

## СТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ АФРИКАНО-АНТАРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АНОМАЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ

© 2023 Д.А. Рыжова<sup>1</sup>, Е.П. Дубинин<sup>2</sup>, М.В. Коснырева<sup>1</sup>, А.А. Булычев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия, 119991; e-mail: dasha\_0292r@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Музей земледования, Москва, Россия, 119991

Поступила в редакцию 03.03.2023 г.; после доработки 03.05.2023 г.; принята в печать 26.06.2023 г.

Африкано-Антарктический сектор Южного океана является наименее изученной частью Мирового океана строение и эволюция тектоносферы которого остается дискуссионным. Сложная история развития исследуемого региона, сопровождаемая проявлениями интенсивной магматической и тектонической деятельности, способствовала образованию ряда крупных подводных хребтов и поднятий. Выявление особенностей глубинного строения тектоносферы на основе анализа геофизической информации и понимание геодинамической природы морфоструктур исследуемого региона является актуальной проблемой морской геофизики и геодинамики. Выполнен структурный анализ аномальных гравитационных и магнитного полей изучаемого региона. Построены схемы районирования по изучаемым аномальным полям и обобщенная схема. Результаты этих исследований позволили выделить гетерогенные блоки литосферы, которые сформированы на разных спрединговых хребтах и разделены подводными поднятиями.

*Ключевые слова:* аномальные гравитационное и магнитное поля, тектоносфера, структурное районирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Африкано-Антарктический сектор Южного океана, который включает антарктический сектор Южной Атлантики, юго-западную часть Индийского и Южный океаны, является наименее изученной территорией с геофизической и геодинамической точек зрения, где остается немало вопросов и в настоящее время, затрагивающих строение коры и литосферы. Район исследований представляет собой клин между литосферой Атлантического и Индийского океанов, ограниченный крупными разломными системами Агульяс-Фолклендской, Дю-Туа — Эндрю Бейн — Принц Эдуард и южным сегментом Срединно-Атлантического хребта (ЮСАХ). Водное пространство между Американо-Антарктическим (ААХ) и Африкано-Антарктическим (АфАХ) хребтами, с севера, и Антарктическим побережьем, с юга, относят к Южному океану (Хаин, 2001). Сложность строения и развития Африкано-Антарктической части Южного

океана зафиксирована в разнообразных формах рельефа и отражается в геофизических полях (рис. 1).

Основными материалами для исследования служила информация о рельефе дна океана (Sandwell, Smith, 2014), об аномалиях силы тяжести в свободном воздухе (Sandwell et al., 2014) и в редукции Буге с плотностью 2.67 г/см<sup>3</sup>, рассчитанных с учетом сферичности (Булычев, 1998), модель аномального магнитного поля ΔTа EMAG2v3 (Meyer et al., 2017). Также были использованы возраст океанического дна (Muller et al., 2008) и высоты геоида (Barthelmes, 2013).

В статье представлен качественный анализ аномальных гравитационных и магнитного полей и их трансформант с целью выявления разноглубинных плотностных неоднородностей в коре и подкоровой мантии; выделения участков коры с различными геолого-геофизическими характеристиками и в конечном итоге построения схемы структурного районирования региона. Такой анализ необходим при исследовании

строения и эволюции тектоносферы, особенно на акваториях с фрагментарным покрытием геофизической съемки.

### РЕЛЬЕФ ДНА АФРИКАНО-АНТАРКТИЧЕСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО ОКЕАНА

В рельефе дна океана выделяются срединно-океанические хребты, переходные зоны и подводные поднятия, разделяющие дно на ряд глубоководных котловин различного возраста и строения (рис. 1).

Крупнейшей структурой изучаемого региона является Срединно-Атлантический хребет (САХ), протяженностью более 3000 км. Условно его можно разделить на три части: северную — к северу от разломной зоны Монтевидео, центральную — между разломными зонами Монтевидео и Агульяс-Фолклендской, и южную — до тройного соединения Буве (ТСБ). В северной части САХ наблюдается нарушенная трансформными разломами морфоструктура рифтовой долины с глубиной оси от 2800 до 3200 м. Центральная часть имеет преимущественно северо-западное направление длиной ~1300 км и глубиной оси от 2500 до 3400 м. Южная часть хребта характеризуется морфологией осевого поднятия и в ней почти не наблюдаются трансформные разломы, а отмечается широкий склон за счет близкого расположения горячих точек Буве и Шона. В районе 55° ю.ш. ЮСАХ соединяется с двумя другими спрединговыми хребтами — ААХ и АфАХ в зоне ТСБ.

ААХ простирается в юго-западном направлении, на котором располагаются два крупных

трансформных разлома — Конрад и Буллард. Глубина оси хребта варьирует от 3500 до 4200 м. Ширина склона ААХ на юго-западе составляет ~160 км, при приближении к тройному соединению увеличивается и составляет ~320 км. АфАХ характеризуется субширотным направлением от ТСБ до разлома Дю-Туа, далее ось хребта едва прослеживается из-за наличия многочисленных разломов.

Помимо срединно-океанических хребтов изрезанное строение рельефа составляют многочисленные подводные поднятия и асейсмические хребты, имеющие разную морфологическую выраженность, глубинное строение и происхождение.

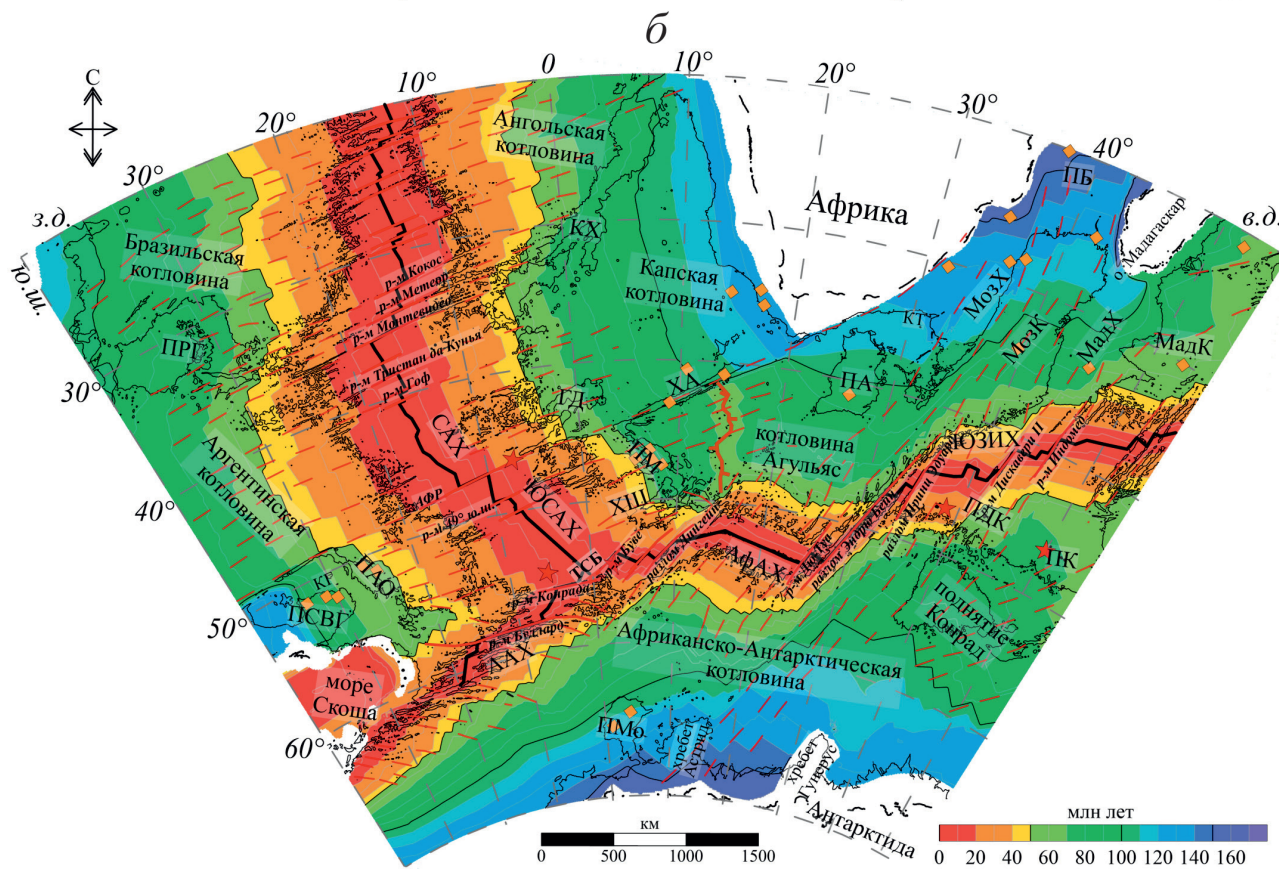
Асейсмический Китовый хребет представляет собой крупное глыбовое сооружение в юго-восточной части Атлантического океана. Он протягивается в юго-западном направлении на расстояние ~2000 км. Хребет делится на три крупных блока седловидными понижениями с глубинами более 3000 м со ступенчатыми боковыми склонами. Южный блок представлен узким валом, глубины над которым варьируют от 900 до 2000 м. Поднятие Риу-Гранди располагается в юго-западной части Атлантического океана и представляет собой структуру, разделенную на два сегмента. Восточный сегмент выражен в рельефе дна подковообразной формой субмеридионального направления с глубинами 1700–3500 м, а западный сегмент выражен изометричным поднятием, возвышаясь над океаническим дном на 600–3200 м.

