



УДК 550.831,838; 551.241

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ ТЕКТОНОСФЕРЫ ПЛАТО АГУЛЬЯС, ПОДНЯТИЙ МОД И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ГЕОРГИИ

Рыжова Д.А.¹, Коснырева М.В.¹, Дубинин Е.П.^{1,2}, Булычев А.А.¹¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Музей землеведения МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Плато Агульяс, поднятия Мод и Северо-Восточная Георгия располагаются в антарктическом секторе Южной Атлантики. Несмотря на значительную пространственную удаленность друг от друга, они имеют общие черты строения. Однако условия происхождения этих структур и их эволюция остаются дискуссионными. Результаты сейсмических исследований и тектонические реконструкции границ плит указывают на то, что эти поднятия представляли собой единую крупную магматическую провинцию. Для выявления особенностей глубинного строения этих тектонических структур был проведен анализ потенциальных полей (аномального гравитационного и магнитного полей), их трансформант и сейсмотомографии. Плотностное моделирование показало, что кора этих поднятий имеет большое сходство. Значительная гетерогенность коры может свидетельствовать о разной интенсивности магматических процессов, формирующих кору этих блоков, а также о возможном наличии фрагментов континентальной коры в пределах изначальной крупной магматической провинции Агульяс, которые в процессе эволюции могли остаться в структуре коры изучаемых поднятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подводные поднятия, южная часть Атлантического океана, Земная кора, аномальное гравитационное и магнитное поля

EDN: SDBVTC

1. ВВЕДЕНИЕ

В пределах акватории приантарктической части Южной Атлантики располагается большое количество подводных поднятий в виде хребтов, плато, приразломных хребтов, имеющих различную морфологическую выраженность и геолого-геофизические характеристики (рис. 1). Строение коры и происхождение некоторых из этих структур были рассмотрены авторами в предыдущих публикациях: Мозамбикский хребет [Рыжова и др., 2021], сопряженные хребты Метеор и Айлос Оркадас [Рыжова и др. 2022] и др.

Целью работы является изучение, на основе анализа потенциальных полей и плотностного моделирования, строения коры плато Агульяс, поднятия Северо-Восточная Георгия и поднятия Мод, так как условия происхождения и развития этих структур до сих пор остаются дискуссионными. Основными материалами для исследования служила информация о рельефе дна океана TOPEX [Sandwell et al., 2014], его возрасте [Muller et al., 2008], об аномалиях силы тяжести в свободном воздухе [Sandwell et al., 2014] и в редукции Буге с плотностью $2,67 \text{ г/см}^3$, рассчитанных с учетом сферичности

Электронная почта авторов для переписки:

Коснырева Мария Владимировна, e-mail: m.kosnyreva@yandex.ru

<https://elibrary.ru/sdbvtc>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

[Булычев и др., 1998], модель аномального магнитного поля ΔT_a EMAG2 [Meyer et al., 2017]. Также были использованы модель сейсмотомографии LLNL-G3Dv3 [Simmons et al., 2012] и SL2013sv [Schaeffer, Lebedev, 2013] и высоты геоида [Barthelmes, 2013].

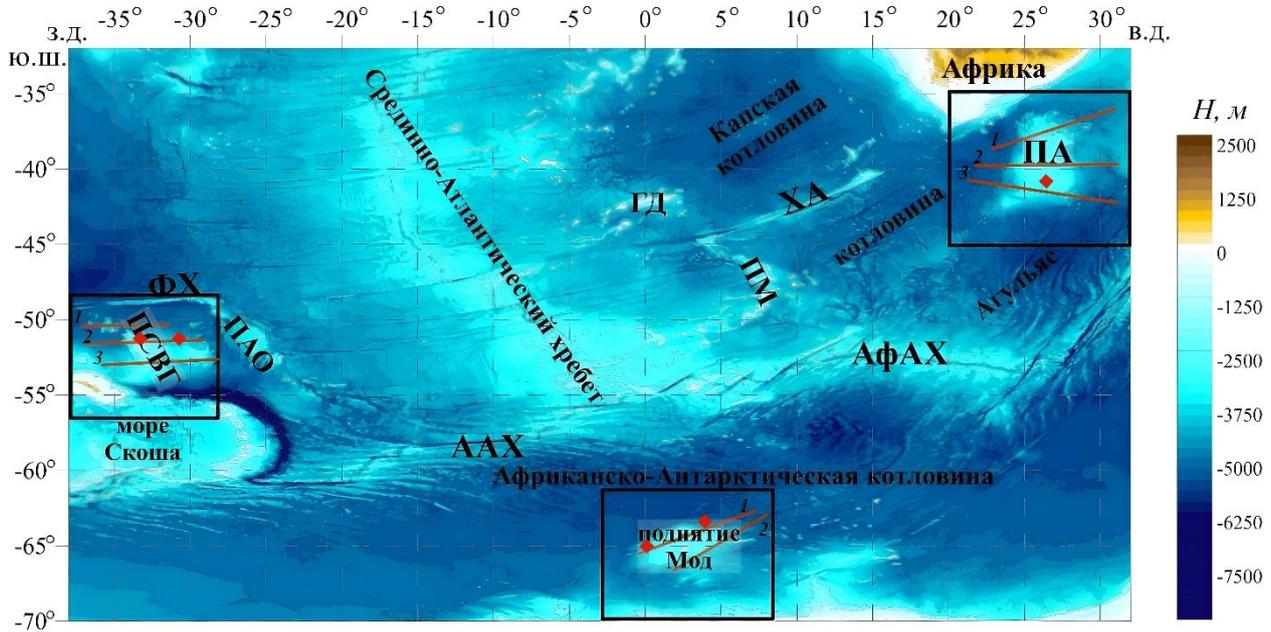


Рис. 1. Батиметрическая карта южной части Атлантического океана. Прямоугольниками выделены области исследуемых поднятий. Красными линиями обозначены расположение профилей плотностного моделирования, красными ромбами – местоположение скважин глубоководного бурения (ODP – Ocean Drilling Program). ААХ – Американо-Антарктический хребет, АфАХ – Африканско-Антарктический хребет, ГД – г. Дискавери, ПА – плато Агульяс, ПАО – поднятие Айлос Оркадас, ПМ – поднятие Метеор, ПСВГ – поднятие Северо-Восточная Георгия, ФХ – Фолклендский хребет, ХА – хребет Агульяс

Тектонические реконструкции границ плит предполагают, что 100-105 млн. лет назад в районе тройного соединения была сформирована крупная магматическая провинция в виде плато Агульяс, сложенная корой океанического типа [Parsiegla et al., 2008; Sager et al., 1999; Coffin & Eldholm, 1994]. Формированию этой провинции способствовала магматическая активизация горячей точки Буве [Uenzelmann-Neben et al., 1999; Gohl & Uenzelmann-Neben, 2001], которая привела к кинематической реорганизации границ плит. Согласно [Hartnady & le Roex, 1985] и [Martin, 1987], горячая точка Буве пересекла северную часть плато Агульяс примерно в 100 млн лет. Тектонические реконструкции границ плит показывают, что это тройное соединение было расположено вблизи юго-западной оконечности плато Агульяс примерно в 96 млн лет [Marks & Tikku, 2001] (рис. 2).

На рисунке 2А изображена тектоническая реконструкция Африкано-Антарктического сектора южной Атлантики 120 млн лет назад [Parsiegla et al., 2008]. В это время к району современной окраины Южной Африки примыкало Фолклендское плато, а банка Морича Юинга возможно контактировала с южной частью Мозамбикского хребта. К 105 млн лет Фолклендское плато сместилось к западу (рис. 2Б). На рисунке 2В изображена реконструкция к 100 млн лет, которая показывает наличие крупной магматической провинции, включающей объединенные блоки плато Агульяс, поднятия Мод и Северо-Восточной Георгии (границы поднятий отображены в настоящее время). Формирование всей магматической провинции, включающей плато Агульяс, поднятие Северо-Восточная Георгия, поднятие Мод завершилось ~94 млн лет назад. Тройное соединение Буве было расположено в это время вблизи южной оконечности плато Агульяс (рис. 2Г) [Marks & Tikku, 2001]. Последующий спрединг на трех хребтах приводил к разделению магматической провинции на три фрагмента: Агульяс–Северо-Восточная Георгия–Мод.

