

УДК 550.831

Д.А. Гилод<sup>1</sup>, Т.Б. Соколова<sup>2</sup>, А.А. Булычев<sup>3</sup>

## ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ТЕКТОНОСФЕРЫ РЕГИОНА ЮЖНОЙ АТЛАНТИКИ

Эволюция Американо-Антарктической спрединговой системы — часть общей эволюции Южной Атлантики. Структурный анализ гравитационного и магнитного полей, выполненный для региона Южной Атлантики, показал, что на его основе можно получить не только ценную информацию о строении тектоносферы океанической акватории, но и дополнительную информацию, повышающую достоверность реконструкции физических, тектонических и геологических процессов, происходящих в течение эволюции тектонических провинций и областей. Результаты структурного анализа совместно с реконструкциями Южной Атлантики позволили увязать их с эволюцией региона и определить место, занимаемое спрединговой системой Американо-Антарктического хребта в эволюции Южного Атлантического океана, а также ее взаимодействие с прилегающими тектоническими структурами.

*Ключевые слова:* тектоносфера, поле силы тяжести, поле магнитных аномалий, структурный анализ, Американо-Антарктический хребет.

The evolution of the American-Antarctic spreading system is part of the common evolution of South Atlantic. The structural analysis performed by authors across the South Atlantic region show, that it can be achieved not only valuable information about the tectonosphere's structure but the useful complementary information, improving the reliability of interpretation of the physical, tectonic and geological processes taking place for evolution of the tectonic provinces and regions according to the reconstruction's model. The examination of structural analysis's results jointly with reconstructions of the South Atlantic made previously allowed to perform their accommodation with the region's evolution and identify role, which the American-Antarctic spreading system plays for the evolution of the South Atlantic and its interaction with the adjacent tectonic structures. It evidences the special value of gravimetric information for the investigation of the construction tectonosphere and the evolution of regions poor explored from other geophysical approaches.

*Key words:* tectonosphere, gravity field, field magnetic anomaly, structural analysis, American-Antarctic rang.

**Введение.** Эволюция Американо-Антарктической спрединговой системы — часть общей эволюции Южной Атлантики, которая прослеживается с начала раскола Гондваны. Одна из последних моделей начального раскола Гондваны между 167 и 83 млн лет назад — модель реконструкции, предложенная М. Кенигом [König, 2005]. Для ее создания использованы значения возраста и ориентации аномалий донного спрединга, объединенные с ограничениями на спрединговые системы Южная Америка—Африка и Африка—Антарктика, основанными на компиляции данных магнитных аномалий и разломных зон. Образованию спрединговых систем в Южной Атлантике предшествовали длительные периоды растяжения литосферы, обусловленные полем напряжений на поверхности Земли и глубинными мантийными процессами. С образованием спрединговых систем процессы растяжения продолжались и вновь возникали в других местах в силу взаимодействия изменяющихся

полей напряжений, создаваемых спрединговыми процессами. По вновь развитым зонам растяжения — с большей или меньшей сдвиговой компонентой — впоследствии могли развиваться новые спрединговые режимы, играющие согласующую роль на фоне уже действующих спрединговых режимов.

Эти процессы и эволюция регионов, затронутых ими, тесно связаны с глубинными мантийными процессами. Предполагая наличие источников мантийных процессов на всех уровнях мантии Земли, включая самые глубинные, и длительное время их существования (десятки и сотни миллионов лет, причем чем глубже источники, тем длительнее время их существования), можно по анализу структуры гравитационного поля, несущего информацию обо всем разрезе Земли, получить дополнительные данные об истории развития региона. Это особенно важно для акваторий, слабо изученных геофизическими методами, поскольку для этих регионов в полном

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, науч. с., *e-mail:* Gilod\_Dolores@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, ст. науч. с., *e-mail:* TB-Sokolova@yandex.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, зав. кафедрой, профессор, *e-mail:* aabul@geophys.geol.msu.ru

объеме существует только гравиметрическая информация благодаря спутниковым альтиметрическим наблюдениям.

Спрединговая система Американско-Антарктического хребта относится к спрединговым системам, возникшим уже после установления режима спрединга в соседних областях и в силу этого играющим согласующую роль в динамике развития всего региона в целом. Исходя из этого для решения некоторых вопросов эволюции Американско-Антарктической спрединговой системы выполнены региональный обзор и интерпретация геофизических данных акватории практически всей Южной Атлантики в границах от 40 до 75° ю.ш., от 50° з.д. до 20° в.д. (рис. 1–3).