Поднятия Айлос Оркадас и Метеор являются сопряженными асейсмическими хребтами субмеридионального простирания, расположенные

**Рис. 1.** Батиметрическая карта (а), по данным (Sandwell et al., 2014), и возраст дна (б), по данным (Müller et al., 2008) Африкано-Антарктического сектора Южного океана. 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 — пассивные части разломных зон; 7 — сейсмическая активность разной магнитуды. ААХ — Американо-Антарктический хребет, АфАХ — Африкано-Антарктический хребет, ГД — подводные горы Дискавери, КГ — котловина Георгия, КТ — котловине Транскей, КХ — Китовый хребет, МадК — Мадагаскарская котловина, МадХ — Мадагаскарский хребет, МозК — Мозамбикская котловина, МозХ — Мозамбикский хребет, ПА — плато Агульяс, ПАО — поднятие АйлосОркадас, ПБ — поднятие Бейра, ПДК — поднятие Дель-Кано, ПК — поднятие Крозе, ПМ — поднятие Метеор, ПМо — поднятие Мод, ПРГ — поднятие Риу-Гранди; ПСВГ — поднятие Северо-Восточная Георгия, САХ — Срединно-Атлантический хребет, ТСБ — тройное соединение Буве, ХА — хребет Агульяс, ХШ — хребет Шона, ЮЗИХ — Юго-Западный Индийский хребет, ЮСАХ — южный сегмент Срединно-Атлантического хребта.

**Fig. 1.** Bathymetric map (a), according to (Sandwell et al., 2014), and the age of the bottom (b), according to (Müller et al., 2008) of the African-Antarctic sector of the Southern Ocean. Symbols: 1 — axis of mid-ocean ridges; 2 — axis of the paleospreading ridge; 3 — deep-sea drilling wells (DSDP, ODP, IODP); 4 — hot spots; 5 — fault zones; 6 — passive parts of fault zones; 7 — seismic activity of different magnitudes. AAX — American-Antarctic Ridge, АфАХ — African-Antarctic Ridge, ГД — Discovery Seamounts, КГ — Georgia Basin, КТ — Transkei Basin, КХ — Walvis Ridge, МадК — Madagascar basin, МадХ — Madagascar Ridge, МозК — Mozambique basin, МозХ — Mozambique Ridge, ПА — Agulhas Plateau, ПАО — Isles Orcadas Rise, ПБ — Beira Rise, ПДК — Del Cano Rise, ПК — Crozet Plateau, ПМ — Meteor Rise, ПМо — Mod Rise, ПРГ — Rio Grande Plateau, ПСВГ — Northeast Georgia Rise, САХ — Mid-Atlantic Ridge, ТСБ — Bouvet triple junction, ХА — Agulhas Ridge, ХШ — Shona Ridge, ЮЗИХ — Southwest Indian Ridge, ЮСАХ — southern segment of the Mid-Atlantic Ridge.





к западу и к востоку от оси ЮСАХ, соответственно. Они образованы в позднем мелу — раннем палеоцене в результате продвижения к югу нового сегмента спредингового хребта — ЮСАХ. Морфологические различия между поднятиями Айлос Оркадас и Метеор отмечаются в изрезанном и асимметричном характере рельефа дна и фундамента. Вулканическая активность, связанная с деятельностью горячей точки Шона (LaBrecque, Hayes, 1979; Roex et al., 2010; Sleep, 2002), больше проявлялась в южных частях поднятий.

Плато Агульяс располагается на юго-западе Индийского океана примерно в 500 км к югу от Южной Африки. Сейсмические исследования и тектонические реконструкции плит предполагают, что плато Агульяс представляет собой крупную магматическую провинцию, образовавшуюся не ранее 105 млн лет назад в сочетании с поднятиями Северо-Восточная Георгия и Мод (Gohl, Uenzelmann-Neben, 2001; Parsiegla et al., 2008; Uenzelmann-Neben et al., 1999).

Поднятие Северо-Восточная Георгия располагается в юго-западной части Атлантического океана между 30–38° з.д. и 48–56° ю.ш. Западная часть поднятия образует дугообразный хребет в северном направлении, а восточная сторона поднятия представляет собой более широкую и низкую рельефную структуру. Кристофферсен и Лабреку по результатам бурения ODP 114 предположили, что часть поднятия Северо-Восточной Георгии образовалась вблизи центра спрединга, под влиянием интенсивной вулканической деятельности (Kristoffersen, LaBrecque, 1991).

Поднятие Мод располагается в Африканско-Антарктической котловине между 2° з.д. и 8° в.д. и 63–68° 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, образовавшийся в результате взаимодействия спредингового хребта с горячей точкой (Barker et al., 1988).

Мозамбикский хребет расположен к юго-востоку от Африканского континента между 28–52° в.д. и 20–45° ю.ш. Морфологически хребет представляет линейную структуру длиной ~1100 км в своей северной части примыкающую к окраине Африканского континента. Мозамбикский хребет состоит из серии погруженных блоков, разделенных долинами и депрессиями субширотного простирания (Jacques et al., 2019; Mueller, Jokat, 2019). Данный хребет был сформирован 135–125 млн лет назад в несколько этапов, на строение которого оказало большее влияние магматическая активность плюма Кару.

Мадагаскарский хребет расположен южнее острова Мадагаскар между 40–50° в.д. и 25–45° ю.ш.

Он представляет собой вытянутый асейсмический хребет на юго-западе Индийского океана, простирающееся на 1300 км. Глубина океанического дна на большей части хребта составляет от 2000 до 3000 м, хотя подводная гора на южной его половине находится в пределах 20 м от поверхности. Возраст и происхождение Мадагаскарского хребта до сих пор вызывает дискуссии, вследствие чего до сих пор ведутся споры о его строении коры и литосферы.

Асейсмический приразломный хребет Агульяс образованный вдоль Агульяс-Фолклендской разломной зоны, располагается между 9–16° в.д. и 41–43° ю.ш. Хребет представлен двумя параллельными сегментами, разделенными центральной долиной, которые возвышаются более чем на 2000 м над морским дном, и отделяет океаническую кору разного возраста.

Система хребтов и поднятий разделяет дно южной части Атлантического и юго-западной части Индийского океанов на ряд котловин (рис. 1): Бразильскую (~5800 м), Аргентинскую (~5900 м), Георгия (~5500 м), Ангольскую (~6200 м), Капскую (~5600 м), Агульяс (~5800 м), Африканско-Антарктическую (~6200 м), Мозамбикскую (~6000 м) и Мадагаскарскую (~5500 м). В рельефе котловин, существенную роль играют протяженные неактивные следы трансформных разломов, смещающих оси линейных магнитных аномалий. В северо-западной части котловины Агульяс прослеживаются следы одноименного палеоспредингового хребта.

Таким образом, строение рельефа дна Африканско-Антарктического сектора Южного океана сложено большим разнообразием структур, различающихся по морфологии, времени образования, строению коры и литосферы. Такой морфоструктурный план исследуемого региона свидетельствует о сложной эволюции литосферы, значительную роль в которой играла деятельность горячих точек, Шона, Дискавери и Буве и др., сопровождаемая кинематическими перестройками геометрии границ плит, что в свою очередь предполагает гетерогенность глубинного строения тектоносферы, расшифровать которую может помочь анализ аномального гравитационного и магнитного полей.

## АНАЛИЗ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Исследуемый регион *в поле силы тяжести в свободном воздухе* характеризуется как отрицательными, так и положительными значениями поля разной интенсивности (рис. 2а). Котловины проявляются средними значениями поля, которые изменяются от –20 до +20 мГал. Котловина Агульяс в поле силы тяжести в свободном



воздухе выражена в основном положительными значениями аномалий. В северо-восточной области котловина осложнена линейно-вытянутой отрицательной аномалией, амплитуда которой достигает  $-65$  мГал и приурочена к палеоспрединговому хребту Агульяс. Капская котловина отделяется от котловины Агульяс интенсивной линейно-вытянутой в юго-восточном направлении отрицательной аномалией (до  $-100$  мГал), которая приурочена к Агульяс-Фолкленской разломной зоне. В Мозамбикской котловине преобладает отрицательный знак аномального гравитационного поля в свободном воздухе, а также прослеживаются множественные следы неактивных частей трансформных разломов.