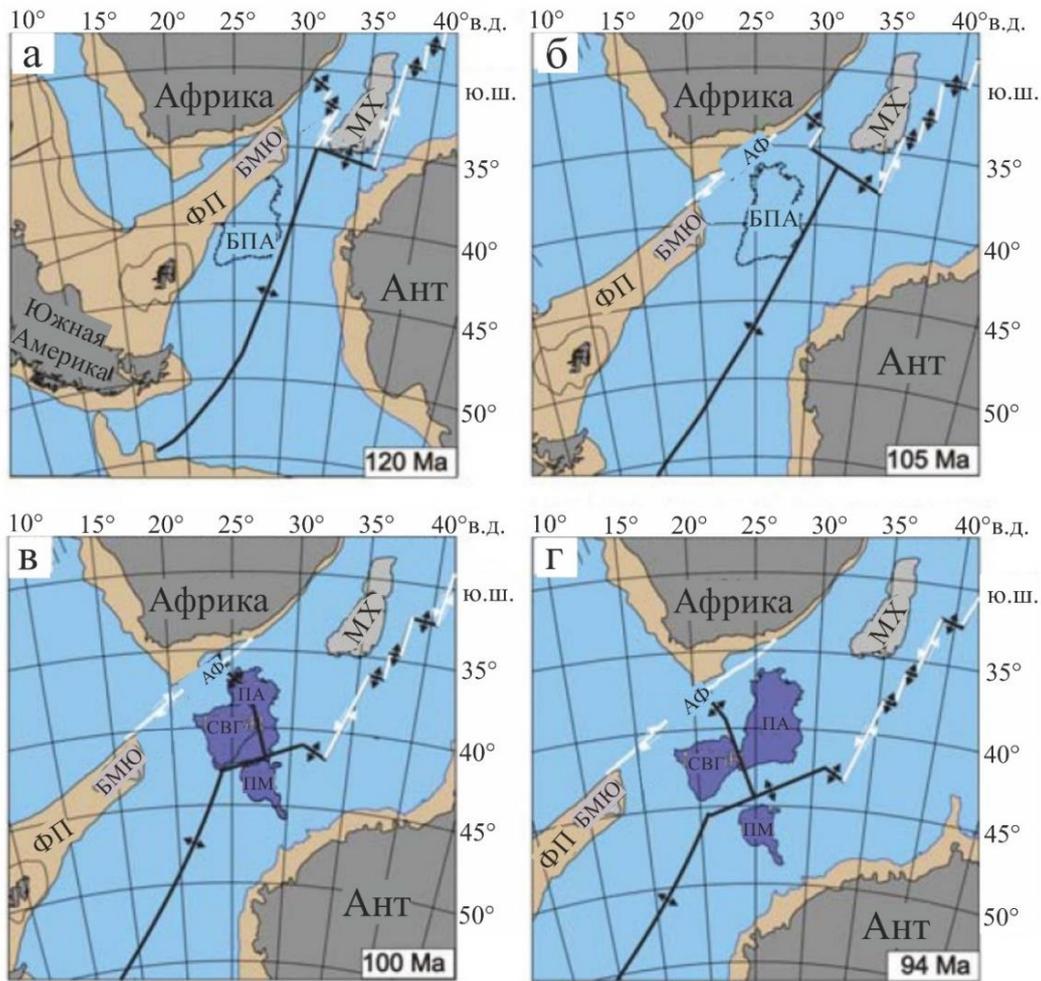


Рис. 2. Тектонические реконструкции границ по [Konig & Jokat, 2006], с изменениями. Толстые сплошные линии – предполагаемое местоположение системы палеоспрединга (черная – ось спрединга, белая – трансформные разломы). АФ – Агульяс-Фолклендская разломная зона, Ант – Антарктида, БМЮ – банка Мориса Юинга, БПА – будущее плато Агульяс, МХ – Мозамбикский хребет, ПА – плато Агульяс, ПМ – поднятие Мод, СВГ – поднятие Северо-Восточная Георгия, ФП – Фолклендское плато [Parsiegl et al., 2008]

Поднятие Северо-Восточная Георгия образует океаническое плато в юго-западной части Атлантического океана между 30° и 38° з.д. и 48° и 56° ю.ш. в котловине Георгия, разделяя ее на восточную и западную котловину (рис. 1). Котловина Георгия была сформирована в результате ряда тектонических событий, которые начались в конце мелового периода. Западная часть поднятия образует дугообразный хребет в северном направлении, а восточная сторона поднятия представляет собой более широкую и низкую рельефную структуру. Лабрекю и Хейс [LaBrecque & Hayes, 1979] предположили, что конвергенция между Южно-Американской плитой и мезозойской плитой Мальвинес привела к формированию поднятия Северо-Восточной Георгии в конце мелового периода. Кристофферсен и Лабрекю [Kristoffersen & LaBrecque, 1991] по результатам бурения ODP 114 (скв. 698, 699, 700) предположили, что часть поднятия Северо-Восточной Георгии образовалась в центре спрединга, под влиянием внеосевого вулканизма. В скважине 698 на глубине ~ 219 м ниже морского дна были собраны пробы керна с сильно выветренным базальтом, в котором исходные железомарганцевые минералы полностью изменены до гематита, с некоторыми микробрекциями, содержащими фрагменты серпентинитов [Ciesielski et al., 1988, a]. Скважина 699, пробуренная на северо-восточном склоне поднятия Северо-Восточной Георгии, выявила кору, которая образована ранее поднятий Айлос Оркадас и Метеор. На глубине около 516 м ниже морского дна были отобраны образцы керна с содержанием гранитного гравия и переотложенного вулканического кварцевого песка неопределенного возраста [Ciesielski et al., 1988б].

Плато Агульяс располагается на юго-западе Индийского океана примерно в 500 км к югу от Южной Африки. С 1960-х гг. плато стало объектом ряда геологических исследований, направленных на выяснение его геологической и тектонической структуры и происхождения [Heezen & Tharp, 1964; Scrutton, 1973; Barrett, 1977; Tucholke & Carpenter, 1977]. Некоторые авторы предполагают океаническое происхождение плато Агульяс [Barrett, 1977; Tucholke et al. 1981], другие – континентальное [Allen & Tucholke, 1981; Tucholke et al., 1981]. Авторы статьи [Tucholke et al., 1981] предполагали, что образование тройного соединения на северном краю континентального фрагмента Агульяс во время среднего мела может объяснить происхождение изрезанной, утолщенной океанической коры, а также утонение континентальной коры и проникновение базальтовых магм под южной частью плато. Также они рассматривали гипотезу о том, что плато Агульяс могло быть отделено от Мозамбикского хребта примерно 109 млн лет назад. Сейсмические исследования и тектонические реконструкции плит предполагают, что плато Агульяс представляет собой крупную магматическую провинцию, образовавшуюся не ранее 105 млн лет назад [Parsiegla et al., 2008] в сочетании с поднятиями Северо-Восточная Георгия и Мод [Goul & Uenzelmann-Neben, 2001; Parsiegla et al., 2008; Uenzelmann-Neben et al., 1999].

Поднятие Мод располагается в Африканско-Антарктической котловине между 2° з.д. и 8° в.д. и 63° и 68° ю.ш. вблизи Антарктического континента. Поскольку поднятие имеет отдаленное расположение, его тектоническое происхождение и строение литосферы до конца неясно. Предполагается, что поднятие Мод имеет океанический фундамент, с утолщенной корой образовавшейся в результате взаимодействия спредингового хребта с горячей точкой [Barker et al., 1988a]. Данные керн скважины 689 показали, что осадконакопление на границе мелового и третичного (палеогенового) периодов было непрерывным, а также что эта граница имеет интервал стекловидного пепла и глины вулканогенного происхождения [Barker et al., 1988b]. Вскрытые отложения скважины глубоководного бурения 690, перекрывающие фундамент, указывают на позднекампанский возраст. На глубине 300 м ниже морского дна, наблюдается значительное увеличение вулканического стекла в разрезе, а на глубине 317 м происходит резкий контакт с базальтовыми породами [Barker et al., 1988b].

2. АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аномальное гравитационное поле в свободном воздухе. В поле силы тяжести в свободном воздухе поднятие Северо-Восточная Георгия характеризуется линейно-вытянутой аномалией в северо-западном направлении повышенных значений поля до 70 мГал (рис. 3А). С восточной стороны поднятие проявлено аномалией меридионального направления, интенсивность которой достигает 50 мГал. В северной и южной частях оно оконтурено интенсивными отрицательными аномалиями субширотного направления. С северной стороны аномалия приурочена к Агульяс-Фолклендской разломной зоне и ее интенсивность достигает до -70 мГал, а в южной – Южно-Сандвичевому желобу, интенсивность которой варьирует от -40 до -200 мГал. В южной части также наблюдается ярко выраженная аномалия положительного знака со значениями от 40 до 180 мГал. Эта аномалия приурочена к острову Южная Георгия.

Плато Агульяс в аномальном гравитационном поле в свободном воздухе проявляется положительной вытянутой в меридиональном направлении аномалией, невысокой амплитуды до 55 мГал (рис. 3Б). В северо-западной части наблюдаются группа линейных отрицательных и положительных аномалий, интенсивность которых меняется в пределах от -95 до 100 мГал. Эти аномалии связаны с Африканским континентом. С западной, восточной и северо-восточной стороны от плато Агульяс поле силы тяжести характеризуется спокойными значениями аномалий (от -30 до 10 мГал), которые приурочены к котловине Агульяс и бассейну Транскей. В юго-восточной части наблюдаются линейно-вытянутые аномалии северо-восточного простирания и амплитудой до -45 мГал, которые могут быть приурочены к следам разломов.

Поднятие Мод выделяется изометричной аномалией в поле силы тяжести в свободном воздухе положительного знака (рис. 3В), амплитуда которой варьирует в пределах от 6 мГал по периферии до 80 мГал в центральной части. С восточной стороны от поднятия наблюдается линейно-вытянутая в субширотном направлении ярко выраженная положительная аномалия, интенсивностью до 115 мГал. С западной и северной части поднятие Мод оконтурено полем средних значений, в основном отрицательного знака (-35 – 10 мГал). Северная часть осложнена линейными отрицательными аномалиями юго-восточного направления, которые связаны с зонами разломов. С северо-восточной

стороны преобладает аномалия положительного знака (до 20 мГал). Предположительно это может быть след отделения поднятия Мод от плато Агульяс. В Южной части поднятие также оконтурено аномалиями отрицательного знака, интенсивность которых достигает -60 мГал. Данная область приурочена к континентальному склону Антарктиды.