Преыдушие исследования истории развития части Южного океана, охватывающей Южно-Американскую, Африканскую и Антарктическую плиты (от 50° з.д. до 10° в.д. и от 40 до 70° ю.ш. в современных координатах), базировались преимущественно на реконструкциях, основанных на магнитных аномалиях донного спрединга и распределении линеаций разломных зон и привлекали в качестве основного фактического материала карты магнитных аномалий, результаты анализа аномалий силы тяжести в свободном воздухе и рельефа океанического дна. Так как область развития спрединговой системы Американско-Антарктического хребта покрыта редкой сетью профильных магнитных наблюдений [Шрейдер, 2006] и для нее практически не существует данных сейсмических наблюдений, история развития этой области изучена гораздо меньше, чем соседних спрединговых систем моря Уэдделла, Срединно-Атлантического хребта и Юго-Западно-Индийского хребта.

Мы сделали попытку дополнить и уточнить историю развития Американско-Антарктической спрединговой системы на базе информации, полученной в результате подробного и тщательного анализа структуры гравитационного поля исследуемого региона. С этой целью такой же анализ в региональном плане проведен для моря Уэдделла — области первичного спрединга, сопровождавшего начальные этапы раскола Гондваны. Для этой области, гораздо полнее представленной геофизическими данными (особенно магнитной съемки), многие исследователи провели реконструкции раскола Гондваны. Эти реконструкции наиболее полно сопоставлены и проанализированы в работе Кенига [König, 2005 и ссылки к ней], где также дана новая модель реконструкции ранних этапов раскола Гондваны. Для акватории моря Уэдделла нами предпринята попытка увязать динамику развития региона, представленную моделями реконструкции (в основном опираясь на модель реконструкции Кенига), с особенностями строения тектоносферы, полученными нами по данным интерпретации гравитационного поля и данных магнитных аномалий. Результаты этих исследований позволили прояснить

некоторые вопросы, связанные с эволюцией региона Американско-Антарктического хребта.

**Структурный анализ гравитационного и магнитного полей Южной Атлантики.** Строение тектоносферы под океанами и решение некоторых вопросов эволюции их развития авторы базируют на результатах структурного анализа гравитационного и магнитного полей. Он включает, во-первых, разложение полей с выделением их низкочастотной, среднечастотной и высокочастотной компонент; во-вторых, установление: а) взаимосвязи между частотными компонентами поля, б) связи региональной и локальной зональности полей со структурными и возрастными особенностями рассматриваемой территории (возрастная характеристика океанической литосферы дается с использованием карты возраста океанического дна из работы [Muller, 1997]), в) соответствия между компонентами полей и образующими аномалии слоями тектоносферы по результатам двумерного и трехмерного моделирования; в-третьих, анализ линейных элементов полей (градиентные зоны, протяженные цепочки аномалий и т.д.), систематизация их по рангу (пространственная протяженность, простираемость, глубинность, структурная значимость) и установление их связи с основными тектоническими линеаменами региона; в-четвертых, составление структурной схемы строения тектоносферы по результатам совместного анализа структуры гравитационного и магнитного полей.

В качестве исходного материала использовано гравитационное поле, представленное аномалиями силы тяжести в свободном воздухе [Sandwell, 1997], и рельеф дна океана [Smith, 1997], рассчитанные по спутниковым альтиметрическим данным (сеть 1' × 1'), а также поле магнитных аномалий  $\Delta Z$  (сеть 15' × 15') [NGDC — 720]. Для проведения структурного анализа рассчитаны и в дальнейшем использованы аномалии силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,67 г/см<sup>3</sup>.