Африканско-Антарктическая котловина проявлена сложным характером распределения аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе, разделяясь на три части. Западная область котловины характеризуется отрицательными аномалиями средней интенсивности (до  $-15$  мГал), нарушаемые линейно-вытянутыми аномалиями юго-восточного простирания амплитудой до  $-30$  мГал (следами разломных зон). В центральной области преобладает положительный знак аномалии поля (до  $30$  мГал), осложненный изометричными интенсивными положительными аномалиями, которые связаны с вулканическими горами. Эта область котловины отделяется от восточной линейно-вытянутой аномалией (до  $-40$  мГал) северо-восточного простирания, приуроченной к неактивной части разлома. Восточная область котловины также характеризуется положительными аномалиями.

Ангольская и Бразильская котловины проявлены сильно изрезанным знакопеременным полем, обусловленным множественными следами трансформных разломов.

Срединно-океанические хребты представлены линейно-вытянутыми аномалиями разной интенсивности, которые в центральной части осложнены отрицательной аномалией амплитудой до  $-60$  мГал и нарушены разломными зонами.

Поднятия Африкано-Антарктического сектора Южного океана характеризуются положительными аномалиями, амплитуда которых изменяется от  $30$  до  $130$  мГал. Большие амплитуды аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе могут свидетельствовать о значительной роли магматизма в формировании поднятий в данной области.

По результатам анализа аномалий гравитационного поля в свободном воздухе выделено четырнадцать подобластей, которые были объединены в три основные области (рис. 2б), приуроченные к глубоководным котловинам, осям срединно-океанических хребтов и их флангам, а также к поднятиям разного генезиса.

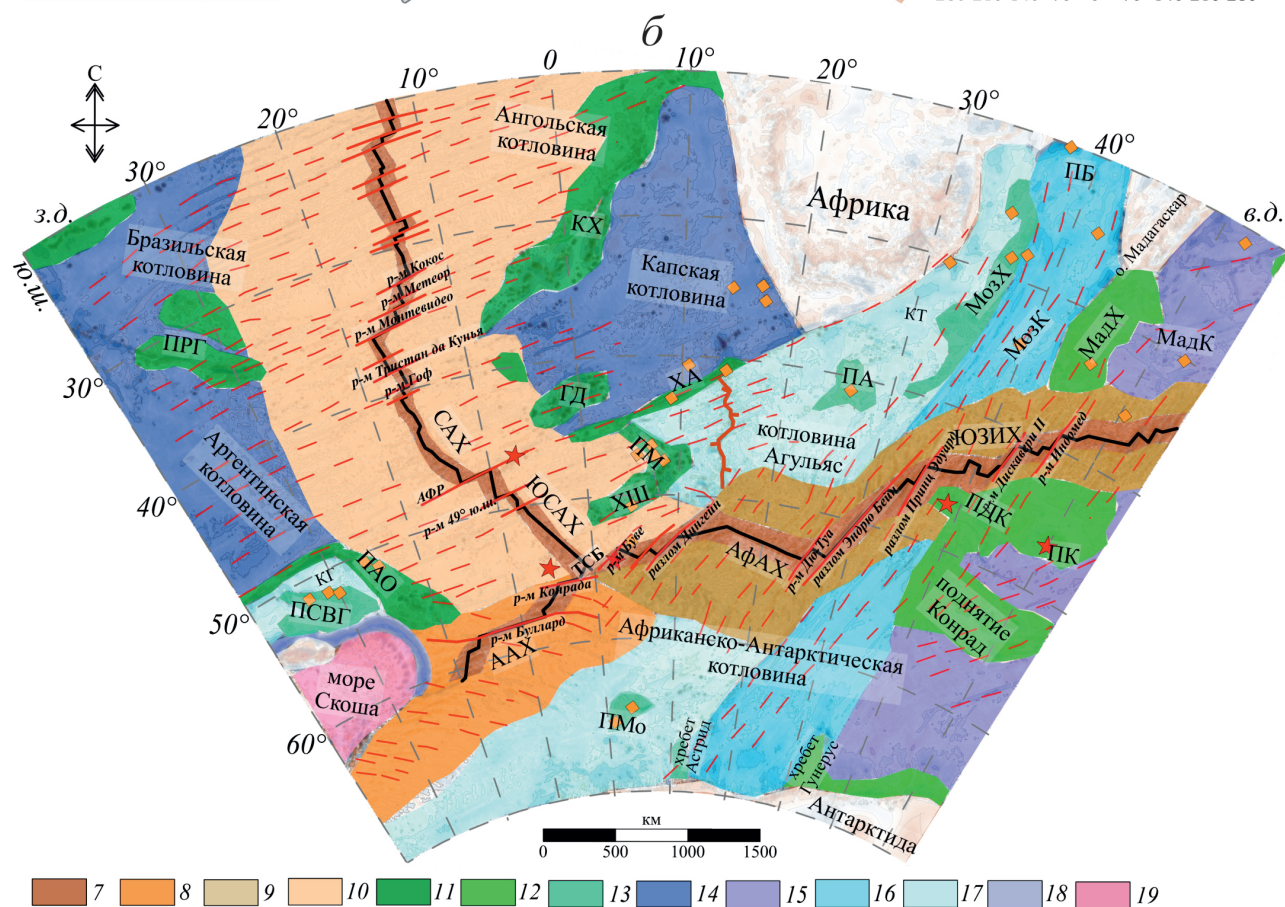
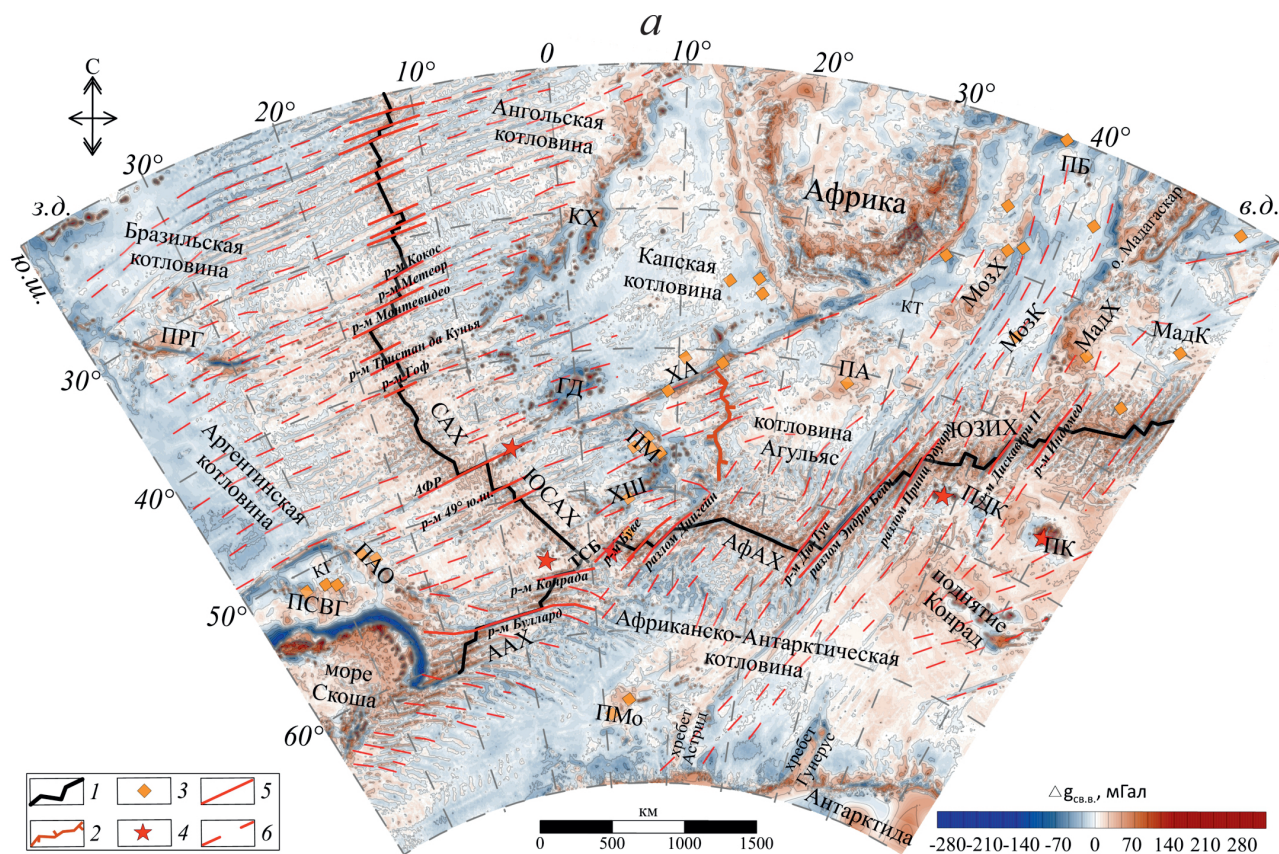
Африкано-Антарктический сектор Южного океана в поле аномалий силы тяжести в редукции Буге представлен преимущественно положительными значениями поля разной интенсивности в областях с океанической, утоненной континентальной, утолщенной океанической коры и переходной зоне (рис. 3а).