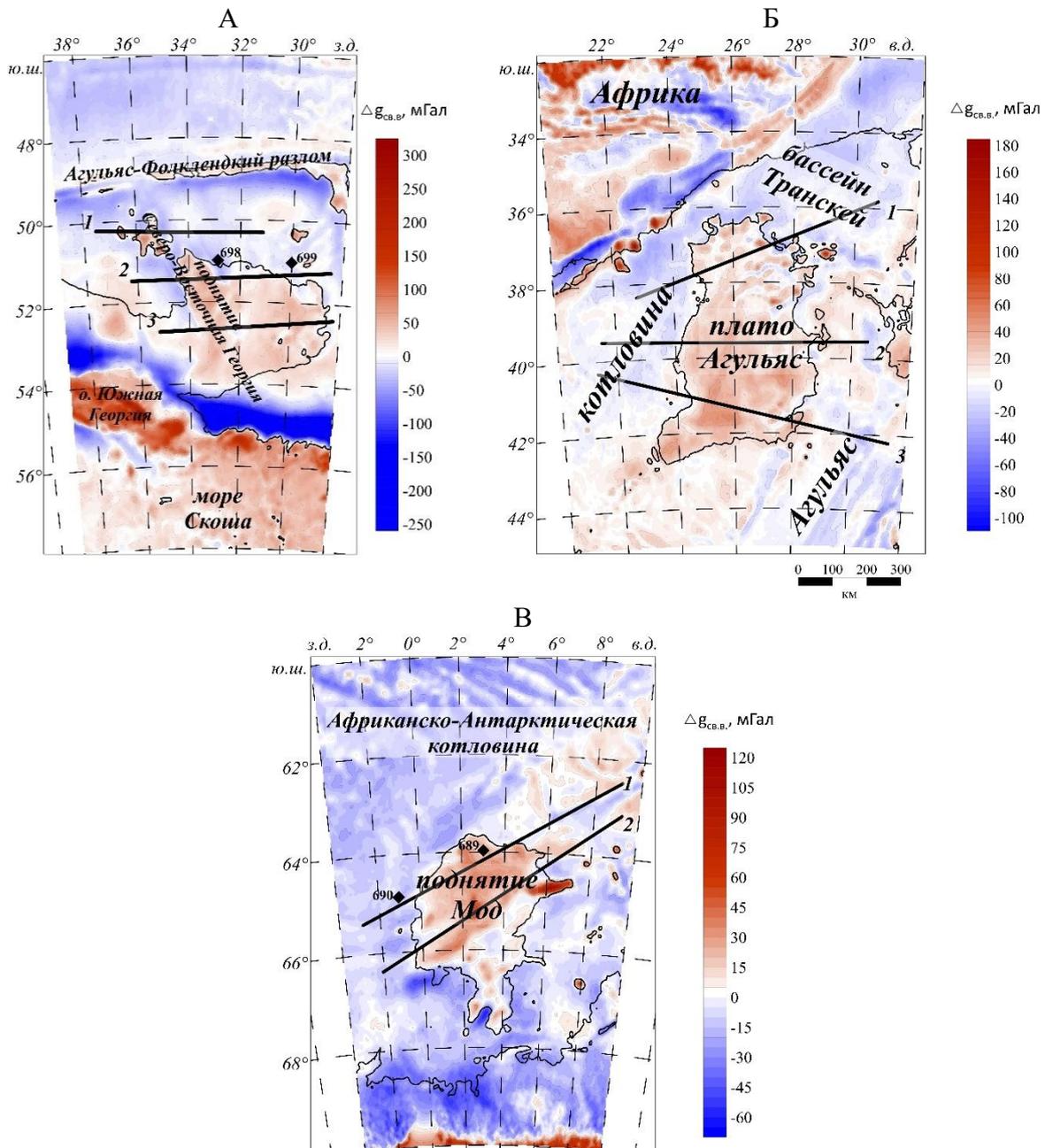


Рис. 3. Карты аномального гравитационного поля в свободном воздухе исследуемых поднятий: поднятие Северо-Восточная Георгия (А), плато Агульяс (Б) и поднятие Мод (В) [Sandwell et al., 2014]. Линиями обозначены расположение профилей плотностного моделирования, ромбами – местоположение скважин глубоководного бурения (ODP – Ocean Drilling Program)

В поле силы тяжести в свободном воздухе исследуемые поднятия характеризуются схожими интенсивными положительными значениями аномалий (55 – 80 мГал). Самая высокая амплитуда аномалий приходится на поднятие Мод, что может быть связано с большим влиянием магматизма на его формирование. Плато Агульяс обладает меньшей амплитудой аномального гравитационного поля в свободном воздухе (до 55 мГал), это может свидетельствовать о включении континентальных блоков

в его кору. Поднятие Северо-Восточная Георгия проявляется средними значениями поднятий в поле силы тяжести в свободном воздухе. Такая характеристика может говорить о смешанном строении коры и литосферы поднятия, т.е. земная кора поднятия может включать блоки, как утоненной континентальной коры, так и утолщенной за счет наращивания снизу океанической в результате повышенного плавления, вызванного активизацией плюмового магматизма во время формирования и разделения поднятий. С юго-западной части от плато Агульяс и северо-восточной от поднятия Мод наблюдаются положительные значения аномалий гравитационного поля, которые могут свидетельствовать о следе горячей точки и разделении поднятий под ее действием.

Аномальное гравитационное поле в редукции Буге с плотностью $2,67 \text{ г/см}^3$. Поднятие Северо-Восточная Георгия в поле силы тяжести в редукции Буге характеризуется повышенными значениями поля, интенсивность которых варьирует от 180 мГал до 420 мГал (рис. 4А).

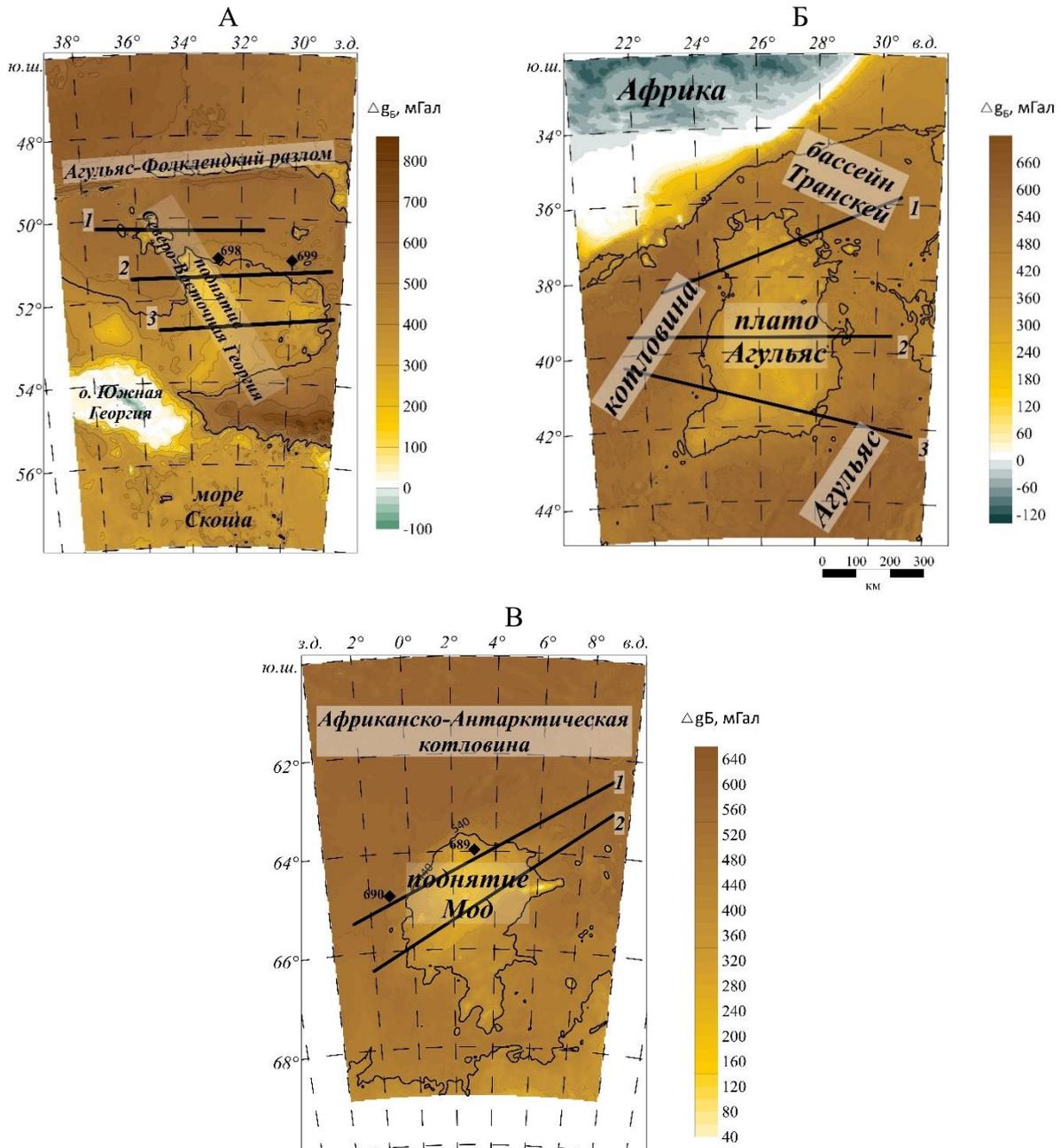


Рис. 4. Карты аномального гравитационного поля в редукции Буге исследуемых поднятий: поднятие Северо-Восточная Георгия (А), плато Агульяс (Б) и поднятие Мод (В) [Булычев, 1998].
Условные обозначения см. на рисунке 3

