 мГал), свидетельствующими о магматической природе поднятия. Аномалии гравитационного поля в редукции Буге на севере варьируют от 30 до 150 мГал, а в южной части плато понижается до -100 мГал, что также не противоречит рабочей гипотезе геологического строения.

Таблица 1. Геолого-геофизические параметры структур антарктического сектора Южной Атлантики*
 КА – котловина Агульяс, ПА – плато Агульяс, ПАО – поднятие Айюс Оркадас, ПМ – поднятие Метеор, ПСВГ –
 поднятие Северо-Восточная Георгия, МозК/МозХ – Мозамбикская котловина/хребет, МаоК/МаоХ – Мадагаскарская
 котловина/хребет, ХА – хребет Агульяс, ХШ – хребет Шона, ЮСАХ – южная часть Срединно-Атлантического

Название/параметры	ПСВГ	ПАО	ЮСАХ	ПМ	ХШ	КА	ХА	ПА	МозХ	МозК	МаоХ
Возраст, млн лет	90 - 120	60 - 80	0 - 25	60 - 80	20 - 50	65 - 90	70 - 80	90 - 110	110 - 130	80 - 100	75 - 100
Поле силы тяжести в свободном воздухе $\Delta g_{\text{об.в}}$, мГал	20÷100 (35)	-10÷80 (20)	-30÷70 (20)	-10÷100 (35)	-70÷140 (55)	-30÷25 (10)	-60÷-20 (-40)	15÷55 (30)	20÷70 (35)	-30 ÷ 15 (-7.5)	20÷105 (40)
Поле силы тяжести в редукции Буге $\Delta g_{\text{Б}}$, мГал	290÷420 (350)	310÷450 (370)	140÷380 (290)	250÷400 (325)	90÷370 (340)	480÷625 (545)	480÷520 (500)	320÷430 (360)	250÷430 (330)	450÷610 (550)	200÷390 (295)
Низкочастотная компонента $\Delta g_{\text{н}}$, мГал	415÷465 (440)	465÷475 (470)	370÷400 (385)	430÷450 (440)	390÷420 (405)	480÷520 (500)	470÷500 (485)	370÷450 (410)	260÷320 (290)	460÷490 (475)	350÷390 (370)
Среднечастотная компонента $\Delta g_{\text{с}}$, мГал	-40 ÷ -10 (-25)	-55 ÷ -10 (-35)	-35 ÷ -5 (-20)	-75 ÷ -5 (-40)	-20 ÷ -10 (-15)	5÷25 (15)	10÷15 (12)	-30 ÷ 10 (-5)	-45 ÷ 10 (-18)	5÷30 (17)	-50 ÷ - 10 (-30)
Высокочастотная компонента $\Delta g_{\text{в}}$, мГал	-140÷-15 (-78)	-120÷-10 (-65)	-150÷-10 (-80)	-125÷-15 (-70)	-140÷-20 (-80)	-25÷40 (8)	-40 ÷ 20 (-10)	-80 ÷ -10 (-45)	-110÷-15 (-62)	-5÷60 (28)	-120÷-10 (-65)
Аномальное магнитное поле ΔT_a , нТл	-300÷450	-200÷300	-340÷280	-250÷500	-150÷120	-340÷350	-210÷180	-360÷590	-300÷500	-390÷450	-500÷400

*Приведены экстремальные значения (минимум—максимум), в скобках—среднее значение

- В северной части Мозамбикский хребет обладает низкой амплитудой аномалий гравитационного поля в свободном воздухе (до 35 мГал), что указывает на присутствие утоненной континентальной коры. К южному окончанию поднятия интенсивность этих аномалий повышается до 85 мГал, что свидетельствует о наличии магматических пород в земной коре, что связано с возможным влиянием плюма Кару на ее образование.

- Мадагаскарский хребет проявляется повышенными значениями, как гравитационных, так и магнитных аномалий, по сравнению с Мозамбикским хребтом, что указывает на утолщение океанической коры, обусловленное влиянием горячей точки Марион.

- Поднятия Айлос Оркадас и Метеор по форме аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе и редукции Буге и их интенсивности сходны, что свидетельствует об их одновременном формировании ~67 млн лет назад и наличии утолщенной океанической коры.