Глубоководные котловины характеризуются ярко выраженными повышенными значениями аномалий от  $460$  до  $650$  мГал. Срединно-океанические хребты проявляются линейно-вытянутыми аномалиями пониженных значений по сравнению с прилегающими котловинами, их амплитуда меняется в пределах от  $170$  до  $360$  мГал, что свидетельствует об относительном разуплотнении их тектоносферы.

Поднятия исследуемого региона также характеризуются пониженными значениями поля, амплитуда которых варьирует от  $130$  до  $450$  мГал. Понижение интенсивности аномалий может свидетельствовать о магматическом воздействии на формирование поднятий и наличии утолщенной базальтовой коры их подстилающей. Например, вулканическим поднятиям и хребтам — Метеор, Шона, горам Дисквери и Китовому хребту соответствует цепочка интенсивно пониженных аномалий, амплитуда которых уменьшается до  $70$  мГал. Мозамбикский хребет, имеющий блоковое строение, проявлен аномалиями

**Рис. 2.** Аномальное гравитационное поле в свободном воздухе (а), по данным (Sandwell et al., 2014) и схема районирования (б) Африкано-Антарктического сектора Южного океана. Условные обозначения 1–6 см. на рис. 1. Цветом обозначены области, выделенные по анализу гравитационного поля в свободном воздухе: 7 — оси срединно-океанических хребтов; 8 — фланговая часть АфАХ-ЮЗИХ; 9 — фланговая часть ААХ; 10 — фланговая часть САХ; 11 — поднятия магматической природы Атлантики; 12 — поднятия магматической природы Индийского океана; 13 — поднятия, осложненные магматизмом; 14–17 — глубоководные котловины разной амплитудой; 18 — глубоководный желоб; 19 — море Скоша.

**Fig. 2.** Anomalous gravitational field in free air (a), according to (Sandwell et al., 2014) and the zoning scheme (b) of the African-Antarctic sector of the Southern Ocean. For symbols 1–6 see in Fig. 1. The color indicates the areas identified by the analysis of the gravitational field in free air: 7 — axes of mid-oceanic ridges; 8 — flanking part of the AfAR-SWIR; 9 — flanking part of the AAR; 10 — flanking part of the MAR; 11 — magmatic rises in the Atlantic; 12 — magmatic rises in the Indian Ocean; 13 — rises complicated by magmatism; 14–17 — deep-sea basins of different amplitude; 18 — deep-sea trough; 19 — Scotia Sea.





интенсивностью от 240 до 350 мГал на севере и от 140 до 370 мГал на юге. Данная характеристика хребта позволяет предположить, что северная его часть сложена утоненной континентальной корой, а на юге — корой океанического типа, утолщенной за счет андерплейтинга с возможным включением фрагментов континентальной коры.

На основе анализа аномалий гравитационного поля в редукции Буге Африкано-Антарктического сектора Южного океана построена схема структурного районирования (рис. 3б), на которой выделено четыре основных области. Первая приурочена к осям спрединговых хребтов и их флангам, вторая — к переходной зоне от континентальной литосферы к океанической, третья — к поднятиям разного строения, четвертая — к глубоководным котловинам.

### АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАНТ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В РЕДУКЦИИ БУГЕ

Были рассчитаны различные трансформации аномального гравитационного и магнитного полей с целью отражения глубинных неоднородностей. Низкочастотная компонента представлена полем, пересчитанным на высоту 200 км; среднечастотная компонента — полем разностных аномалий, пересчитанных на высоты 75 и 150 км; высокочастотная компонента — разностным полем между исходным и пересчитанным на высоту 50 км, а также полем вертикального градиента аномалий Буге ( $V_{zz}$ ) на нулевом уровне.

Анализ компонент поля силы тяжести в редукции Буге показал, что низко-, средне- и высокочастотная компоненты — имеют унаследованный характер: аномальные особенности которых укладываются в границы областей и зон, выделенных по низкочастотной компоненте гравитационного поля, и высвечивают все более детальную картину поля аномалий силы тяжести по мере перехода от низкочастотной компоненты к высокочастотной.

Низкочастотные компоненты хорошо согласуются с региональным рельефом дна океана. Аномалии с относительно пониженными значениями поля компоненты приходится на области с глубинами меньше 3 км, ним относятся поднятия и срединно-океанические хребты. Аномалии с повышенными интенсивными значениями низкочастотной компоненты приурочены к областям котловин с глубинами больше 5 км.

В поле низкочастотной компоненты прослеживаются два региональных направления, которые контролируют и разделяют границы крупных аномальных областей поля, связанные с основными структурными элементами рассматриваемого региона. По этой компоненте выделено пять областей, три из которых с повышенными значениями поля, приуроченные к глубоководным котловинам, и две области пониженных значений — САХ и ЮЗИХ.

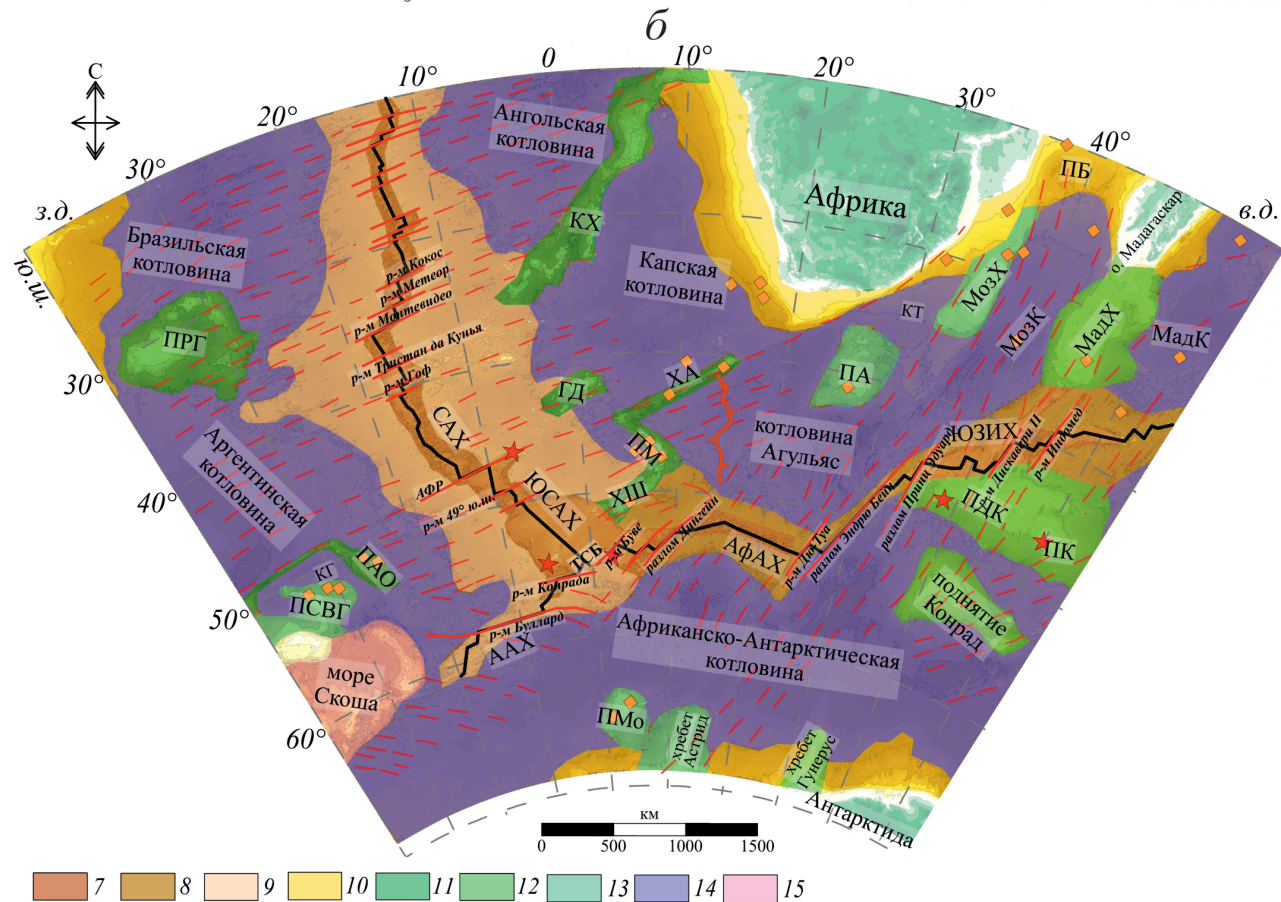
Сопоставив результаты районирования поля среднечастотной компоненты с данными возраста океанического дна, получена взаимосвязь между выделенными структурными элементами компоненты и возрастом дна, а также строения литосферы в целом. В этой компоненте выделяются области с более древней и мощной литосферой (Мозамбикская котловина), области градиентного изменения мощности литосферы в зависимости от возраста в спрединговых областях, а также области с аномальной мощностью, которые связаны с активностью горячих точек (Мадагаскарский хребет, поднятия Дель Кано и Конрад, Китовый хребет, горы Дискавери, поднятия Метеор и Айлос Оркадас).