Поднятие в поле силы тяжести выделяется двумя аномалиями. Первая имеет линейно-вытянутую форму и северо-западное простирание, в центральной части, которое осложнено пониженными значениями до 175 мГал. Пониженные значения аномалии поднятия могут быть связаны с наличием утоненной континентальной коры в его структуре. Вторая аномалия характеризуется изометричной формой, амплитудой до 350 мГал, что может свидетельствовать о магматическом влиянии на формирование поднятия. Оконтурено в северной части поднятия более интенсивными значениями поля, приуроченными к котловине Георгия (до 610 мГал). В юго-восточной части от поднятия Северо-Восточная Георгия также наблюдаются интенсивные повышенные значения поля, амплитудой до 800 мГал. Данной аномалией характеризуется Южно-Сандвичев желоб. В юго-западной стороне от поднятия наблюдаются интенсивные пониженные значения аномалий, связанные с островом Южная Георгия. На севере от поднятия Северо-Восточная Георгия наблюдается линейно-вытянутая аномалия субширотного направления, интенсивность которой варьирует от 260 до 430 мГал. Эта аномалия приурочена к Фолклендскому хребту, образованному на Агульяс-Фолклендской разломной зоне.

Плато Агульяс проявляется в аномальном гравитационном поле в редукции Буге широкой аномалией, вытянутой в южном направлении (рис. 4Б). Интенсивность аномалии варьирует от 260 до 410 мГал, что может быть признаком его магматической природы. В северной части блок аномалии над плато Агульяс как будто отделяется от целой части, что может свидетельствовать о сложном его формировании. В западной и южной частях от плато наблюдаются интенсивные аномалии амплитудой до 635 мГал, которые приурочены к котловине Агульяс. Такая характеристика поля говорит об океанической коре. С северной стороны от поднятия поле силы тяжести в редукции Буге имеет пониженные значения аномалий. Они приурочены к континентальной окраине Африки.

В аномальном гравитационном поле в редукции Буге поднятие Мод проявляется изометричной аномалией пониженных значений (от 100 до 445 мГал) по сравнению с прилегающей Африканско-Антарктической котловиной (рис. 4В). В центральной части поднятия осложнено вытянутой аномалией в южном направлении, интенсивность которой варьирует от 100 до 250 мГал. Пониженные значения поля силы тяжести могут свидетельствовать либо об утолщении базальтовой коры вследствие интенсивного магматизма во время формирования поднятия, либо о наличии утоненной континентальной коры. Амплитуда аномалий прилегающих котловин достигает 600 мГал, что является признаком типичной океанической коры. В южной части от поднятия Мод амплитуда аномалий варьирует от 325 до 450 мГал, которые приурочены к континентальному склону Антарктиды.

Исследуемые поднятия в поле силы тяжести в редукции Буге характеризуются повышенными значениями аномалий (более 400 мГал). Самая низкая амплитуда (100 и 180 мГал) наблюдается над поднятием Мод и в западной части поднятия Северо-Восточной Георгии, что может говорить о большем влиянии магматизма на их формирование. Плато Агульяс проявляется средними значениями аномалий поля силы тяжести в редукции Буге (от 260 до 410 мГал) по сравнению с поднятиями Мод и Северо-Восточной Георгии, что не может однозначно говорить о происхождении и строении плато. Котловины, в которых располагаются поднятия, характеризуются типичными значениями аномального гравитационного поля с океаническим типом коры. Амплитуда аномалий у них достигает более 600 мГал.

Аномальное магнитное поле. Поднятие Северо-Восточная Георгия в аномальном магнитном поле проявляется хаотичным распределением разнознаковых аномалий (рис. 5А). Интенсивность аномалий варьирует в пределах -300 – 450 нТл, что может свидетельствовать о прогретости мантии во время образования поднятия. В южной части поднятия преобладают аномалии с отрицательным знаком, интенсивностью до -280 нТл. Данная аномалия связана с Южно-Сандвичевым желобом. В северной части наблюдаются линейно-вытянутые аномалии, в основном положительного знака магнитного поля, амплитудой более 400 нТл, которая приурочена к Агульяс-Фолклендскому трансформному разлому. С Восточной стороны от поднятия северо-восточная Георгия наблюдается интенсивная отрицательная аномалия, амплитудой -480 нТл. Данная аномалия связана с формированием поднятия Айлос Оркадас под действием горячей точки.

В аномальном магнитном поле плато Агульяс характеризуется линейно-вытянутыми знакопеременными аномалиями субширотного направления (рис. 5Б). Интенсивность аномалий уменьшается с севера на юг. В северной части амплитуда аномалий изменяется от -360 нТл до 585 нТл, в южной варьирует от -100 нТл до 155 нТл. Такая изменчивость поля может свидетельствовать о сильном магматизме в северной части поднятия и прогретости мантийного вещества во время формирования плато. С западной стороны от плато Агульяс наблюдается спокойное распределение

аномалий магнитного поля в основном отрицательного знака (от -55 до 95 нТл). В юго-восточной части наблюдается линейно-вытянутая отрицательная аномалия в юго-западном направлении. Данная аномалия может быть приурочена к трансформному разлому, поскольку в этом месте прослеживается изменение направление аномалий (с субширотного на северо-западное). В юго-западной части от плато также наблюдается интенсивная отрицательная аномалия северо-западного простирания. Интенсивность аномалии достигает до -355 нТл и может быть приурочена к шовной зоне отмершего спредингового хребта Агульяс. В северо-западной части от плато наблюдается линейно-вытянутая ярко выраженная положительная аномалия (до 725 нТл), которая приурочена к Агульяс-Фолклендскому трансформному разлому. Она разделяет крупную отрицательную аномалию, интенсивностью более -80 нТл (в северной части достигает -145 нТл), которая приурочена к континентальной окраине Африки, от знакопеременного магнитного поля, характерного для океанического типа коры.

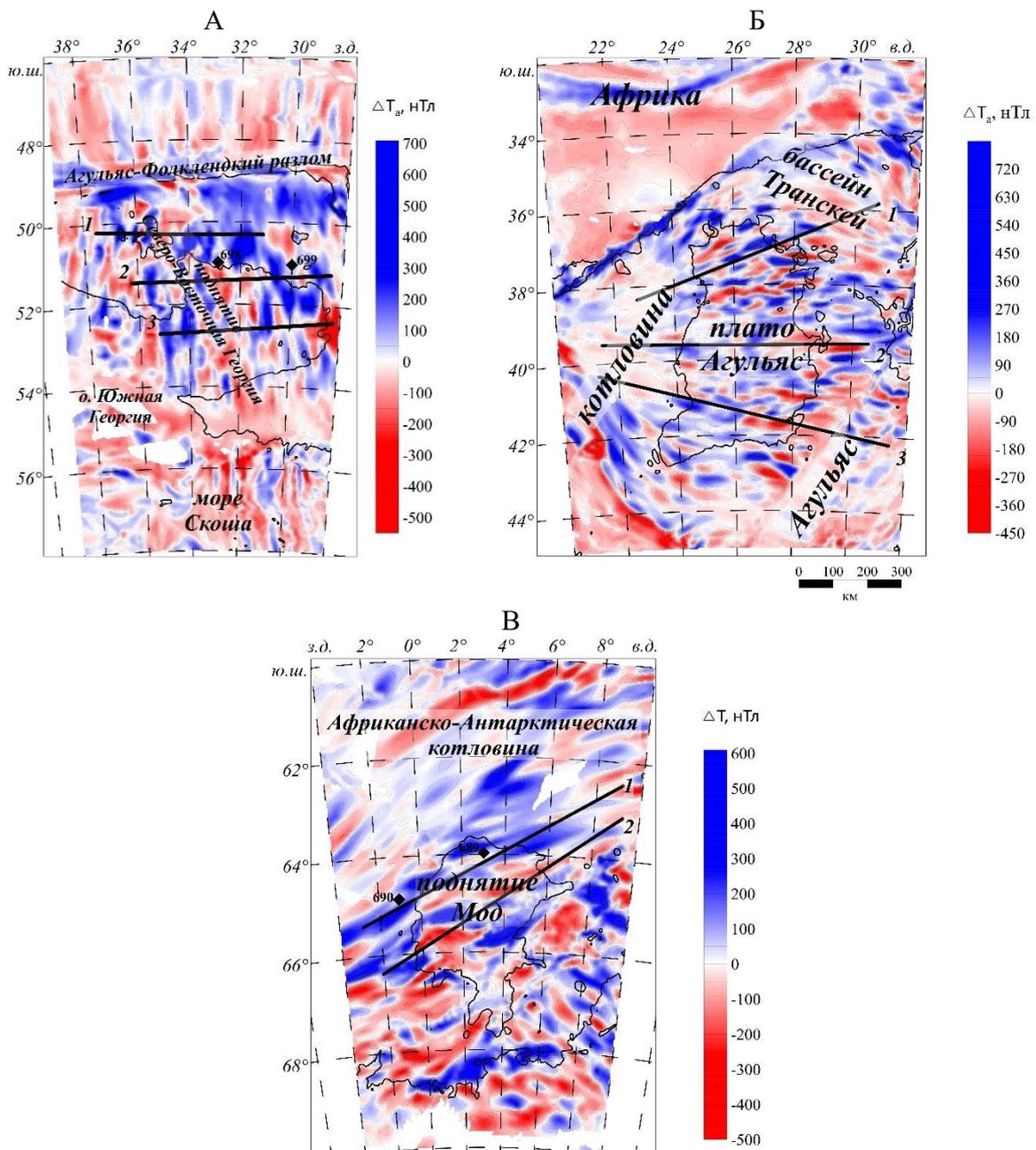


Рис. 5. Карты аномального магнитного поля ΔT_a исследуемых поднятий: поднятие Северо-Восточная Георгия (А), плато Агульяс (Б) и поднятие Мод (В) [Meyer et al., 2017]. Усл. обозначения см. на рисунке 3