- Плато Агульяс, поднятия Северо-Восточная Георгия и Мод в поле силы тяжести в свободном воздухе характеризуются схожими положительными значениями аномалий интенсивностью от 55 до 80 мГал, что может указывать как на наличие утоненной континентальной коры, так и на утолщенную кору вследствие магматической активности. В магнитном поле исследуемые поднятия проявляются знакопеременными аномалиями амплитудой от -450 до +600 нТл различного направления, что подтверждает гипотезу о совместном их развитии под действием плюмовой активности.

Глава 4. Структурно-плотностное моделирование

В разделах 4.1. – 4.5. приведены плотностные модели и дано описание строения коры и литосферы на основе анализа плотностного моделирования по интерпретационным профилям, пересекающим изучаемые структуры.

Плотностное моделирование показало различное глубинное строение Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов (рис. 2). Мозамбикский хребет, по крайней мере в северной части, представлен утоненной континентальной корой ($2.70 - 2.80 \text{ г/см}^3$), а в южной — корой смешанного типа ($2.74 - 2.79 \text{ г/см}^3$), осложненной плюмовым магматизмом. Мощность земной коры Мадагаскарского хребта характеризуется близкими значениями с мощностью коры Мозамбикского хребта (22 км), но отличаются большими значениями плотности ($2.80 - 2.85 \text{ г/см}^3$), что, по всей видимости, обусловлено его магматической природой, связанной с деятельностью горячей точки. Хребты разделены древним Мозамбикским бассейном, имеющим

типичное строение и плотностные характеристики океанической коры (2.78 – 2.86 г/см³).

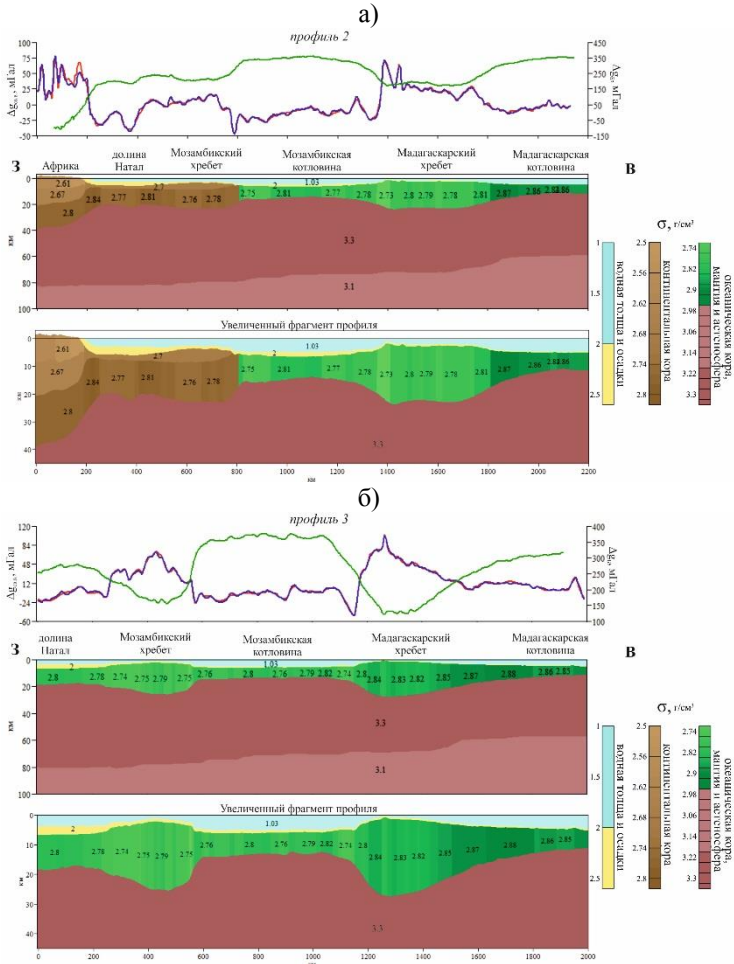
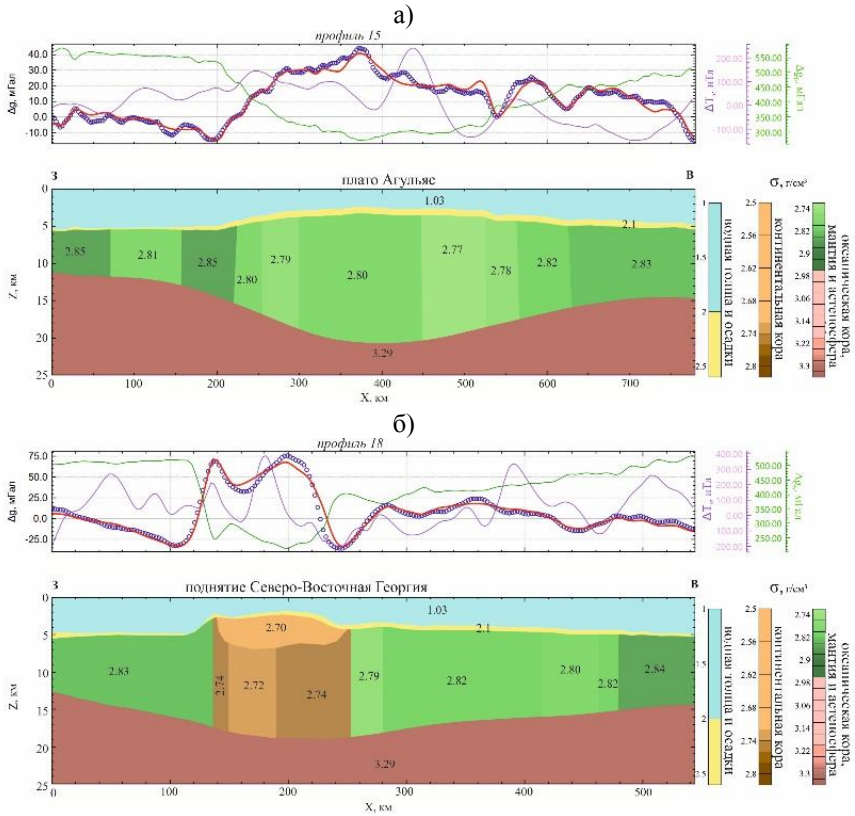