Высокочастотная компонента дает более четкое представление о типе и характере коры, поскольку в ней выделяются локальные особенности среднечастотной компоненты, которые дают новые характеристики строения океанической коры.

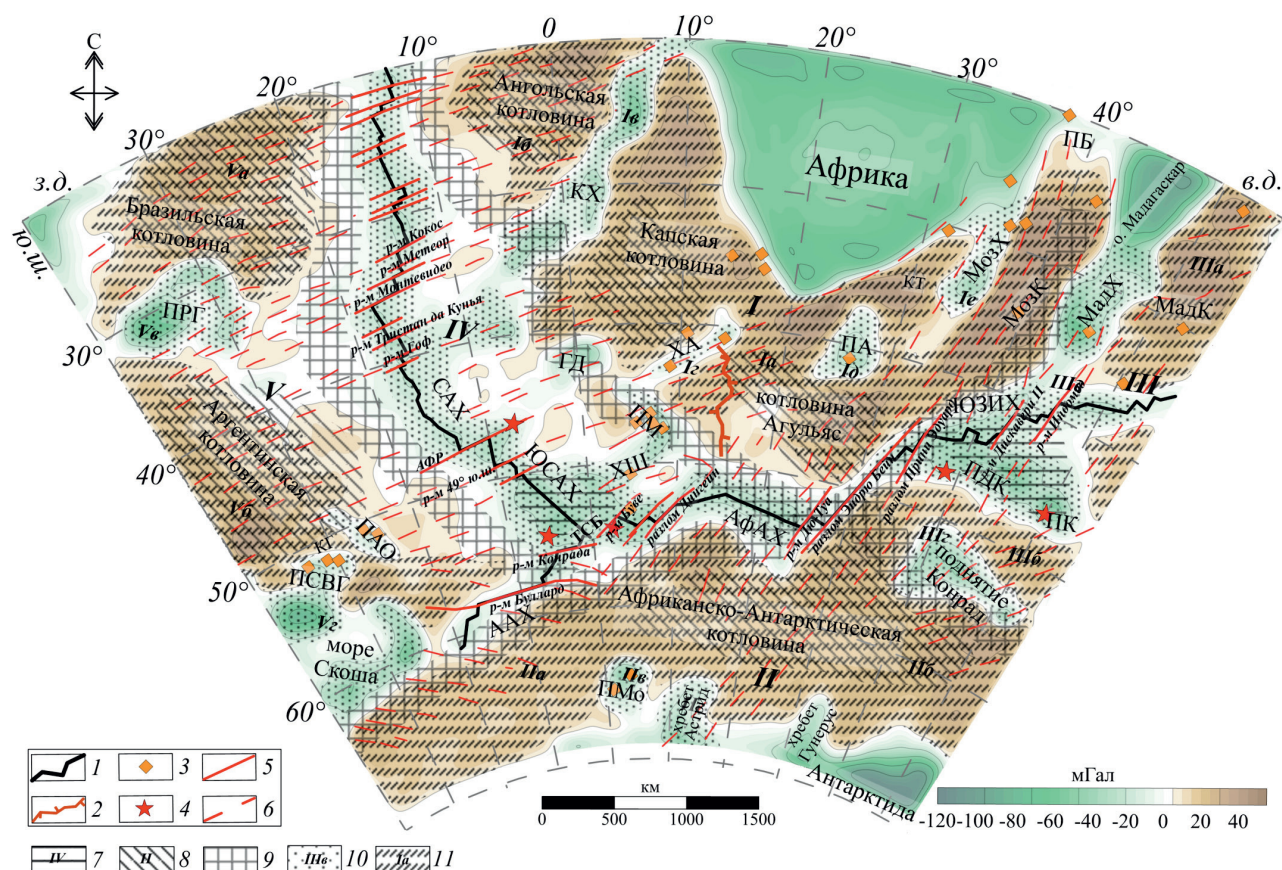
На основе анализа компонент поля силы тяжести в редукции Буге построена структурная схема, представленная на рисунке 4.

**Рис. 3.** Аномальное гравитационное поле в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя  $2.67 \text{ г/см}^3$  (а) и схема районирования (б) Африкано-Антарктического сектора Южного океана. Условные обозначения 1–6 см. на рис. 1. Цветом обозначены области, выделенные по анализу гравитационного поля в редукции Буге: 7 — ось срединно-океанических хребтов; 8 — фланговая часть АфАХ-ЮЗИХ; 9 — фланговая часть САХ; 10 — переходные зоны континент-океан; 11 — поднятия магматической природы Атлантики; 12 — поднятия магматической природы Индийского океана; 13 — поднятия, осложненные магматизмом; 14 — глубоководные котловины; 15 — море Скоша.

**Fig. 3.** The anomalous gravitational field in the Bouger reduction with an intermediate layer density of  $2.67 \text{ g/cm}^3$  (a) and the zoning scheme (b) of the African-Antarctic sector of the Southern Ocean. For symbols 1–6 see Fig. 1. Colored areas identified by the analysis of the gravitational field in the Bouger reduction: 7 — axes of mid-oceanic ridges; 8 — flanking part of the AfAR-SWIR; 9 — flanking part of the MAR; 10 — continent—ocean transition zones; 11 — magmatic rises in the Atlantic; 12 — magmatic rises in the Indian Ocean; 13 — rises complicated by magmatism; 14 — deep—sea basins; 15 — Scotia Sea.







**Рис. 4.** Среднечастотная компонента гравитационного поля в редукции Буге с наложением элементов структурной схемы. Условные обозначения 1–6 см. на рис. 1. 7 — отрицательные области, выделенные по низкочастотной компоненте гравитационного поля; 8 — положительные области, выделенные по низкочастотной компоненте гравитационного поля; 9 — линеаменты низкочастотной компоненты аномального гравитационного и магнитного полей, представленные интенсивными аномальными областями; 10 — положительные области, выделенные по среднечастотной компоненте гравитационного поля; 11 — положительные области, выделенные по среднечастотной компоненте гравитационного поля.

**Fig. 4.** The mid-frequency component of the gravitational field in the Bouger reduction with the superposition of structural scheme elements. For symbols 1–6 see in Fig. 1. 7 — negative areas, selected by the low-frequency component of the gravitational field; 8 — positive areas, selected by the low-frequency component of the gravitational field; 9 — lineaments of the low-frequency component of the anomalous gravitational and magnetic fields, represented by intense anomalous regions; 10 — positive areas identified by the medium-frequency component of the gravitational field; 11 — positive areas selected by the medium-frequency component of the gravitational field.

### АНАЛИЗ АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ $\Delta T_a$

Аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$  представлено преимущественно линейными знакопеременными локальными аномалиями спредингового типа разной интенсивности и простирания. На карте аномального магнитного поля хорошо выделяются различные типы разломов, в том числе трансформные разломы и их пассивные следы, а также другие линеаменты. Эти линеаменты разделяют область исследования на участки с различным простиранием, нарушением последовательности, амплитудой и густотой линейных аномалий (рис. 5а). Границы областей проводятся по линиям изменения этих параметров поля, проходящим, как правило,

в направлении преимущественно простиранию линейных аномалий, и следуя линиям разрыва непрерывности линейных локальных аномалий. Вдоль этих границ прослеживаются локальные знакопеременные аномалии того же простирания, что и границы. Границы изменения простираний серий магнитных аномалий, как правило, разделяют участки коры и литосферы, сформированные на разных спрединговых хребтах. Они являются следами палеограниц плит, или шовными зонами литосферы, сформированными в результате перескоков осей спрединга, эволюции тройных соединений и других кинематических перестроек (Дубинин и др., 1999). Эти границы не всегда отражаются в рельефе дна.

Аномалии магнитного поля над срединно-океаническими хребтами одностипны по

характеру и ориентированы по простиранию хребта, нарушаются только в областях трансформных разломов.

Сложный характер магнитного поля имеет Африканско-Антарктическая котловина. В западной части котловины, в районе поднятия Мод и хребта Астрид, аномалии магнитного поля имеют интенсивные знакопеременные значения хаотичного направления, от  $-400$  до  $+400$  нТл. Восточная часть Африканско-Антарктической котловины характеризуется разнонаправленными аномалиями средней интенсивности.

Котловина Агульяс в магнитном поле делится на северную и южную части. Амплитуда линейных аномалий северной части выше и меняется от  $-270$  до  $+270$  нТл, а сами аномалии простираются в северо-западном направлении. Эта область котловины относится к центру спрединга отмершего хребта Агульяс. Южная часть котловины Агульяс проявляется пониженными значениями поля, интенсивность которых варьирует от  $-150$  до  $+150$  нТл. Направление аномалий в этой части изменяется на субширотное.

Капская котловина характеризуется спокойным полем с линейно-вытянутыми аномалиями северо-западного направления. Амплитуда аномалий в котловине составляет от  $-50$  до  $+50$  нТл, плавно увеличиваясь к Китовому хребту и хребту Агульяс.