**Структурная схема гравитационного поля.** Для разложения гравитационного поля на компоненты применен комплекс трансформаций поля, позволяющий выделить низкочастотную, среднечастотную и высокочастотную составляющие поля. Как показано в работе [Булычев, 2008], низкочастотная компонента характеризует региональное изменение мощности тектоносферы с возрастом (зональность поля), среднечастотная компонента подчеркивает дифференциацию слоев тектоносферы (подкорковой литосферы и астеносферы) по мощности и плотности (выделение областей в пределах зон), высокочастотная компонента связана с вариациями плотности и мощности океанической коры. Линеаменты (зоны градиентов и линейные, вытянутые аномалии или цепочки аномалий с выдержанным по площади простираем), выделенные по низкочастотной компоненте, определяют границы литосферных плит. Линеаменты, выделенные по среднечастотной компоненте, под-

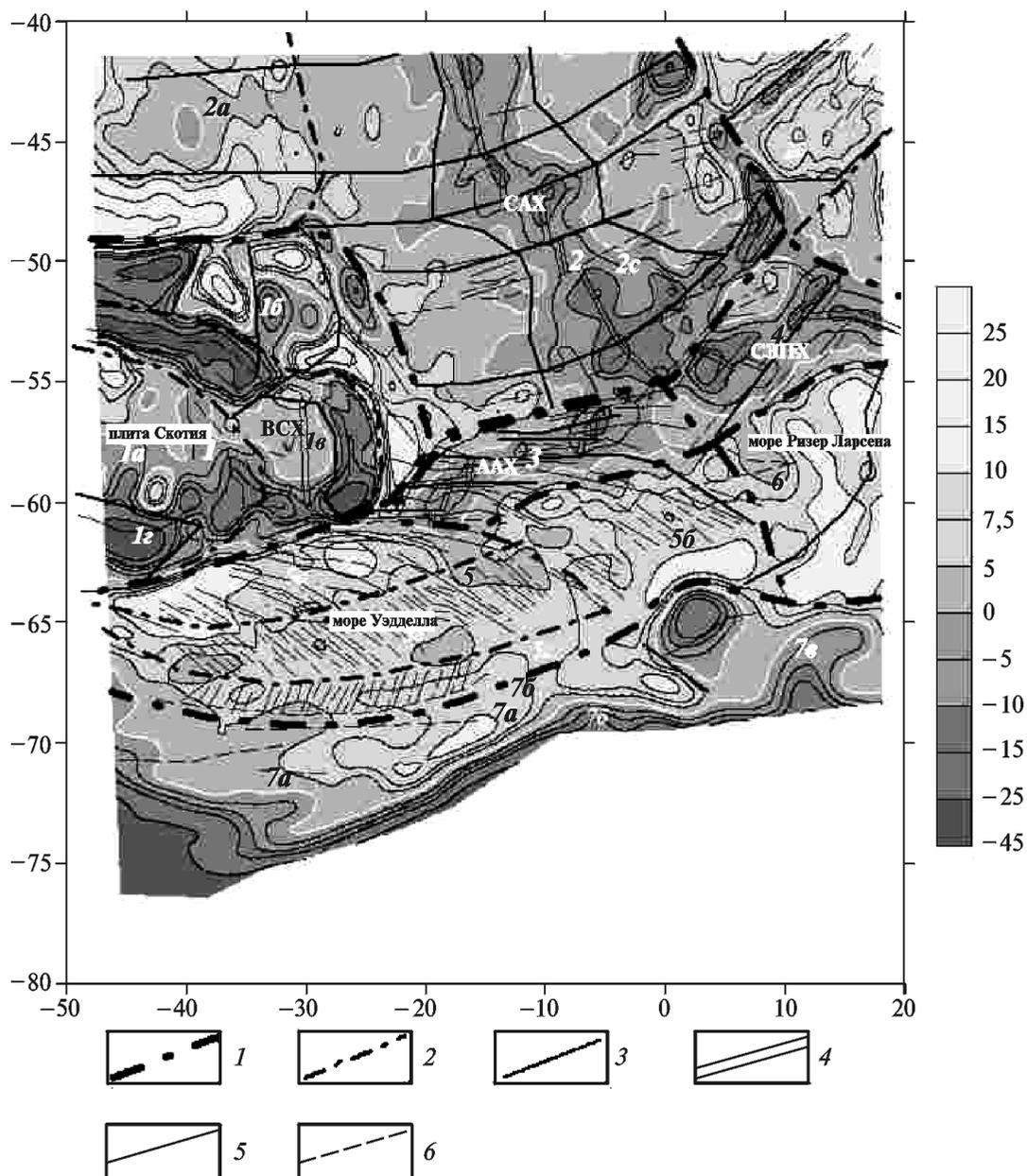


Рис. 1. Структурная схема гравитационного поля: 1 – границы аномальных зон; 2 – границы аномальных областей; 3 – крупные разломные зоны и трансформные разломы; 4 – оси спрединга; 5 – оси положительных аномалий по гравитационному полю и его трансформантам; 6 – оси отрицательных аномалий по гравитационному полю и его трансформантам. САХ – Срединно-Атлантический хребет, ВСХ – хребет Восточный Скоттия, ААХ – Америко-Антарктический хребет, ЮЗИХ – Юго-Западно-Индийский хребет; 3 – нумерация аномальных зон, 3а – нумерация аномальных областей. Фоновое черно-белое заполнение – карта региональных аномалий силы тяжести в редукции Буге (среднечастотная компонента), сечение изолиний 5 мГал