Рис. 2. Структурно-плотностная модель тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов вдоль профилей 2 (а) и 3 (б). Цифры на разрезе – значения плотности, г/см³. Графики: красный – рассчитанное поле силы тяжести в свободном воздухе; синий – наблюдаемое поле силы тяжести в свободном воздухе ($\Delta g_{св.в.}$, мГал); зеленый – поле силы тяжести в редукции Буге ($\Delta g_{Б}$, мГал).

Предположительно, плато Агульяс в северной части сложено утоненной континентальной корой, интродуцированной базальтовым

материалом, а на юге – сильно утоненной континентальной или утолщенной океанической корой, мощность которой увеличена под действием плюмового магматизма. Поднятие Северо-Восточная Георгия может включать в разной степени утоненную континентальную кору мощность и плотность, которой значительно варьирует за счет базальтовых внедрений и андерплейтинга, вызванных плюмовой активностью. Расположенное вблизи Антарктического континента поднятие Мод, характеризуется повышенной мощностью земной коры, что может быть связано со значительным влиянием плюмового магматизма в эпоху его формирования. Плотность блоков земной коры исследуемых поднятий варьирует от 2.70 г/см^3 до 2.85 г/см^3 , а мощность – от 18 до 24 км (рис. 3).



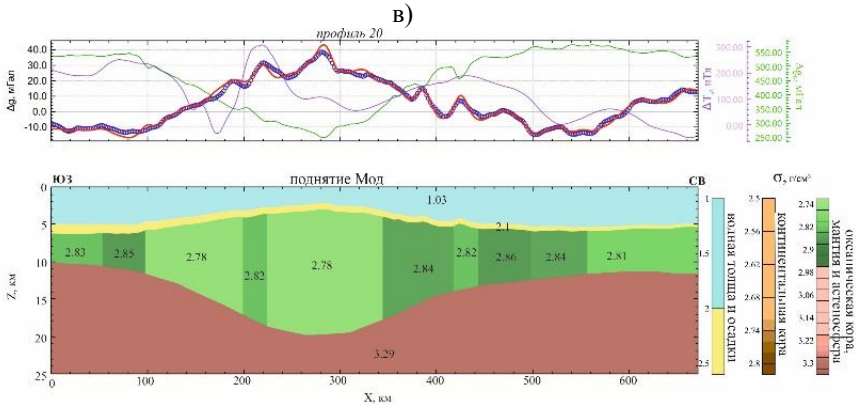


Рис. 3. Структурно-плотностная модель коры плато Агульяс (а), поднятий Северо-Восточная Георгия (б) и Мод (в). Цифры на разрезе – значения плотности, г/см^3 . Графики: синий – наблюдаемое поле силы тяжести в свободном воздухе ($\Delta g_{св. в.}$, мГал); красный – рассчитанное поле силы тяжести в свободном воздухе; зеленый – поле силы тяжести в редукции Буге (Δg_B , мГал); фиолетовый – аномальное магнитное поле (ΔT , нТл)

Анализ геолого-геофизической информации и плотностного моделирования позволил сделать вывод о том, что поднятия Айлос Оркадас и Метеор имеют схожее строение литосферы. Плотностные характеристики рассматриваемых поднятий близки. При этом плотность блоков земной коры поднятий на севере составляет $2.76 - 2.85 \text{ г/см}^3$, на юге $2.72 - 2.81 \text{ г/см}^3$, что свидетельствует о термическом разуплотнении пород в южных частях поднятий, связанном с влиянием горячей точки Шона.

Сопоставление результатов плотностного моделирования вдоль трансатлантических профилей (рис. 4), позволяет сделать следующие выводы об изменении характеристик коры структур разных типов:

- плотность океанической коры в области ЮСАХ уменьшается с севера на юг по обоим флангам хребта, что связано с разуплотнением мантийных пород и степенью их прогрева под термическим влиянием горячих точек;

- плотность подкоровой литосферы меняется в пределах $3.21 - 3.31 \text{ г/см}^3$. Причем на южном профиле наблюдается незначительно разуплотнение ($3.26 - 3.28 \text{ г/см}^3$ в областях пересекаемых поднятий Айлос Оркадас, Метеор, Шона, Фолклендское плато), что обусловлено близостью горячих точек Шона и Буве;

- плотность астеносферы изменяется от 3.19 г/см^3 (под осью хребта) до 3.29 г/см^3 (под Фолклендским плато). Разуплотненные блоки, как и

на вышеописанных структурах, зафиксированы на южном профиле ($3.24 - 3.26 \text{ г/см}^3$);

- плотностные характеристики земной коры поднятий и плато (Айлос Оркадас и Метеор, Агульяс и Северо-Восточная Георгия) в региональном плане едва различимы, что подтверждает их сходное, по всей видимости, магматическое происхождение.