В области Китового хребта, подводных гор Дискавери, поднятия Метеор и хребта Шона аномальное магнитное поле характеризуется интенсивными знакопеременными линейно-вытянутыми аномалиями северо-западного направления, которые смещаются в зонах трансформных разломов, что может свидетельствовать о магматическом воздействии в условиях спрединга на строение этих структур.

Поднятия юго-западной части Индийского океана (плато Агульяс, Мозамбикский и Мадагаскарский хребты) характеризуются

интенсивными знакопеременными аномалиями субширотного простирания, амплитуда которых убывает в южном направлении.

Область котловины Георгия, поднятий Северо-Восточная Георгия и Айлос Оркадас характеризуется преимущественно положительными значениями аномалий магнитного поля (до  $+370$  нТл). В юго-западной части от поднятия Айлос Оркадас наблюдается изометричная высокоинтенсивная отрицательная аномалия, амплитудой до  $-400$  нТл, которая может быть связана с действием горячей точки Шона.

По результатам анализа и приведенного описания составлена схема районирования Африкано-Антарктического сектора Южного океана по аномальному магнитному полю (рис. 5б), на которой выделено четыре основные области: а) оси срединно-океанических хребтов и их фланги; б) переходные области от континентальной литосферы к океанической; в) глубоководные котловины; г) подводные поднятия разного генезиса.

## ВЫВОДЫ

Анализ аномальных гравитационных и магнитного полей позволил выявить характеристики типов земной коры для исследуемого региона и сделать выводы о том, что

– океаническая кора в аномальном гравитационном поле в свободном воздухе характеризуется средними значениями аномалий обоих знаков ( $-25 \div +30$  мГал), а в редукции Буге более 500 мГал. В аномальном магнитном поле  $\Delta T_a$  обладает знакопеременными линейно-вытянутыми аномалиями разной интенсивности и направления, как правило, совпадающими с осью современных и палеоспрединговых хребтов;

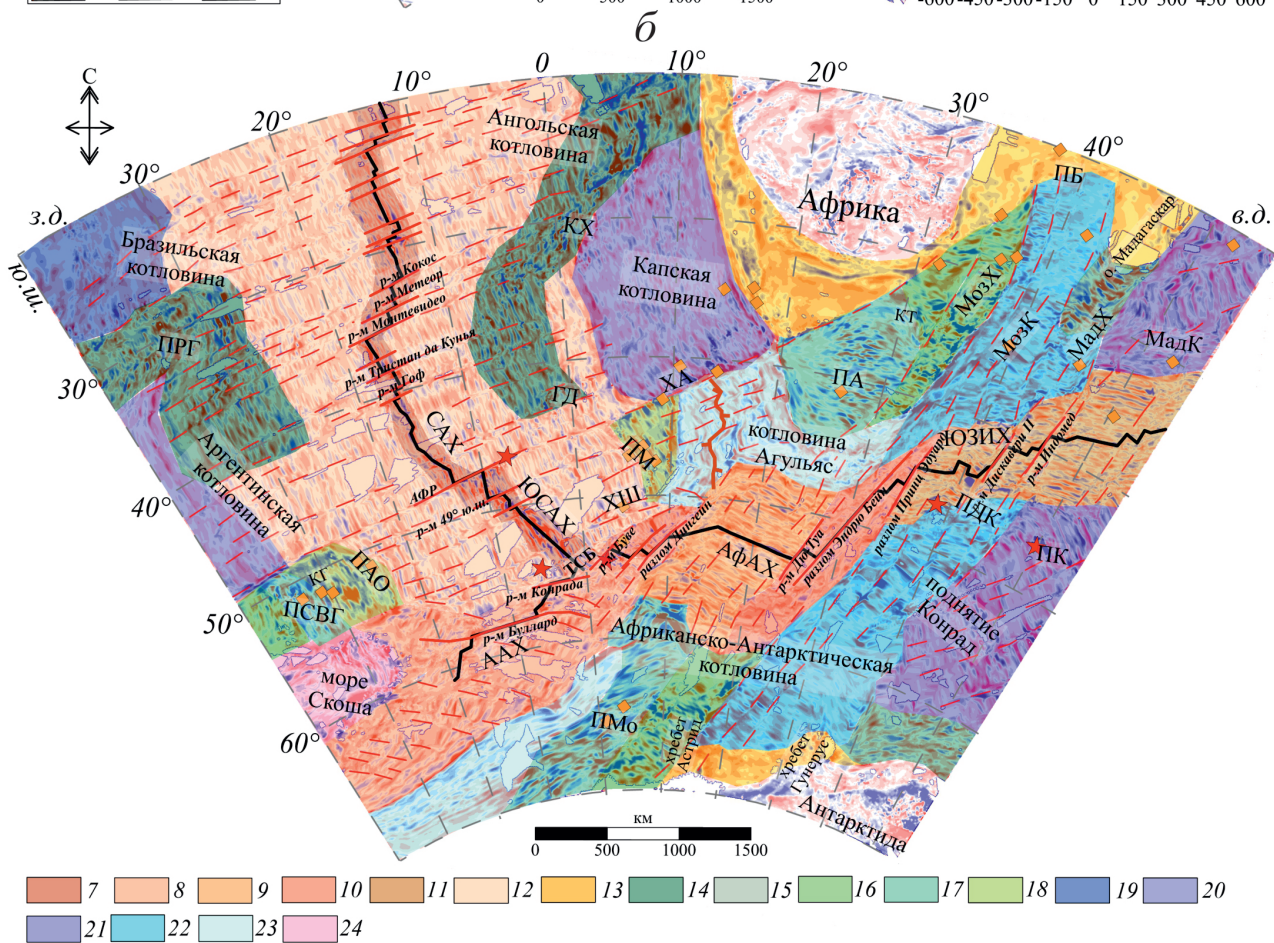
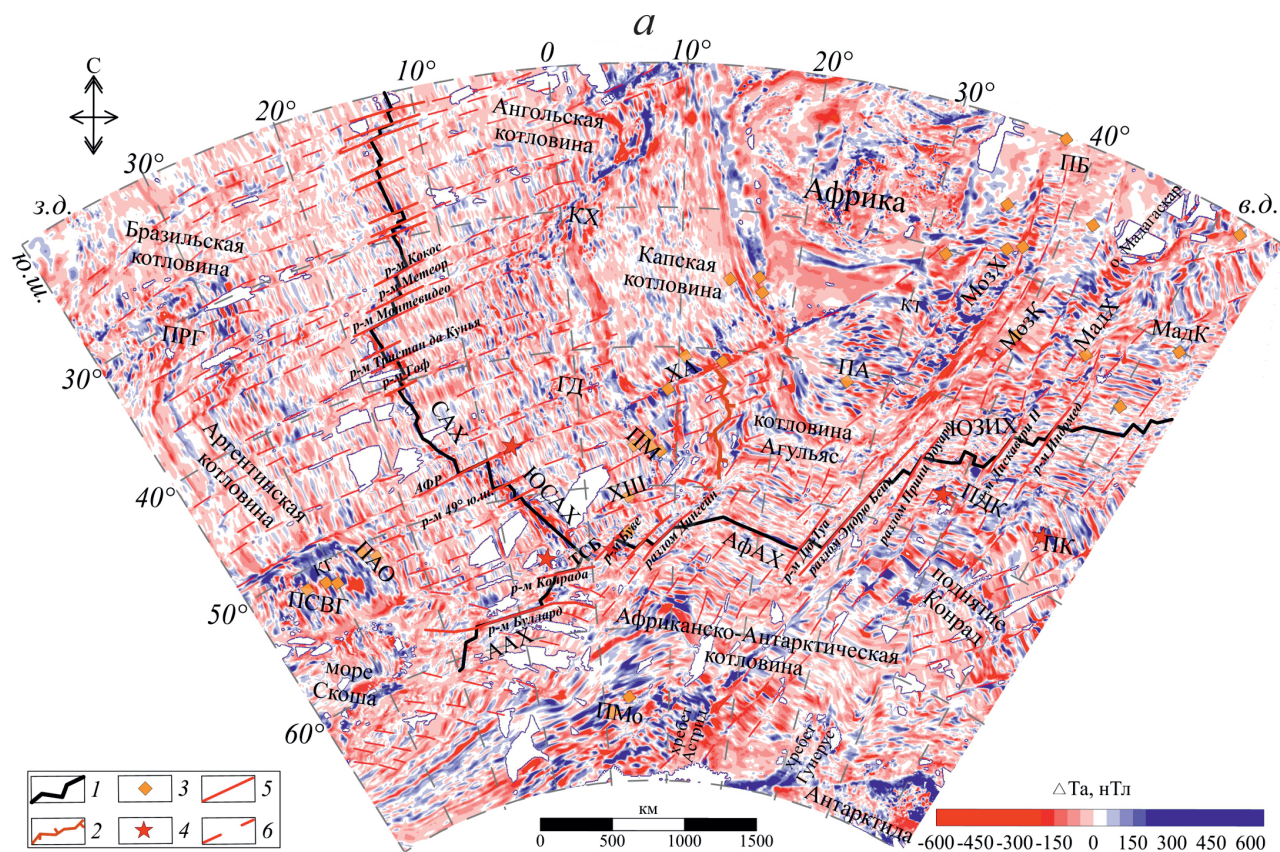
– высокоамплитудные аномалии магнитного и гравитационного поля в свободном воздухе

**Рис. 5.** Аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$  (а) и схема районирования (б) Африкано-Антарктического сектора Южного океана, по данным (Meyer et al., 2017). Условные обозначения 1–6 см. на рис. 1. Цветом обозначены области, выделенные по анализу магнитного поля: 7 — оси срединно-океанических хребтов; 8 — фланговая часть ААХ; 9 — фланговая часть АфАХ; 10 — область разломов ДюТуа-Эндрю Бейн-Принц Эдуард; 11 — фланговая часть ЮЗИХ; 12 — фланговая часть САХ; 13 — переходные зоны континент-океан; 14 — поднятия магматической природы Атлантики; 15 — поднятия магматической природы Индийского океана; 16 — поднятия осложненные магматизмом; 17 — поднятия крупной магматической провинции; 18 — поднятия, образованные в результате перескока спрединга; 19–23 — глубоководные котловины разной амплитуды и направлением аномалий; 24 — море Скоша.