черкуют характер (тип) этих границ, показывают положение в пространстве крупных разломных зон и линейно вытянутых структур (прогибов, валов и т.д.). Линеаменты, выделенные по высокочастотной компоненте, добавляют к этой картине структурные особенности строения коры (разломы, хребты, впадины и т.д.) внутри зон и областей, выделенных по низко- и среднечастотным компонентам поля. Структурная схема гравитационного поля (рис. 1), созданная на базе структурного анализа, позволяет проследить унаследованность или изменение структурного плана в пределах зон и областей по характеру изменения аномальных особенностей и линеаментов по всем компонентам поля.

Зональность поля, установленная по низкочастотной компоненте, определяется существованием аномальных и плотностных особенностей верхней мантии и нижней части (подкорковой) литосферы. Эти аномальные зоны верхней мантии и самой нижней части тектоносферы играют ведущую роль в истории развития региона и формировании его современного тектонического облика. Аномальная зона 1 (рис. 1) представлена частью плиты моря Скоттия, сформированной восточным окончанием мантийного и астеносферного потока, направленного со стороны Тихого океана. Восточная граница этой аномальной зоны проходит по Южно-Сандвичевой субдукционной зоне, которая под влиянием верхнемантийных и

астеносферных потоков до настоящего времени продолжает мигрировать в восточном направлении.

Вдоль северной и южной границ зоны расположены хребты Северный и Южный Скотиа, представленные цепью блоков с континентальной (субконтинентальной) корой: банки Маурик, Снэг, Аврора, о-ва Южный Георгия, Северный Георгия вдоль северной границы, а также банки Джейн, Пири, Брук, Дискавери, Хердман, Южно-Оркнейский микроконтинент вдоль южной границы. К этой зоне нами отнесена молодая Сандвичева плита, формируемая задуговой спрединговой системой хр. Восточный Скотиа. Как видно, вся аномальная зона в поле низкочастотной компоненты гравитационного поля представлена региональными аномалиями положительного и отрицательного знака, в пределах которых в полях средне- и высокочастотной компонент формируются аномальные области с различными аномальными и морфологическими особенностями, связанными с разнородностью строения слоев тектоносферы в пределах этой зоны.

Аномальная зона 2 (рис. 1) сформирована под влиянием нижнемантийных и астеносферных потоков, образующих структуру Срединно-Атлантической спрединговой системы (САХ). В центре этой зоны в поле низкочастотной компоненты расположена интенсивная региональная область относительно пониженных значений поля силы тяжести (2с), связанная с западным и восточным флангами САХ, имеющими возраст океанической литосферы моложе 40 млн лет. Западная (2а) и восточная (2б) области представлены крупными региональными аномалиями относительно повышенных значений поля. Эти фланговые области сложены океанической литосферой с возрастом старше 40–60 млн лет. Возрастное различие между литосферой центральной и фланговых областей отражено в ее мощности и плотности [Булычев, 2009]. В результате развития спрединговой системы САХ не только сформировалась зональность подкоровой литосферы, связанная в первую очередь с изменением мощности и плотности литосферы в зависимости от возраста, но и существенным образом изменилось строение океанической коры, что ярко представлено в высокочастотной компоненте поля [Булычев, 2009].

К югу от центральной области аномальной зоны 2 расположены аномальные зоны 3 и 4, представленные градиентным увеличением в южном направлении значений низкочастотной компоненты поля аномалий силы тяжести в редукции Буге. В пределах аномальных зон 3 и 4 в поле среднечастотной компоненты расположены относительно отрицательные региональные аномалии, связанные с областями развития спрединговых систем Американско-Антарктического (ААХ) (3) и Юго-Западно-Индийского (ЮЗИХ) (4) хребтов. Возраст литосферы в пределах этих зон моложе 30–40 млн лет, соответственно южные границы зон проходят по изолинии возраста приблизительно 30–40 млн лет. Если среднечастотная компонента

этих зон характеризует области развития маломощной и менее плотной молодой океанической литосферы, менее плотной астеносферы и региональную фрагментацию спрединговых систем ААХ и ЮЗИХ, то поле высокочастотной компоненты определяет структурные и плотностные особенности молодой океанической коры.