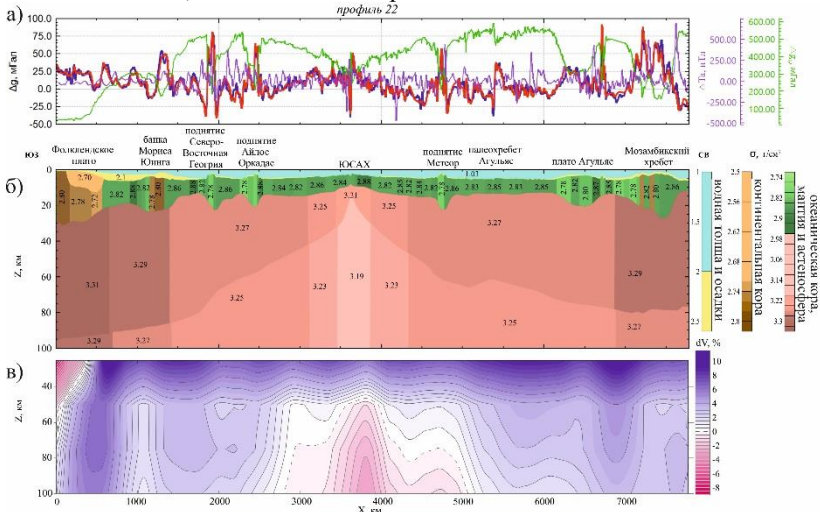


Рис. 4. Структурно-плотностная модель тектонической (б) северного трансатлантического профиля 22 и сейсмотомография (в) модель SL2013sv [Schaeffer, Lebedev, 2013]. Цифры на разрезе – значения плотности, г/см^3 . Графики (а): синий – наблюдаемое поле силы тяжести в свободном воздухе ($\Delta g_{\text{св.в.}}$, мГал); красный – рассчитанное поле силы тяжести в свободном воздухе; зеленый – поле силы тяжести в редукции Буге ($\Delta g_{\text{б}}$, мГал); фиолетовый – аномальное магнитное поле (ΔT_a , нТл)

В разделе 4.6. описаны выделенные генетические типы подводных поднятий по результатам анализа геолого-геофизической информации и плотностного моделирования, которые включают:

- современные спрединговые хребты (ЮСАХ и ЮЗИХ);
- палеоспрединговый хребет Агульяс;
- хребты, частично отделенные от континента, сложенные утоненной континентальной корой, осложненной плюмовым магматизмом (Мозамбикский хребет);
- хребты, сформированные в результате плюмового магматизма сложенные утолщенной за счет андерплейтинга океанической корой (Мадагаскарский хребет);

- поднятия, с утолщенной океанической корой, сформированные при перескоке спредингового хребта (Метеор и Айлос Оркадас);
- погруженные плато и поднятия с утолщенной за счет андерплейтинга океанической корой, представляющие собой фрагменты крупной магматической провинции (Агульяс, Северо-Восточная Грузия, Мод).

Глава 5. Структурное районирование литосферы на основе анализа геофизической информации

В этой главе представлен качественный анализ аномальных гравитационных и магнитного полей и их трансформант, который позволил выделить участки коры с различными геолого-геофизическими характеристиками, выявить разноглубинные плотностные неоднородности в коре и подкоровой мантии.

Для этого необходимо было:

- разложить поля на составляющие: низко- средне- и высоко частотные компоненты;
- проанализировать аномальные и морфологические особенности выделенных компонент;
- установить их взаимосвязь;
- сопоставить с глубинным проявлением;
- для каждого типа аномальных полей построить структурную схему;
- сопоставить их с имеющимися данными о рельефе, возрасте океанического дна и с данными других геофизических методов;
- согласовать структурные особенности полей с основными особенностями тектонического строения региона, выявленными на стадии плотностного моделирования по интерпретационным профилям.

По результатам анализа имеющейся геолого-геофизической информации были сделаны следующие выводы:

- океаническая кора в поле силы тяжести в свободном воздухе характеризуется средними значениями аномалий обоих знаков (- 25 ÷ +30 мГал), в редукции Буге – более +500 мГал; в магнитном поле – знакопеременными линейно-вытянутыми аномалиями разной интенсивности и направления, как правило, совпадающими с осью современных и палеоспрединговых хребтов;

- высокоамплитудные аномалии магнитного и гравитационного поля в свободном воздухе приурочены к областям с высоким магматизмом и, как следствие, к областям с утолщенным океаническим типом коры. В поле силы тяжести в редукции Буге эти области, наоборот, характеризуются менее интенсивными аномалиями (от 10 до 130 мГал);

- утоненная континентальная кора характеризуется небольшими амплитудами аномалий: в поле силы тяжести в редукции Буге интенсивность их меняется от 200 до 350 мГал, в редукции за свободный воздух до 50 мГал. Малые амплитуды аномалий затрудняют быстрое определение строения морфоструктуры, поэтому необходимо обращаться к дополнительным источникам геолого-геофизической информации и расчетам компонент потенциальных полей.

По результатам структурного анализа аномальных полей была построена обобщенная схема районирования Африкано-Антарктического сектора Южного океана, на которой выделены области (литосферные блоки), с корой, сформированной на разных спрединговых хребтах, отличающиеся строением тектоносферы и историей развития (рис. 5). Границами между блоками, как правило, служат подводные поднятия или палеограницы плит.