**Fig. 5.** The anomalous magnetic field of  $\Delta T_a$  (a) and the zoning scheme (b) of the African-Antarctic sector of the Southern Ocean, according to (Meyer et al., 2017). For symbols 1–6 see in Fig. 1. The areas selected by analysis of the magnetic field are highlighted by color: 7 — axes of mid-oceanic ridges; 8 — flanking part of the AAR; 9 — flanking part of the AfAR; 10 — Fault Region Du Toit-Andrew Bain-Prince Edward; 11 — flanking part of the SWIR; 12 — flanking part of the MAR; 13 — continent—ocean transition zones; 14 — magmatic rises in the Atlantic; 15 — magmatic rises in the Indian Ocean; 16 — rises complicated by magmatism; 17 — rises of a large magmatic province; 18 — rises formed as a result of the spreading jump; 19–23 — deep—sea basins of different amplitude and anomaly directions; 24 — Scotia Sea.



# СТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ



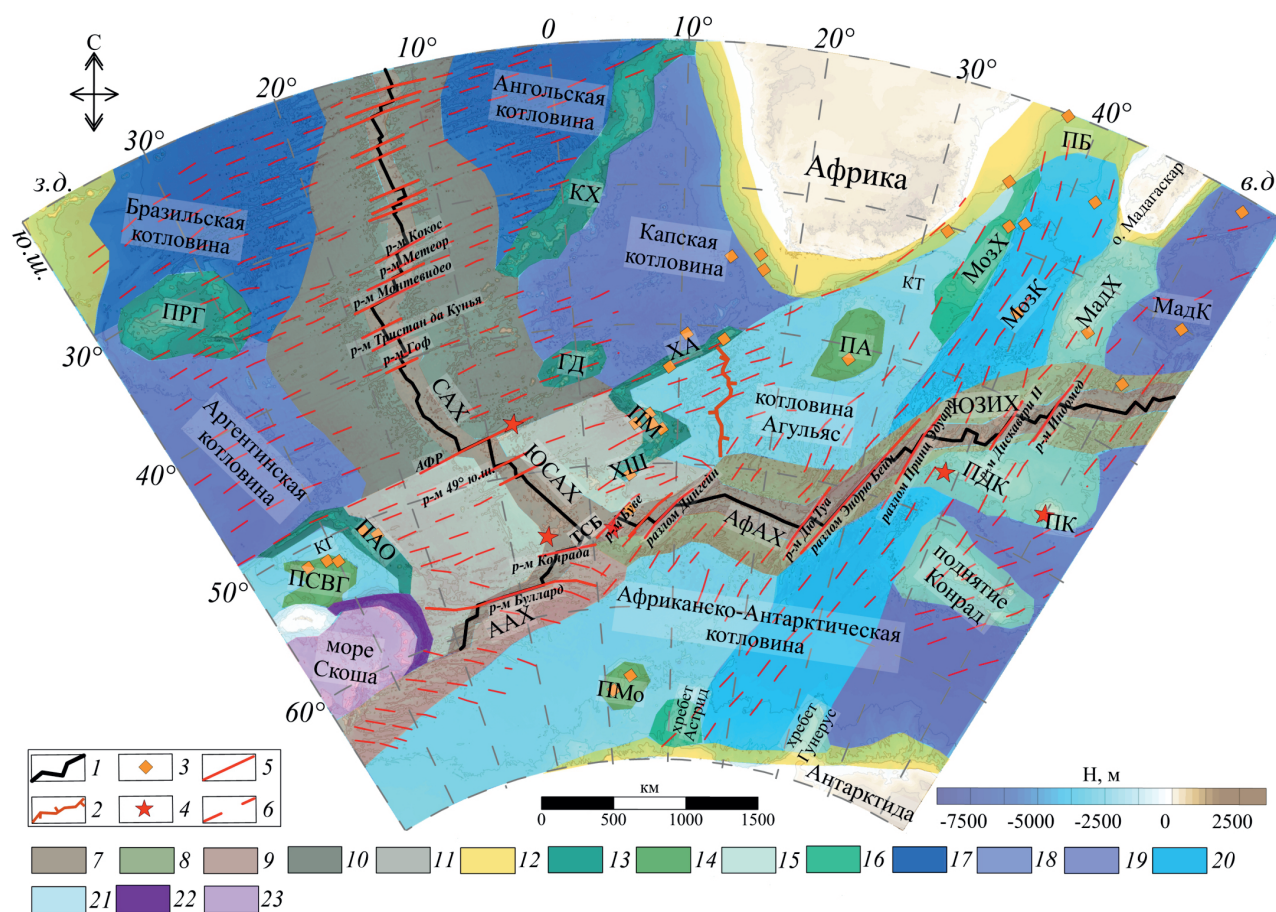


приурочены к областям с высоким магматизмом и, как следствие, к областям с утолщенным океаническим типом коры. В поле силы тяжести в редукции Буге эти области, наоборот, имеют менее интенсивные аномалии (от 10 до 130 мГал);

– утоненная континентальная кора характеризуется небольшой амплитудой аномалий, для аномального поля силы тяжести в редукции Буге, интенсивность которых варьирует от 200 до 350 мГал, в редукции за свободный воздух достигает до 50 мГал.

Разнообразие типов морфоструктур и сложный характер аномальных геофизических полей

в Африкано-Антарктическом секторе Южного океана характеризуют историю развития литосферы этого региона. На основе структурного анализа аномальных полей построена обобщенная схема районирования, на которой выделены области (литосферные блоки), с корой, сформированной на разных спрединговых хребтах, отличающиеся строением тектоносферы и историей развития (рис. 6). Границами между блоками, как правило, служат подводные поднятия или палеограницы плит, которые представляют собой следы перескоков осей спрединга, следы продвижения нового спредингового хребта в



**Рис. 6.** Схема структурного районирования Африкано-Антарктического сектора Южного океана по анализу аномальных гравитационных и магнитного полей (наложена на рельеф океанического дна). Условные обозначения 1–6 см. на рис. 1. 7 — оси срединно-океанических хребтов; 8 — фланговая часть АфАХ-ЮЗИХ; 9 — фланговая часть ААХ; 10 — фланговая часть САХ; 11 — фланговая часть ЮСАХ; 12 — области переходной зоны от континентальной литосферы к океанической; 13 — поднятия магматической природы Атлантики; 14 — поднятия крупной магматической провинции; 15 — поднятия магматической природы Индийского океана; 16 — поднятия осложненные магматизмом; 17–22 — области с древней мощной океанической корой, приуроченные к глубоководным котловинам разной амплитуды и направлением аномалий; 23 — море Скоша.

**Fig. 6.** The scheme of structural zoning of the African-Antarctic sector of the Southern Ocean based on the analysis of anomalous gravitational and magnetic fields (superimposed on the ocean floor relief). For symbols 1–6 see in Fig. 1. 7 — axes of mid-oceanic ridges; 8 — flanking part of the AfAR-SWIR; 9 — flanking part of the AAR; 10 — flanking part of the MAR; 11 — flanking part of the SMAR; 12 — areas of transition zone from continental lithosphere to oceanic; 13 — magmatic rises in the Atlantic; 14 — rises of a large magmatic province; 15 — magmatic rises in the Indian Ocean; 16 — rises complicated by magmatism; 17–22 — areas with ancient thick oceanic crust, confined to deep-sea basins of different amplitude and direction of anomalies; 23 — Scotia Sea.



пределы старой океанической литосферы, собственно палеоспрединговые хребты и пассивные следы трансформных разломов.