Южнее зон 1, 3 и 4 расположены зоны близширотного, восток-северо-восточного простирания, сменяющие одна другую в направлении на юг. В этом направлении возраст литосферы увеличивается от 40 до 80 млн лет и более. Зона интенсивных положительных значений низкочастотной компоненты поля аномалий силы тяжести в редукции Буге, граничащая с зонами 1, 3 и 4, делится на две самостоятельные аномальные зоны: восточную (6), более интенсивную, и западную (5), с относительно пониженными по сравнению с зоной 6 значениями поля. Аномальная зона 6 представляет западную область древней океанической литосферы, образованной спрединговой системой моря Ризер Ларсена. Простирание аномалий в поле низкочастотной компоненты меридиональное и близкое к нему в средне- и высокочастотной компонентах (север-северо-западное и север-северо-восточное). Аномальная зона 5 приходится на акваторию моря Уэдделла и включает литосферу, сформированную древней спрединговой системой этого моря, с возрастом более 40 млн лет. Преобладающее направление простирания аномалий низко- и среднечастотной компонент восток-северо-восточное. В полях среднечастотной и особенно высокочастотной компонент поля зона подразделяется на отдельные отличающиеся в морфологическом и аномальном отношении области.

Область 5а (возраст литосферы 40–65 Ма) представляет самый северный фланг спрединговой системы моря Уэдделла, вероятно в определенной степени деформированный позднейшими событиями, связанными с образованием плиты Скотиа. Область 5б (возраст литосферы 65–90 Ма), расположенная южнее этой области, представляет фланг спрединговой системы моря Уэдделла с более древней океанической литосферой, не переработанной последующими тектоническими событиями, что подчеркивается в поле высокочастотной компоненты морфологией локальных аномалий типа «елочка» [König, 2005]. Область 5г (возраст литосферы 90–118 Ма), расположенная южнее области 5б, представляет, по-видимому, самый древний фланг спрединговой системы, граничащий на юге с краевыми переработанными областями континентальной литосферы Антарктики. Область 5б по аномальной характеристике поля может быть ее продолжением, граница на севере, востоке и юге с аномальными зонами 3, 6 и 7 соответственно. Но характер простирания аномалий в полях средне- и высокочастотной компонент резко меняется — преобладают ярко выраженные простирания аномалий северо-восточного и северо-западного направлений,

что указывает на более сложный путь развития этой области.

К югу от зон 5 и 6 расположена зона 7, она имеет градиентную границу с вышерасположенными зонами. Значения низкочастотной компоненты поля аномалий силы тяжести в редукции Буге в южном и юго-восточном направлениях резко уменьшаются, вместе с тем меняется морфология поля по всем его компонентам. Такое резкое изменение характера гравитационного поля связано с тем, что аномальная зона 7 приходится на область континентальной коры (ее краевую часть). Эту зону в полях средне- и высокочастотной компонент можно разделить на три области: 7а, 7б и 7в. Области 7а и 7б в поле средне-частотной компоненты представлены положительной и отрицательной полосами аномалий близширотного простирания, а область 7в — интенсивными положительными и отрицательными аномалиями без ярко выраженного простирания, что в целом указывает на сложный характер переходной зоны от континента к океану.

Чтобы систематизировать направления простирания основных линеаментов гравитационного поля и его трансформант, представляющих низко-, средне- и высокочастотную компоненты поля, построены розы-диаграммы направлений простирания линеаментов. По результатам анализа роз-диаграмм для всех компонент гравитационного поля установлены преобладающие для каждой зоны и области направления простирания и прослежен характер их изменения в полях компонент гравитационного поля. Предполагая, что преобладающее простирание структурных элементов обусловлено полем напряжения, существовавшим в то или иное геологическое время, можно проследить изменение строения тектоносферы, связанное с изменением преобладающих простираний (т.е. с изменением поля напряжения), от низкочастотной компоненты поля к высокочастотной — от более глубоких горизонтов тектоносферы до верхней коры. Глубинные горизонты — верхняя мантия и нижние слои тектоносферы — образуют структурный план с диагональными, широтными и меридиональными простираниями. Меридиональные и широтные простирания по интенсивности немного слабее диагональных, но площадь их распространения больше. Структурный план средних горизонтов (подкорковая литосфера) представлен приблизительно одинаковым по площади распространением направлений диагональной и ортогональной сетей. При этом интенсивность меридиональных и широтных направлений здесь не уступает интенсивности диагональных направлений. В структурном плане коры доля и интенсивность меридионального и широтного направлений возрастает и превышает долю диагональных направлений.