Поднятие Мод проявляется линейно-вытянутыми в северо-восточном направлении интенсивными знакопеременными аномалиями магнитного поля (рис. 5В). Амплитуда аномалий варьирует от -400 нТл до 450 нТл, что может свидетельствовать о сильном магматизме в районе исследования. В южной и юго-восточной части от поднятия наблюдается изменение простирания аномалий на северо-западное, что свидетельствует о гетерогенном строении коры и литосферы. С центральной части поднятия и выше в северо-западном направлении прослеживается небольшое смещение аномалий магнитного поля, что может соответствовать следу распространения отмершего спредингового хребта Агульяс. В северной части от поднятия Мод наблюдается ярко выраженная отрицательная аномалия юго-западного простирания, амплитудой до -300 нТл. Данная аномалия может быть связана с действием горячей точки.

В магнитном поле изучаемые поднятия Южной Атлантики характеризуются линейно-вытянутыми знакопеременными аномалиями разного простирания. Это свидетельствует о том, что формирующая их кора образовалась на разных спрединговых хребтах, вблизи зоны тройного соединения. Амплитуда аномалий магнитного поля варьирует в пределах от -300 до 500 нТл. Изменение интенсивности аномалий плато Агульяс с севера на юг может свидетельствовать о его гетерогенном строении (амплитуда аномалий на севере -360 – 580 нТл и -100 – 155 нТл – на юге). Поднятие Северо-Восточная Георгия в западной части имеет преимущественно отрицательный знак аномалий, а в восточной – положительный. В восточной части от него наблюдается интенсивная отрицательная аномалия, которая может быть следом горячей точки. Поднятие Мод характеризуется в северной части интенсивными положительными значениями магнитного поля (до 400 нТл), а в южной преобладает отрицательный знак аномалий (до -450 нТл). По характеру магнитного поля невозможно точно сказать, какой корой, океанической или утоненной континентальной, сложены поднятия, но изменение интенсивности аномалий может говорить о сложном и различном их строении.

В рамках работы был проведен анализ данных сейсмотомографии [Simmons et al., 2012] и полей высот геоида. Исследуемые поднятия располагаются в зоне максимума превышения геоида над эллипсоидом относимости [Barthelmes, 2013], которое достигает 40 м. Для выделения компоненты поля, соответствующей верхней оболочке Земли – литосфере и верхней части астеносферы – тектоносфере, были вычислены аномалии высот геоида ΔN_B^{20} , которые были получены вычитанием из поля наблюдаемых высот геоида региональной 20-й гармоника поля и аномальных высот геоида в редукции Буге [Булычев и др., 2002]. В разностных полях высот геоида поднятия Северо-Восточная Георгия, Мод и плато Агульяс представляют собой области пониженных аномалий (5 - 35), относительно прилегающих котловин (35 – 55 м). При этом плато Агульяс характеризуется самыми низкими значениями (5 – 25 м), а поднятие Северо-Восточная Георгия самыми высокими (20 – 35 м), что свидетельствует о его гетерогенном строении.

Анализ данных сейсмотомографии показал, что на глубине границы Мохо (15–20 км) наблюдается уменьшение значений скоростей в сторону южных частей поднятий Северо-Восточная Георгия и плато Агульяс, причем на южную часть поднятия Северо-Восточная Георгия приходится градиентная зона уменьшения скорости по направлению к острову Южная Георгия. Поднятие Мод на глубине границы Мохо характеризуется повышенными значениями скоростей в юго-восточном направлении. Эта же картина наблюдается и для распределения скоростей на глубинах 80 и 150 км.

3. ПЛОТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основе имеющейся информации о глубине залегания границ основных слоев тектоносферы и их плотностных характеристиках было выполнено двумерное плотностное моделирование по трем профилям через плато Агульяс и поднятие Северо-Восточная Георгия и по двум профилям через поднятие Мод. Минимальное расхождение между суммарным эффектом и наблюдаемым полем (аномалии в свободном воздухе), в результате подбора составило ± 3 мГал.

Плато Агульяс. Интерпретационные профили проходят через северную, центральную и южную часть плато, а также через прилегающие котловину Агульяс и бассейн Транскей. Протяженность северного профиля составила около 800 км (рис. 6А). Мощность земной коры под плато Агульяс составляет ~19 км, уменьшаясь к котловине Агульяс до 11 км, а в бассейн Транскей до 14 км. Разрез земной коры плато представлен двумя слоями. Первый верхний слой соответствует континентальной коре с плотностью 2,70 г/см³, второй нижний – базальтовый – с переменной плотностью от 2,74 до

2,77 г/см³. Плотность блоков коры в котловине Агульяс и бассейне Транскей меняется с 2,81 г/см³ до 2,85 г/см³, что соответствует океаническому типу коры.

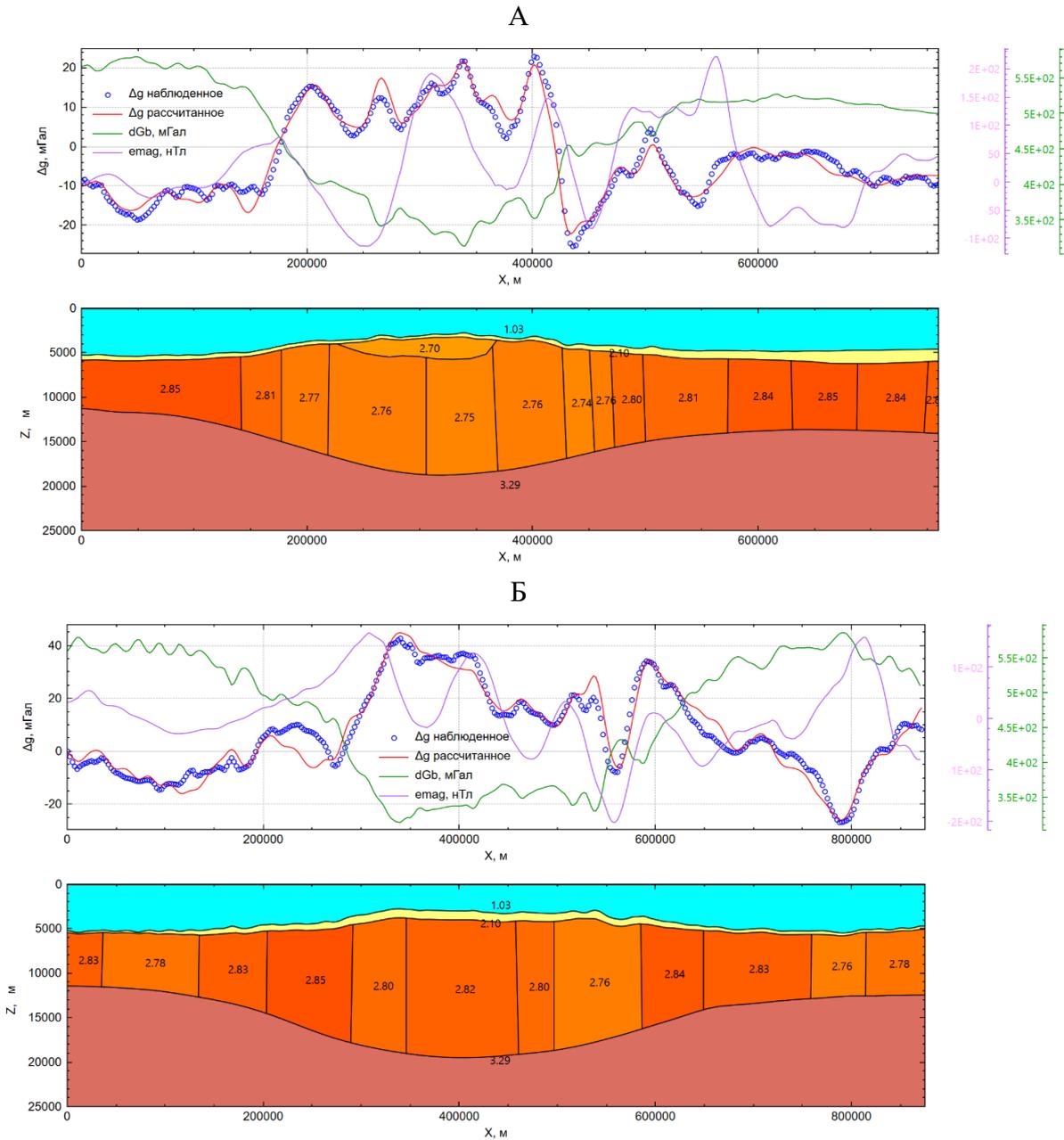


Рис. 6. Плотностные модели плато Агульяс профилей 1 (А) и 3 (Б).