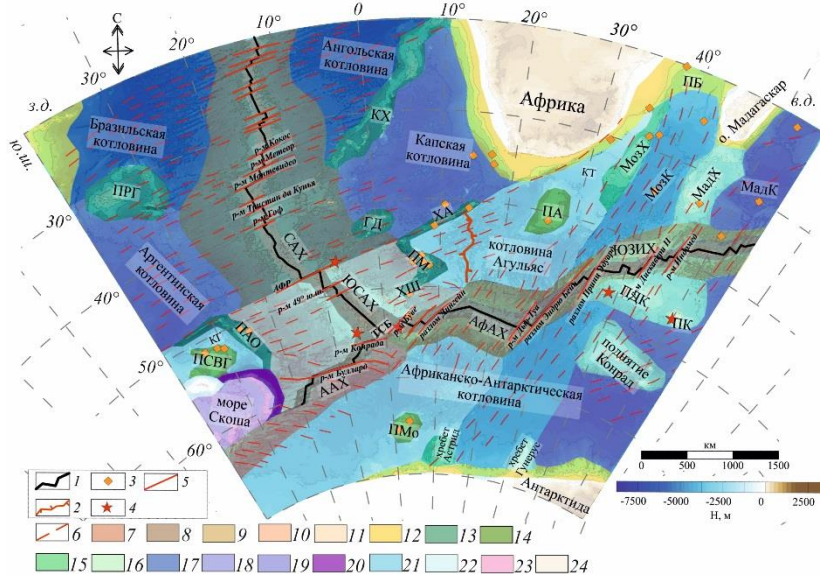


Рис. 5. Структурная схема аномального гравитационного и магнитного полей Африкано-Антарктического сектора Южного океана (наложена на рельеф океанического дна). Условные обозначения: 1 – ось срединно-океанических хребтов; 2 – ось палеоспредингового хребта; 3 – скважины глубоководного бурения (DSDP, ODP, IODP); 4 – горячие точки; 5 – разломные зоны; 6 – псевдоразломы; 7-11 – области с океанической корой, образованные в результате спрединга; 12 – области переходной зоны от континентальной литосферы к океанической; 13-16 – области океанической литосферы с аномальной корой; 17-22 – области с древней мощной океанической корой; 23 – море Скоша; 24 – область континентов

Глава 6. Пространственно-временной и ретроспективный анализ потенциальных полей и эволюция тектоносферы

Анализ пространственно-временной эволюции литосферы Африкано-Антарктического сектора Южного океана, связанной с распадом гондванских материков, позволяет восстановить глубинные геодинамические процессы, ответственные за формирование сложного морфоструктурного плана области соединения Атлантического и Индийского океанов. Этапы эволюции запечатлены в рельефе дна, структуре коры и литосферы, а также в аномальных геофизических полях, ретроспективный анализ которых позволяет выявить индикаторы геодинамических обстановок и геодинамических режимов.

В настоящей работе применен “геофизический метод”, в основе которого лежит проверка гипотез о строении и развитии литосферы исследуемого региона, ретроспективным анализом аномальных гравитационных и магнитного полей и построением плотностных моделей.

Ретроспективный анализ показал, что линейно-вытянутые отрицательные аномалии гравитационного поля в свободном воздухе соответствуют разломным зонам, палео- и спрединговым хребтам, интенсивность которых изменяется от -30 до -115 мГал. В аномальном магнитном поле границы начала продвижения спрединговых хребтов, разного времени, проявляются высокоинтенсивными отрицательными аномалиями, амплитудой от -450 до -150 нТл, которые разделяют блоки с разным простираем линейных аномалий и с разным возрастом коры. Трудно переоценить роль ретроспективного анализа линейных магнитных аномалий в определении возраста океанической коры и восстановлении пространственно-временной картины эволюции литосферы. Более того генеральный рельеф дна и нижняя граница литосферы, имеющие непосредственную корневую зависимость от возраста, представляют собой наиболее контрастные плотностные границы, что предопределяет временную зависимость изменения аномального гравитационного поля и теплового потока. Этапы кинематических перестроек и проявления плюмового магматизма ответственного за формирование подводных поднятий разных типов также оставляют свой след в аномальных геофизических полях, ретроспективный анализ которых позволит более корректно восстановить эволюцию тектоносферы.