*Аномальная зона 1* в поле низкочастотной компоненты в целом характеризуется преобладанием диагональных направлений структурных особенно-

стей поля. Только участок плиты Восточной моря Скотиа, расположенный в западной части региона, имеет преобладающее меридиональное или близкое к нему простирание региональной аномалии. В поле *средне-частотной компоненты* доля меридиональных направлений возрастает за счет центральной части Южно-Сандвичевой дуги и Сандвичевой плиты. Широтные простирания линеаментов прослеживаются частично вдоль северной границы зоны — хр. Северный Скотиа. Поле *высокочастотной компоненты* характеризуется полным набором простираний, среди которых по интенсивности преобладают диагональные. Очевидно, что структурный облик зоны базируется на особенностях поведения структур литосферы. В нижней части литосферы (подкорковая литосфера) наблюдается разделение этой зоны на области хребтов Северный и Южный Скотиа, область Южно-Сандвичевой дуги и Сандвичевой плиты и область восточного окончания плиты Восточная Скотиа. В верхней коре продолжается унаследованное развитие структур подкорковой литосферы с еще большим дроблением на блоки, которые имеют разные мощности и плотности.

Диагональные простирания устойчивы только в областях развития мощной континентальной и субконтинентальной коры (хребты Северный и Южный Скотиа). Для области Южно-Сандвичевой дуги, расположенной на границе двух литосферных плит — Восточной моря Скотиа и Американо-Атлантической — характерны меридиональные и близкие к ним простирания структур подкорковой литосферы. Для коры характерны интенсивные меридиональные и диагональные простирания структур в области Южно-Сандвичевой дуги, меридиональные простирания структур Сандвичевой плиты и слабо-интенсивные разнообразные простирания на всей остальной площади аномальной зоны.

Совместное рассмотрение схем структуры и роз-диаграмм линеаментов гравитационного поля свидетельствует о продвижении мантийного потока в восточном направлении с запада (со стороны плиты Скотиа) на восток, что привело к образованию Южно-Сандвичевой субдукционной зоны, четко проявленной уже в подкорковой литосфере и ставшей коллизионной границей двух плит — Восточной моря Скотиа и Американо-Атлантической.

*Аномальная зона 2.* Спрединговая система САХ зародилась около 100 млн лет назад [König, 2005 и ссылки в ней]. Связанное с ней преобладающее меридиональное направление линеаментов в аномальной зоне 2 представлено в полях низко-, средне- и высокочастотной компонент. Другие направления простираний линеаментов имеют подчиненное значение. Участок с диагональными и меридиональными простираниями на западном фланге САХ свидетельствует о результате взаимодействия литосферных плит вдоль коллизионной границы Южно-Сандвичевой субдукционной зоны, что отразилось в структурном плане

подкорковой литосферы и верхней коры. Диагональные и близмеридиональные простирания структур на восточном фланге САХ (область **2б**) прослеживаются для всех горизонтов тектоносферы. Близширотные простирания, присущие крупным разломам и трансформам, наиболее ярко проявлены в литосфере и протягиваются через всю аномальную зону **2**.

*Аномальные зоны 3 и 4.* Для спрединговых зон ААХ (**3**) и ЮЗИХ (**4**) характерны интенсивные широтные, близмеридиональные и диагональные простирания структурных особенностей поля. Диагональные лучше всего проявлены в полях низко- и среднечастотной компонент: северо-восточное для зоны **3** и северо-западное и северо-восточное для зоны **4**. В полях средне- и высокочастотной компоненты на фоне преобладающего диагонального простирания присутствуют сопоставимые по интенсивности близширотные и меридиональные простирания. Последние более всего развиты в зоне **3**, где представляют направление оси спрединга, разломных и приразломных структур. Для зоны **4** характерна система диагональных простираний, связанная с направлением как оси спрединга (северо-западным), так и трансформных разломов (северо-восточное).