Второй профиль проходит через центральную часть плато Агульяс, затрагивая также котловину и бассейн Транскей. Длина профиля более 750 км и мощность земной коры плато возрастает и составляет ~21 км. В плотностной модели этого профиля не наблюдается разделения слоев. Плотность блоков плотнее первого профиля и варьирует в пределах 2,77 – 2,8 г/см³. Такая плотностная характеристика может соответствовать сильно утоненной континентальной коре, строение которой осложнено значительными внедрениями базальтов. Мощность земной коры и плотность ее блоков котловины и бассейна остаются неизменными.

Южный профиль (рис. 6Б) имеет протяженность более 850 км с мощностью коры ~19 км под плато Агульяс, под котловиной Агульяс остается без изменений и составляет около 11 км, а под бассейном Транскей уменьшается до 12 км. На нем наблюдается уплотнение блоков земной коры плато до 2,85 г/см³, что соответствует океанической коре. В котловине Агульяс и бассейне Транскей также

наблюдаются изменения в плотности блоков, в сторону их разуплотнения ($2,76 - 2,83 \text{ г/см}^3$), что может свидетельствовать о влиянии горячей точки Буве.

Плотностные модели плато Агульяс подтверждают его гетерогенное строение. На севере поднятия наблюдается блок, вероятно сложенный утоненной континентальной корой мощностью около 17 км. В южной части плато блок с утоненной континентальной корой не проявляется, мощность земной коры увеличивается с 19 до 22 км, что может свидетельствовать об интенсивном магматизме. Плотность блоков земной коры плато Агульяс также увеличивается с севера на юг, что подтверждает гипотезу о влиянии горячей точки на его развитие и формирование. Котловина Агульяс и бассейн Транскей характеризуются океаническим типом коры с мощностью земной коры до 12-13 км и плотностью блоков $2,76 - 2,85 \text{ г/см}^3$.

Поднятие Северо-Восточная Георгия. Профили плотностного моделирования проходят через северную, центральную и южную часть поднятия и котловину Георгия. Первый профиль располагается на северном окончании поднятия Северо-Восточной Георгии, протяженностью ~450 км. Мощность земной коры поднятия составляет ~18 км, а котловины Георгия около 12-13 км. В центральной части на данном профиле наблюдается разуплотненный блок земной коры, состоящий из двух слоев. Первый слой с вероятной континентальной корой интродуцированной базальтовым материалом с плотностью равной $2,70 \text{ г/см}^3$, второй базальтовый слой, плотность блоков которого меняется от $2,74 \text{ г/см}^3$ до $2,76 \text{ г/см}^3$. По периферии плотность блоков достигает до $2,85 \text{ г/см}^3$. Такая плотностная характеристика может говорить о том, что поднятие было сформировано на магматической провинции с включением утоненной континентальной коры, которая при расхождении поднятия от плато Агульяс вклинилась в его структуру.

Второй профиль проходит через центральную часть поднятия, протяженность которого составляет около 550 км (рис. 7А). С восточной стороны поднятия Северо-Восточная Георгия наблюдается увеличение мощности земной коры котловины до 14 км, также незначительно увеличивается мощность самого поднятия до 20 км. В его центральной части наблюдается блок размером около 120 км в длину с утоненной континентальной корой. Этот блок земной коры разделен на два слоя: верхний с плотностью $2,70 \text{ г/см}^3$ и нижний, базальтовый, с переменной плотностью блоков от $2,72 \text{ г/см}^3$ до $2,74 \text{ г/см}^3$. Плотность блоков котловины увеличивается до $2,84 \text{ г/см}^3$, что является типичным значением для океанической коры.

В самой южной части поднятия располагается третий профиль протяженностью ~480 км (рис. 7Б). На данном профиле в центральной области наблюдается разбиение поднятия Георгия на две части (западную и восточную). Восточная часть поднятия имеет мощность земной коры 15-18 км, увеличиваясь в западную сторону, и характеризуется пониженными значениями плотности, относящийся к утоненной континентальной коре ($2,70 - 2,76 \text{ г/см}^3$). В центральной области мощность составляет около 16 км, а плотность блока равна $2,85 \text{ г/см}^3$. Мощность западной части поднятия Северо-Восточная Георгия увеличивается до 20 км, плотность блоков коры варьирует от $2,77 \text{ г/см}^3$ до $2,81 \text{ г/см}^3$.

Поднятие Северо-Восточная Георгия по результатам плотностного моделирования обладает плотностью блоков земной коры характерной для поднятий с утоненной континентальной корой. На всех трех интерпретационных профилях, в верхней части коры, наблюдается локальные блоки с плотностью $2,70 \text{ г/см}^3$, мощность которых варьирует от 2 до 5 км. Плотность коры в «базальтовом» слое поднятия варьирует от $2,72 \text{ г/см}^3$ в центральной части, до $2,85 \text{ г/см}^3$ по периферии. Котловина Георгия, которая ограничивает поднятие Северо-Восточная Георгия, характеризуется океаническим типом коры с плотностью от $2,80$ до $2,85 \text{ г/см}^3$.

Поднятие Мод. Профили через поднятие Мод простираются в северо-восточном направлении и имеют длину более 600 км (рис. 8А). Первый профиль находится в северной части поднятия и пересекает помимо поднятия Африканско-Антарктическую котловину. Мощность земной коры варьирует от 10 км в прилегающих котловинах до 20 км в районе поднятия Мод. Плотность блоков коры возвышенности соответствует океаническому типу значения, которые соответствуют $2,78 - 2,82 \text{ г/см}^3$, увеличиваясь в сторону котловины до $2,86 \text{ г/см}^3$.

Второй профиль располагается в южной части поднятия, ближе к Антарктическому континенту, также проходя и через Африканско-Антарктическую котловину (рис. 8Б). Мощность земной коры, как котловины, так и поднятия Мод увеличивается и составляет 15 и 23 км соответственно. Плотностная характеристика поднятия на данном профиле указывает на наличие утоненной континентальной коры, плотность блоков уменьшается до $2,74 \text{ г/см}^3$. К западу от

центральной части наблюдается уплотненный блок земной коры с плотность $2,82 \text{ г/см}^3$. Плотность коры Африканско-Антарктической котловины соответствует океаническому типу коры и варьирует в пределах $2,79 - 2,85 \text{ г/см}^3$.

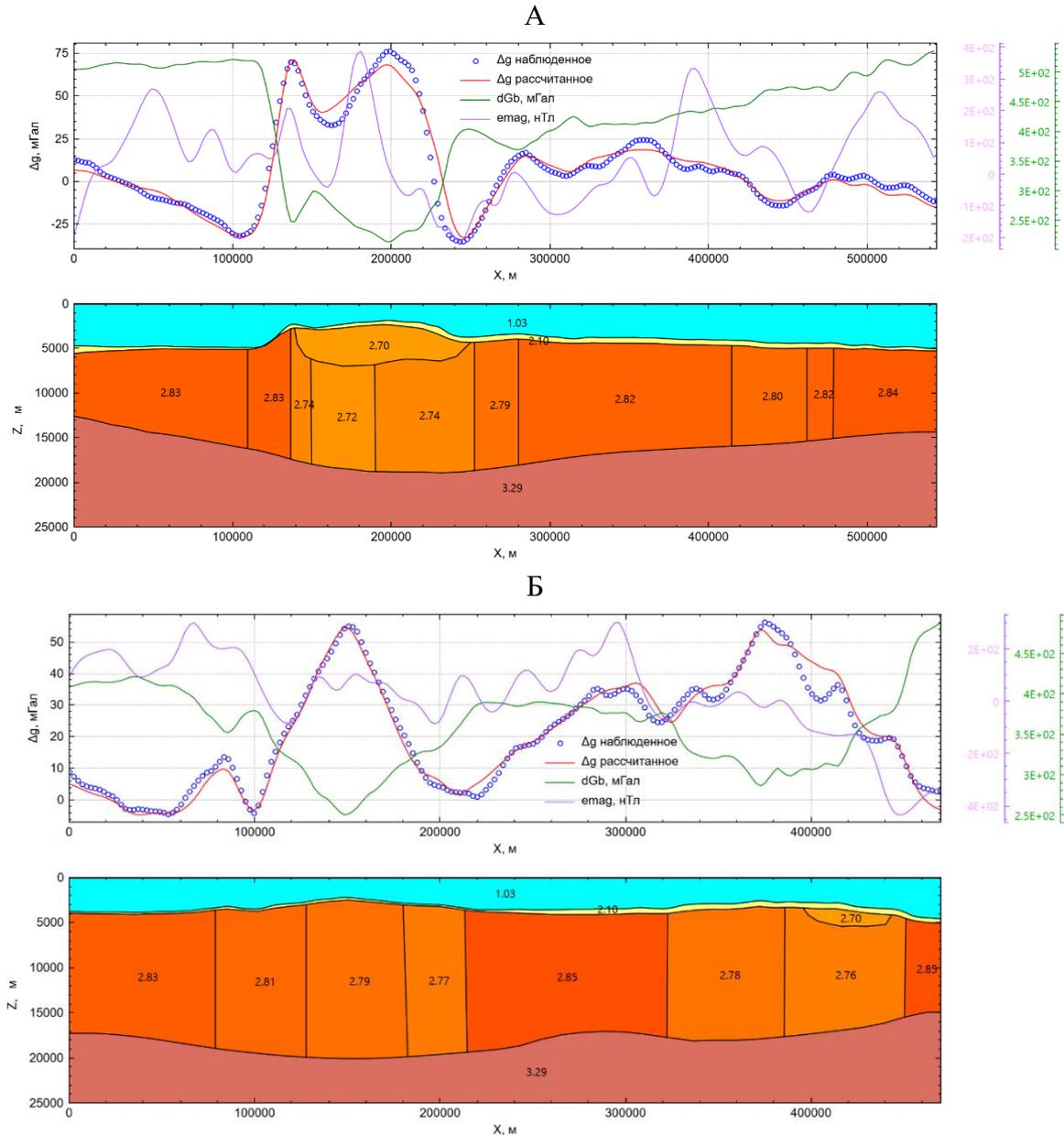


Рис. 7. Плотностные модели поднятия Северо-Восточная Георгия профилей 2 (А) и 3 (Б)

В результате плотностного моделирования поднятие Мод характеризуется повышенной мощностью земной коры до 23 км, что подтверждает гипотезу о воздействии плюмового магматизма на его формирование. Плотность блоков коры варьирует в пределах от $2,74$ до $2,86 \text{ г/см}^3$. Разуплотненные блоки ($2,74 - 2,76 \text{ г/см}^3$) могут свидетельствовать об сильно утоненной континентальной коре. Африканско-Антарктическая котловина обладает плотностью, характерной для океанического типа коры (табл. 1).