Заключение

Выполненный в работе анализ геолого-геофизической информации Африкано-Антарктического сектора Южного океана позволил выявить диапазон аномальных значений геофизических полей

над структурами изучаемого региона. Совокупность геофизических характеристик служат индикаторами особенностей строения коры подводных поднятий и условий их происхождения. Диапазон вариаций аномальных значений гравитационных и магнитных полей позволяет выявить вероятный тип коры исследуемых поднятий. Были рассмотрены следующие структуры: Мозамбикский и Мадагаскарский хребты, поднятия Айлос Оркадас, Метеор, Северо-Восточная Георгия, плато Агульяс и южный сегмент Срединно-Атлантического хребта.

Построены модели глубинного строения коры, по результатам которых выделены основные типы коры слагающие подводные поднятия:

- нормальную океаническую кору современных (ЮСАХ, ЮЗИХ), палеоспрединговых хребтов (хребет Агульяс) и прилегающих котловин;
- утоненную континентальную кору (северные части Сейшельско-Маскаренского плато, Мозамбикского хребта и плато Агульяс);
- утоненную континентальную кору, осложненную плюмовым магматизмом (центральные части Мозамбикского хребта, плато Агульяс и поднятия Северо-Восточная Георгия);
- утолщенную за счет андерплейтинга океаническую кору (южная часть Сейшельско-Маскаренского плато, Мадагаскарский хребет, южная часть Мозамбикского хребта, южная часть плато Агульяс, поднятия Мод и Северо-Восточная Георгия, поднятия Айлос Оркадас и Метеор).

Результаты плотностного моделирования и сопоставление геолого-геофизических данных показали, что:

- Мозамбикский хребет на севере сложен утоненной континентальной корой, которая свидетельствует об отделении хребта от африканского континента, на юге – корой смешанного типа;
- Мадагаскарский хребет представлен блоками базальтовой океанической коры, утолщенной за счет андерплейтинга;
- поднятия Айлос Оркадас и Метеор характеризуются схожими значениями аномалий полей силы тяжести и магнитного, а также схожим строением земной коры, которая сложена утолщенной океанической корой под действием горячей точки Шона;
- плато Агульяс в северной и центральной частях имеет схожее строение с поднятием Северо-Восточная Георгия, которые сложены либо утоненной континентальной корой, либо сильно интродуцированной корой. В южной части плато Агульяс и поднятие Мод характеризуются утолщенной океанической корой, что может свидетельствовать об их общем происхождении.

Плотностная модель коры и литосферы вдоль трансатлантического профиля показала гетерогенное строение коры и блоковое строение литосферы, причем значительную роль в формировании глубинного строения подводных поднятий сыграли магматические процессы, вызванные активностью горячих точек.

На основе анализа гравитационного и магнитного полей, данных сейсмотомографии, результатов плотностного моделирования и другой геолого-геофизической информации построена структурная схема Африкано-Антарктического сектора Южного океана, в которой отображены гетерогенные блоки коры и литосферы, имеющие разный возраст, глубинное строение и историю развития. Границы этих блоков отмечаются изменением простираения знакопеременных магнитных аномалий и высоко градиентными аномалиями поля силы тяжести. Выделенные границы характеризуют собой области проявления магматических процессов, действующих в настоящее время или в геологическом прошлом, а также активные и палеограницы плит.

Совместный анализ аномальных гравитационных и магнитного полей и глубинных плотностных моделей позволяют выйти на условия происхождения поднятий, в которых важную роль играет взаимодействие плюмового магматизма с кинематическими перестройками, что приводит к формированию поднятий и гетерогенного строения коры. Большинство современных геодинамических обстановок характеризуются особым набором геофизических аномалий. Например, по результатам анализа гравитационного поля в свободном воздухе, ось спрединговых и палеоспрединговых хребтов обладает интенсивной линейной отрицательной аномалией, диапазон которой изменяется от -80 до -30 мГал. Такая информация и характеристики полей позволили построить реконструкцию развития подводных поднятий Африкано-Антарктического сектора Южного океана вдоль трансатлантического профиля.