Выделены четыре основных группы областей. Первая группа — область с древней мощной океанической корой, которая приурочена к глубоководным котловинам и характеризуется: а) интенсивными максимумами низко- и среднечастотной компонент поля силы тяжести, амплитудой более 450 мГал, и положительными аномалиями высокочастотной компоненты; б) отрицательными значениями компонент магнитного поля и знакопеременными малоамплитудными локальными аномалиями; в) возрастом океанического дна более 60 млн лет; г) глубиной дна более 5 км.

Вторая — область с океанической корой, которая образована в результате спрединга и характеризуется: а) интенсивными региональными меняющимися аномалиями гравитационного поля (от пониженных значений на оси спрединга до повышенных на фланговых зонах) и отрицательными аномалиями высокочастотной компоненты поля, нарушаемыми вкрест простирания оси аномалиями, связанными с разломными зонами; б) меняющимися региональными аномалиями магнитного поля (положительные — в осевой части хребта, отрицательные — на флангах) и линейными знакопеременными аномалиями с максимальной амплитудой в приосевой области спредингового хребта; в) возрастом океанического дна от 0 до 10 млн лет в осевой области и более 15 млн лет на фланговых; г) изменением глубины с 2 км в приосевой области до 4 км на фланговых.

Третья группа соответствует области переходной зоны от континентальной литосферы к океанической, которая характеризуется: а) интенсивной градиентной зоной в низко и среднечастотной компоненте гравитационного поля; б) интенсивными отрицательными аномалиями в региональном магнитном поле; в) изменением глубины дна от 0 до 3 км; г) возрастом океанического дна более 100 млн лет.

Четвертая группа приурочена к областям океанической литосферы с аномальной корой, т.е. подводным поднятиям, асейсмическим хребтам и плато, которые характеризуются: а) пониженными значениями поля низко- и среднечастотной компоненты и достаточно интенсивными локальными аномалиями в гравитационном поле; б) региональными положительными и локальными мозаичными обоими знаками аномалиями магнитного поля; в) глубинами дна 2–3 км; г) возрастом дна более 60 млн лет.

Представленное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-27-00110).

Булычев А.А., Кривошея К.В., Мелихов В.Р., Зальцман Р.В. Вычисление аномального гравитационного потенциала и его производных на сфере // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 1998. № 2. С. 42–46 [Bulychev A.A., Krivosheya K.V., Melikhov V.R., Saltzman R.V. Calculation of the anomalous gravitational potential and its derivatives on a sphere // Bulletin of the Moscow University. Series 4. Geology. 1998. № 2. P. 42–46 (in Russian)].

Дубинин Е.П., Сушевская Н.М., Грохольский А.Л. История развития спрединговых хребтов Южной Атлантики и пространственно-временное положение тройного соединения Буве // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 5. С. 423–443 [Dubinin E.P., Sushchevskaya N.M., Grokhol'skiy A.L. The history of South Atlantic spreading ridges development and time – space position of Bouve triple connection // Russian Journal of Earth Sciences. 1999. V. 1. № 5. P. 423–443 (in Russian)].

Лейченко Г.Л., Сушевская Н.М., Беляцкий Б.В. Геодинамика Атлантического и Индийского секторов Южного океана. // Доклады Академии наук. 2003. Т. 391. № 2. С. 228–231 [Leichenkov G.L., Sushchevskaya N.M., Belyatsky B.V. Geodynamics of the Atlantic and Indian sectors of the South ocean // Doklady Earth Sciences. 2003. V. 391. № 2. P. 228–231 (in Russian)].

Пейве А.А., Зителлини Н., Перфильев А.С. и др. Строение Срединно-Атлантического хребта в районе тройного соединения Буве // Доклады академии наук. 1994. Т. 338. № 5. С. 645–648 [Peive A.A., Zitellini N., Perfiliev A.S. et al. The structure of the Mid-Atlantic ridge in the area of the triple junction of the Bouvet // Reports of the Academy of Sciences. 1994. V. 338. № 5. P. 645–648. (in Russian)].

Пейве А.А., Турко Н.Н., Цуканов Н.В. и др. Особенности строения поднятия Риу-Гранди (Южная Атлантика) // Доклады академии наук. 2004. Т. 397. № 4. С. 511–516 [Peive A.A., Turko N.N., Tsukanov N.V. et al. Features of the structure of the Rio Grande Plateau (South Atlantic) // Reports of the Academy of Sciences. 2004. V. 397. № 4. P. 511–516 (in Russian)].

Рыжова Д.А. Строение тектоносферы подводных поднятий Африкано-Антарктического сектора Южного океана по геофизическим данным. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Москва, 2023. 25 с. [Ryzhova D.A. Structure of the tectonosphere of underwater rises of the African-Antarctic sector of the Southern Ocean according to geophysical data. Autoref. diss. cand. geol.-min. of sciences. Moscow, 2023. 25 p. (in Russian)].

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов / М.: Научный мир. 2001. 606 с. [Khain V.E. Tectonics of continents and oceans (year 2000). Moscow: Scientific world. 2001. 606 p. (in Russian)].

Barke P.E., Kennett J.P., O'Connell S. et al. Shipboard Scientific Party: Site 689 // Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 1988. V. 113. № 5. 89–181. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.ir.113.106.1988>

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.
- Gohl K., Uenzelmann-Neben G. The crustal role of the Agulhas Plateau, southwest Indian Ocean: evidence from seismic profiling // *Geophysical Journal International*. 2001. V. 144. Iss. 3. P. 632–646. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01368.x>
- Jacques G., Hauff F., Hoernle K., Werner R. et al. Nature and origin of the Mozambique Ridge, SW Indian Ocean // *Chemical Geology*. 2019. V. 507. Iss. 0009-2541. P. 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.027>
- Kristoffersen Y., LaBrecque J.L. On the tectonic history and origin of the Northeast Georgia Rise // *Proc., scientific results, ODP, Leg 114, subantarctic South Atlantic*. 1991. V. 114. P. 23–38.
- LaBrecque J.L., Hayes D.E. Seafloor spreading history of the Agulhas Basin // *Earth and Planetary Science Letters*. 1979. V. 45. Iss. 2. P. 411–428.
- Meyer B., Chulliat A., Saltus R. Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 arc min Resolution Version 3 (EMAG2v3) // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2017. V. 18. Iss. 12. P. 4522–4537. <https://doi.org/10.1002/2017GC007280>
- Mueller C.O., Jokat W. The initial Gondwana break-up: A synthesis based on new potential field data of the Africa-Antarctica Corridor // *Tectonophysics*. 2019. V. 750. Iss. 0040-1951. P. 301–328. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.11.008>
- Müller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9. Q04006. <https://doi.org/10.1029/2007GC001743>
- Parsiegla N., Gohl K., Uenzelmann-Neben G. The Agulhas Plateau: Structure and Evolution of a Large Igneous Province // *Geophysical Journal International*. 2008. V. 174. № 1. P. 336–350. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03808.x>
- Roex A.L., Class C., O'Connor J.M., Jokat W. Shona and Discovery Aseismic Ridge Systems, South Atlantic: Trace Element Evidence for Enriched Mantle Sources // *Journal of Petrology*. 2010. V. 51. № 10. P. 2089–2120.
- Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F. et al. New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science*. 2014. V. 346. № 6205. P. 65–67 <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
- Sleep N.H. Ridge-crossing mantle plumes and gaps in tracks. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2002. V. 3. Iss. 12. P. 1–33. <https://doi.org/10.1029/2001GC000290>
- Uenzelmann-Neben G., Gohl K., Ehrhardt A., Seargent M. Agulhas Plateau, SW Indian Ocean: new evidence for excessive volcanism // *Geophysical Research Letters*. 1999. V. 26. Iss. 13. P. 1941–1944. <https://doi.org/10.1029/1999GL900391>

## STRUCTURAL ZONING OF THE AFRICAN-ANTARCTIC SECTOR OF THE SOUTHERN OCEAN BASED ON THE ANALYSIS OF ANOMALOUS GRAVITY AND MAGNETIC FIELDS

D.A. Ryzhova<sup>1</sup>, E.P. Dubinin<sup>2</sup>, M.V. Kosnyreva<sup>1</sup>, A.A. Bulychev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia, 119991

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Museum of Earth Science, Moscow, Russia, 119991

Received March 03, 2023; revised May 03, 2023; accepted June 26, 2023

The African-Antarctic sector of the Southern Ocean is the least studied part of the World Ocean, the structure and evolution of the tectonosphere of which remains debatable. The complex history of the development of the region under study, accompanied by manifestations of intense magmatic and tectonic activity, has contributed to the formation of a number of large underwater ridges and rises. Identifying the features of the deep structure of the tectonosphere on the basis of the analysis of geophysical information and understanding the geodynamic nature of the morphostructures of the studied region is an urgent problem of marine geophysics and geodynamics. Structural analysis of the anomalous gravitational and magnetic fields of the studied region was carried out. Zoning scheme by the anomalous fields as well as a generalized scheme are constructed. The results of the studies made it possible to identify heterogeneous blocks of the lithosphere, which for different spreading ridges and are separated by submarine rises.

**Keywords:** anomalous gravitational and magnetic fields, tectonosphere, structural zoning.