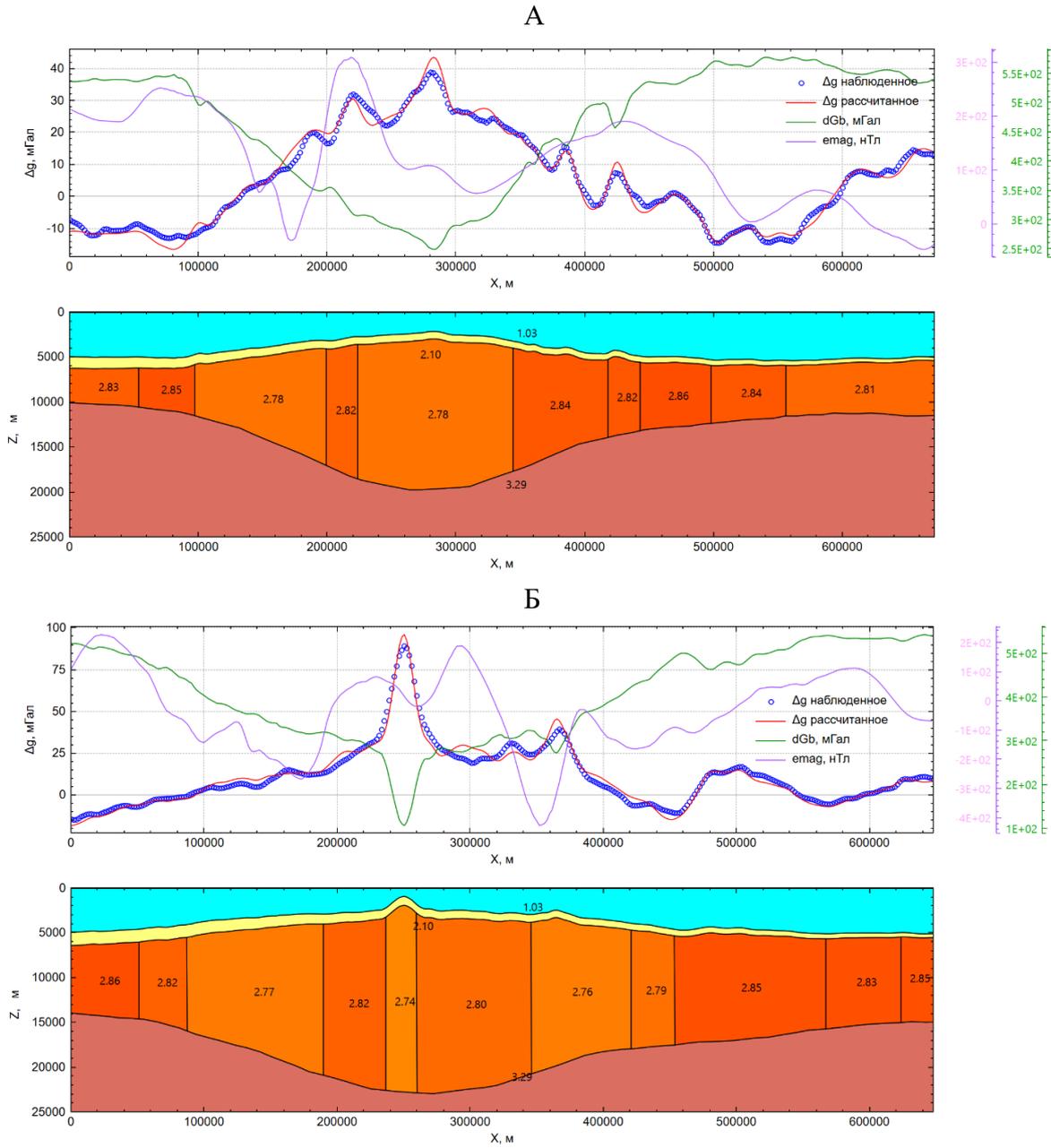


Рис. 8. Плотностные модели поднятия Мод профилей 1 (А) и 2 (Б)

Таблица 1 Параметры строения литосферы

Параметры литосферы	Номер профиля	поднятие Северо-Восточная Георгия	плато Агульяс	поднятие Мод	котловина Георгия	котловина Агульяс	Африканско-Антарктическая котловина
Мощность земной коры, км (вместе с осадками)	1	16-18	16-19	15-20	12-14	11-13	10-13
	2	17-19	18-21	17-24	12-15	11-14	14-15
	3	17-20	18-20	–	14-15	11-15	–
$\Delta g_{\text{св.в.}}$, мГал	1	13 - 102 (57)	7 - 25 (16)	3 - 38 (20)	-16 - 0 (-8)	-15 - 3 (-6)	-13 - 8 (-3)
	2	4 - 75 (39)	10 - 45 (25)	2 - 88 (45)	-17 - 2 (-7)	-12 - 2 (-5)	-11 - 3 (-4)
	3	3 - 58 (30)	7 - 43 (25)	–	-3 - 9 (3)	-12 - 8 (-2)	–
$\Delta g_{\text{б}}$, мГал	1	349 - 440 (394)	311 - 448 (379)	235 - 447 (341)	508 - 564 (536)	470 - 590 (530)	463 - 578 (520)
	2	173 - 448 (310)	260 - 430 (345)	125 - 417 (271)	485 - 548 (517)	475 - 595 (535)	463 -560 (511)
	3	325 - 427 (376)	300 - 443 (371)	–	496 - 510 (503)	480 - 585 (532)	–
Глубина дна, км	1	3.1 - 4.2	2.7 - 4.2	2.1 - 3.9	4.7 - 5.1	4.6 - 5.2	4.5 - 5.2
	2	1.6 - 4.0	2.3 - 4.3	1.1 - 3.8	4.7 - 4.9	4.9 - 5.3	4.3 - 5.0
	3	2.1 - 3.7	2.7 - 4.2	–	4.4 - 4.6	4.6 - 5.3	–
Плотность коры, г/см ³	1	2.70-2.85	2.70-2.77	2.78-2.84	2.80	2.85	2.81-2.86
	2	2.70-2.83	2.77-2.8	2.74-2.82	2.82-2.84	2.81-2.85	2.83-2.86
	3	2.70-2.85	2.76-2.82	–	2.83-2.85	2.78-2.83	–

Примечание. Приведены экстремальные значения (минимум—максимум); в скобках—среднее значение

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ аномального гравитационного и магнитного полей и построены плотностные модели литосферы поднятий Мод, Северо-Восточной Георгии и плато Агульяс, которые говорят о схожести строения исследуемых структур. Плато Агульяс в северной части сложено, вероятно, утоненной континентальной корой, интродуцированной базальтовым материалом, а на юге состоит из сильно утоненной континентальной или утолщенной океанической коры, мощность которой увеличена под действием плюмового магматизма. Поднятие Северо-Восточная Георгия также может включать фрагменты в разной степени утоненной континентальной коры, мощность которой может значительно варьировать за счет базальтовых внедрений и андерплейтинга, вызванных плюмовой активностью. Поднятие Мод, которое располагается вблизи Антарктического континента, обладает повышенной мощностью земной коры, что может быть связано со значительным влиянием плюмового магматизма на его формирование. На юге этого поднятия наблюдается разуплотненный блок коры с плотностью 2.74 г/см^3 , который может свидетельствовать о включении в ее строение сильно утоненной континентальной коры. 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.

Поднятия в аномальном гравитационном поле в свободном воздухе характеризуются положительными аномалиями поля интенсивностью от 55 до 80 мГал. Северная часть плато Агульяс обладает наименьшей амплитудой аномалий нежели его южное окончание, что свидетельствует о гетерогенном строении поднятия. На северо-востоке от поднятия Мод и юго-западе от плато Агульяс наблюдаются повышенные значения поля (15-20 мГал), которые могут быть следом расхождения поднятий под действием горячей точки. Такое же поведение поля проявляется на поднятии Северо-Восточной Георгии, его восточная часть характеризуется меньшими значениям аномалий (до 20 мГал) по сравнению с западной (до 75 мГал). Котловины, в которых располагаются поднятия, характеризуются спокойным полем силы тяжести в свободном воздухе в основном отрицательного знака, интенсивность которых варьирует от -15 мГал до 12 мГал.