Выполненная методика по изучению Африкано-Антарктического сектора Южного океана, используемая в настоящей работе, может быть применена к другим регионам Мирового океана. Исследования этого региона могут быть продолжены, поскольку в настоящей работе рассматривалось строение коры и тектоносферы подводных поднятий, но также было бы полезно изучить строение разломных зон и палеограниц плит, разделяющих гетерогенные блоки литосферы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Коснырева М.В., **Рыжова Д.А.**, Дубинин Е.П., Булычев А.А. Строение Сейшельско-Маскаренского плато и прилегающих глубоководных котловин на основе анализа потенциальных полей и плотностного моделирования // Геофизика. – 2021. – № 6. – С. 25-32. RSCI. (0.32 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ, 2021: 0.343.
2. **Рыжова Д.А.**, Коснырева М.В., Дубинин Е.П., Булычев А.А. Строение тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов по геофизическим данным // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2021. – № 6. – С. 20-29. RSCI (0.72 п.л., авторский вклад 70%). Импакт-фактор SJR, 2020: 0.109.
3. **Рыжова Д.А.**, Коснырева М.В., Дубинин Е.П., Булычев А.А. Геолого-геофизическое строение тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. – № 3. – С. 53-69. RSCI (1.29 п.л., авторский вклад 70%). Импакт-фактор SJR, 2021: 0.137.
4. **Рыжова Д.А.**, Толстова А.И., Дубинин Е.П., Коснырева М.В., Булычев А.А., Грохольский А.Л. Строение тектоносферы и условия формирования Мозамбикского хребта: плотностное и физическое моделирование // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2022. – Т. 53. – № 1. – С. 46-58. RSCI (0.69 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ, 2021: 0.696.
5. Чупахина А.И., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., **Рыжова Д.А.**, Булычев А.А. Физическое моделирование сегментации осевой зоны южного сегмента Срединно-Атлантического хребта // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2022. – №3. – С. 89-98. RSCI (0.11 п.л., авторский вклад 10%). Импакт-фактор РИНЦ, 2021: 0.318.
6. **Рыжова Д.А.**, Коснырева М.В., Дубинин Е.П., Булычев А.А. Строение тектоносферы поднятий Метеор и Айлос Оркадас по результатам анализа потенциальных полей // Геофизические исследования. – 2022. – Т. 23. – № 4. – С. 5-22. RSCI (1.37 п.л., авторский вклад 70%). Импакт-фактор SJR, 2021: 0.137.

Иные публикации (в сборниках всероссийских и международных конференций):

7. **Рыжова Д.А.**, Булычев А.А., Дубинин Е.П. Совместный анализ гравитационного и магнитного полей для изучения строения тектоносферы юго-восточного сектора Южной Атлантики // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)». Том III (III). ООО «ПолиПРЕСС», – Тверь, 2020. – С. 490- 493. (0.24 п.л., авторский вклад 70%)

8. **Рыжова Д.А.**, Булычев А.А., Дубинин Е.П. Структурный анализ потенциальных полей юго-восточной Атлантики // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки "ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях". Т. 2. ООО «ПолиПРЕСС», Тверь, – 2021. – С. 270-273. (0.24 п.л., авторский вклад 70%)

9. **Рыжова Д.А.**, Дубинин Е.П., Булычев А.А. Плотностные модели тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях. Т. 1. ООО «ПолиПРЕСС», Тверь, – 2021. – С. 327-330. (0.24 п.л., авторский вклад 70%)

10. **Рыжова Д.А.**, Коснырева М.В., Толстова А.И., Дубинин Е.П., Булычев А.А. Анализ потенциальных полей поднятий Айлос Оркадас и Метеор // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 48-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Сборник научных трудов. Издательство ВСЕГЕИ Санкт-Петербург, – 2022. – С. 227-231. (0.40 п.л., авторский вклад 70%)

11. **Рыжова Д.А.**, Коснырева М.В., Дубинин Е.П., Булычев А.А. Анализ геолого-геофизических данных Сейшельско-Маскаренского плато и прилегающих глубоководных котловин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 48-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Сборник научных трудов Издательство ВСЕГЕИ Санкт-Петербург, – 2022. – С. 222-227. (0.29 п.л., авторский вклад 50%)