В поле силы тяжести в редукции Буге изучаемые поднятия характеризуются повышенными значениями аномалий (до 410 мГал). Поднятия Мод и Северо-Восточная Георгия в центральной части проявляются низкоамплитудными аномалиями (до 100 и 180 мГал), что может свидетельствовать о влиянии горячей точки на их формирование. Котловины, оконтурившие поднятия, характеризуются океаническим типом коры, значения которой в поле силы тяжести в редукции Буге составляет более 600 мГал.

В магнитном поле исследуемые поднятия проявляются знакопеременными аномалиями амплитудой от -450 до 600 нТл различного наплавления (над плато Агульяс – субширотное «веерное направление», над поднятием Северо-Восточная Георгия – северо-западного, а над поднятием Мод – северо-восточного). Интенсивность аномалий в северной части плато Агульяс более ярко выражены, нежели в южной. Над поднятием Мод аналогичная, но обратная картина.

Таким образом, анализ потенциальных полей и плотностные модели по профилям через поднятия Северо-Восточная Георгия, Агульяс и Мод свидетельствуют об их сходных характеристиках, отражающих гетерогенное строение коры, содержащей блоки утоненной континентальной коры и утолщенной за счет плюмового магматизма и андерплейтинга, базальтовой коры. Это подтверждает возможность их общего формирования в пределах единой крупной магматической провинции, которая в дальнейшем была разбита на три фрагмента, разнесенных в процессе спрединга на значительные расстояния друг от друга.

5. ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственных заданий МГУ имени М.В. Ломоносова № АААА-А16-116042010088-5 и № 5-15-2021/ЦИТИС: 121042200088-6

ЛИТЕРАТУРА

- Булычев А.А., Гайнанов А.Г. и др. Количественная интерпретация спутниковых геофизических данных. Физика Земли. 1996. № 3. С.21–26.

- Булычев А.А., Кривошея К.В., Мелихов В.Р., Зальцман Р.В. Вычисление аномального гравитационного потенциала и его производных на сфере. Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1998. № 2. С.42–46.
- Дубинин Е.П., Рыжова Д.А., Чупахина А.И., Грохольский А.Л., Булычев А.А. Строение литосферы и условия формирования подводных поднятий приантарктического сектора Южной Атлантики на основе плотностного и физического моделирования Геотектоника. 2023. № 4. С. 32-55 doi: 10.31857/S0016853X23040057.
- 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. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-6-20-29>.
- 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. doi:10.21455/gr2022.4-1.
- Сорохтин О.Г. Зависимость топографии срединно-океанических хребтов от скорости раздвижения дна океана. Доклад АН СССР. 1973. Т. 208. №6. С. 1338-1341.
- Ченуго Л.С. GravInv2D: Программное обеспечение для двумерного плотностного моделирования // Свидетельство о регистрации прав на ПО. 2019. №2019662512.
- Allen R.B.; Tucholke B.E. Petrography and implications of continental rocks from the Agulhas Plateau, southwest Indian Ocean. Geology. 1981. Т 9. P.463-468.
- Barker P.E, Kennett J.P., et al. Shipboard Scientific Party: Introduction and objectives. Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 1988a. Vol. 113. 5–11. doi:10.2973/odp.proc.ir.113.102.1988.
- Barker P.E, Kennett J.P., et al. Shipboard Scientific Party: Site 689. Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 1988b. Vol. 113. 89–181. doi:10.2973/odp.proc.ir.113.106.1988.
- Barker P.E, Kennett J.P., et al. Shipboard Scientific Party: Site 690. Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 1988в. Vol. 113. 183–292. doi:10.2973/odp.proc.ir.113.107.1988.
- Barrett D.M. The Agulhas Plateau off southern Africa: a geophysical study, Geol. Soc. Am. Bull. 88. 1977. 749–763.
- Barthelmes F. Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models. Scientific technical Rep STR09/02. German Research Centre for Geosciences (GFZ). Potsdam, Germany. 2013. 32 p.
- Ciesielski P. K., Kristoffersen, Y. et al. Shipboard Scientific Party: Site 698. Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 1988. Vol. 114. 87–150. doi:10.2973/odp.proc.ir.114.105. 1988a.
- Ciesielski P. K., Kristoffersen Y., Clement, B., Blangy J.-P., Bourrouilh R., Crux J. A., et al. Shipboard Scientific Party: Site 699 // Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 1988. Vol. 114. 151–254. doi:10.2973/odp.proc.ir.114.106.1988b.
- Coffin M.F., Endholm O. Large igneous provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences. Reviews of Geophysics. 1994. Vol. 32, 1-36.
- Gohl K., Uenzelmann-Neben G. The crustal role of the Agulhas Plateau, southwest Indian Ocean: evidence from seismic profiling. Geophys. J. Int. 2001. Vol. 144. P. 632-646.
- Hartnady C.J.H., le Roex A.P. Southern Ocean hotspot tracks and the Cenozoic absolute motion of the African, Antarctic, and South American plates, Earth and Planetary Science Letters. 1985. Vol. 75. 245-257.
- Heezen B., Bunce E., Hersey J., Tharp M. Chain and romanche fracture zones. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1964. Vol. 11(1), 11–33. doi:10.1016/0011-7471(64)91079-4.
- König M., Jokat W. The Mesozoic breakup of the Weddell Sea. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2006. 111. doi:10.1029/2005jb004035.
- Kristoffersen Y., LaBrecque J. On the tectonic history and origin of the Northeast Georgia Rise. Proc., scientific results, ODP. Leg 114. subantarctic South Atlantic. 1991. Vol. 114. P. 23-38.
- LaBrecque J. L., Hayes D. E. Seafloor spreading history of the Agulhas Basin. Earth and Planetary Science Letters. 1979. Vol. 45. P. 411-428.

- *Marks K.M., Tikku A.A.* Cretaceous reconstructions of East Antarctica. Africa and Madagascar, Earth planet. 2001. Sci. Lett. 186. 479–495.
- *Martin A. K.* Plate reorganisations around Southern Africa, hot-spots and extinctions. Tectonophys. 142. 1987. p. 309-316.
- *Meyer B., Chulliat A., Saltus R.* Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 arc min Resolution Version 3 (EMAG2v3). Geochem., Geophys., Geosystems. 2017. Vol. 18. P.4522–4537. doi.org/10.1002/2017GC007280.
- *Muller R. D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W. R.* Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. Geochem., Geophys., Geosystems. 2008. Vol. 9. Q04006. doi:10.1029/2007GC001743.
- *Parsiegla N., Gohl K. Uenzelmann-Neben G.* The Agulhas Plateau: Structure and evolution of a large igneous province. Geophys. J. Int. 2008. Vol. 174. P. 336-350.
- *Sager W.W., Kim J., Klaus A., Nakanishi M., Khankishieva L.M.* Bathymetry of Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean: Implications for oceanic plateau formation at a triple junction. Journal of Geophysical Research. 1999. Vol. 104. N B4. P. 7557-7576.
- *Sandwell D.T., Müller R. D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R.* New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. 2014. Vol. 346, N 6205. P.65–67 doi: 10.1126/science.1258213.
- *Schaeffer A. J., Lebedev S.* Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone. Geophysical Journal International. 2013. Vol. 194. P. 417-449, doi: 10.1093/gji/ggt095.
- *Scrutton R.A., 1973.* Structure and evolution of the sea floor south of South Africa, Earth planet. Sci. Lett., 1973,19, 250–256.
- *Simmons N.A., Myers S.C., Johannesson G., Matzel E.* LLNL-G3Dv3: Global P wave tomography model for improved regional and teleseismic travel time prediction. Journal Geophysical Research. 2012. Vol. 117. N B10. 28 p. doi: 10.1029/2012JB009525.
- *Tucholke B.E., Houtz R.E., Barrett D.M.* Continental crust beneath the Agulhas Plateau, southwest Indian Ocean, J. geophys. Res. 1981. 86, 3791–3806.
- *Uenzelmann-Neben G., Gohl K., Ehrhardt A., Seargent M.* Agulhas Plateau, SW Indian Ocean: New evidence for excessive volcanism. Geophysical Research Letters. 1999. 26(13). 1941–1944. doi:10.1029/1999gl900391.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF THE TECTONOSPHERE OF THE AGULHAS PLATEAU, MAUD AND NORTHEAST GEORGIA RISES

Ryzhova D.A., Kosnyreva M.V., Dubinin E.P., Bulychev A.A

The Agulhas Plateau, the Maud Uplands, and Northeast Georgia are located in the Antarctic sector of the South Atlantic. The conditions of origin of these structures remain controversial, since, despite their considerable spatial distance from each other, they share common structural features. The history of the origin and structure of the studied structures remain interesting and debated, as they may have common evolutionary aspects. The results of seismic studies and plate tectonic reconstructions indicate that these uplifts represented a single large magmatic province formed 105 million years ago. To identify the features of the deep structure of these tectonic structures, an analysis of potential fields (anomalous gravitational and magnetic fields), their transformations and seismotomography was carried out. Density modeling has shown that the crust of these uplifts has great similarity. The significant heterogeneity of the crust may indicate a different intensity of magmatic processes forming the crust of these blocks, as well as the possible presence of fragments of the continental crust within the original large igneous province of Agulhas, which in the course of evolution could remain in the structure of the crust of the studied uplifts.

KEYWORDS: UNDERWATER UPLIFTS, SOUTH ATLANTIC OCEAN, EARTH'S CRUST, ANOMALOUS GRAVITATIONAL AND MAGNETIC FIELDS