Четко проявленное диагональное простирание структурных особенностей поля в низко- и среднечастотной компонентах гравитационного поля ААХ и северо-западного сегмента ЮЗИХ свидетельствует о существовании сдвиговых диагональных напряжений в верхней мантии, возникших после образования спрединговой системы САХ. Ортогональная система спрединга (море Уэдделла — широтный спрединг, САХ — меридиональный) была главной в начальный период раскола Гондваны при отколе Южно-Американской и Африканской плит от Антарктической (спрединговая система моря Уэдделла), а чуть позже при расколе между Африкой и Южной Америкой (спрединговая система САХ). Поле напряжений, существовавшее в это время, характеризовалось не только ортогонально направленными напряжениями растяжения и спрединга (которые вдоль расходящихся плит не могли быть одинаковыми хотя бы из-за разной мощности и строения плит), но и присутствием тангенциальных и широтных напряжений сжатия и растяжения. Поэтому наряду с развивающимися в то время спрединговыми системами широтного и меридионального направлений присутствовали системы крупных нарушений диагонального простирания. Они, по-видимому, играли согласующую роль на этом этапе раскола. На начальном этапе это могли быть, скорее, не спрединговые системы, а протяженные сдвиго-раздвиговые зоны (растяжения на фоне сдвига). В ходе дальнейшей эволюции они могли уже выступать в качестве зон спрединга. В такой первоначальной зоне сдвига-раздвига, вероятно, и образовалась спрединговая система ААХ.

*Аномальные зоны 5 и 6* в поле низкочастотной компоненты мало отличаются. Заметные различия

начинаются в поле среднечастотной компоненты, а наиболее яркие различия характерны для поля высокочастотной компоненты. В то же время если судить по характеру преобладающих простираний структурных элементов поля в этих зонах, то существенное различие присутствует уже в поле низкочастотной компоненты. Для зоны **5** здесь характерны интенсивные широтные и близкие к нему направления, а для зоны **6** — меридиональное. В поле среднечастотной компоненты в зонах **5** и **6** на фоне широтного и меридионального направлений появляются диагональные (сначала только северо-западные) направления, а в поле высокочастотной компоненты одинаково широко распространены все простирания, но интенсивность диагональных выше. Морфология локальных аномалий типа «елочка», описанная рядом авторов и характерная для спрединговой морфологии моря Уэдделла, четко проявлена в высокочастотной компоненте от 45 до 5° з.д. Далее на восток в области **5б** прослеживаются только локальные линеаменты северо-западного простирания, характерные для области **5в**, но не прослеживаются локальные линеаменты северо-восточного простирания, характерные для области **5г**. Сравнительно одинаковая аномальная картина поля низкочастотной компоненты в зонах **5** и **6** свидетельствует о приблизительно одинаковом возрасте (мощности) литосферы в морях Уэдделла и Ризер Ларсена, но картина преобладающих простираний в полях низко-, средне- и высокочастотных компонент указывает на то, что они формировались при разных режимах спрединга.

*Аномальная зона 7.* Аномалии областей **7а** и **7б** в поле среднечастотной компоненты имеют близширотное простирание, а восточная область **7в** представлена аномалиями без ярко выраженного простирания. В поле высокочастотной компоненты для аномалий этой области характерны ярко выраженные диагональные простирания. По интенсивности и простиранию локальных аномалий средне- и высокочастотной компонент области **7в** похожа на области развития континентальной и субконтинентальной коры в пределах хребтов Северный и Южный Скотиа. Исходя из этого можно предположить, что эта область, возможно, представлена древней океанической корой, где характерные для спрединговых систем структурные формы не сохранились из-за более поздней переработки в результате интенсивной тектонической деятельности по крупным разломам меридионального и широтного простирания.

*Структурная схема магнитного поля.* Магнитное поле анализировали по гриду данных Z-Antarctic 15 [National Geophysical Data Center]. Грид (15' × 15') магнитных аномалий на площадь от 10° з.д. до 20° в.д. и от 40 до 60–65° ю.ш. составлен по разрозненным, часто удаленным профилям. Нами впервые для этого региона составлена структурная схема магнитного поля. Для исследования структуры поля рассчитаны поля магнитных аномалий на высотах 100, 75, 50 и

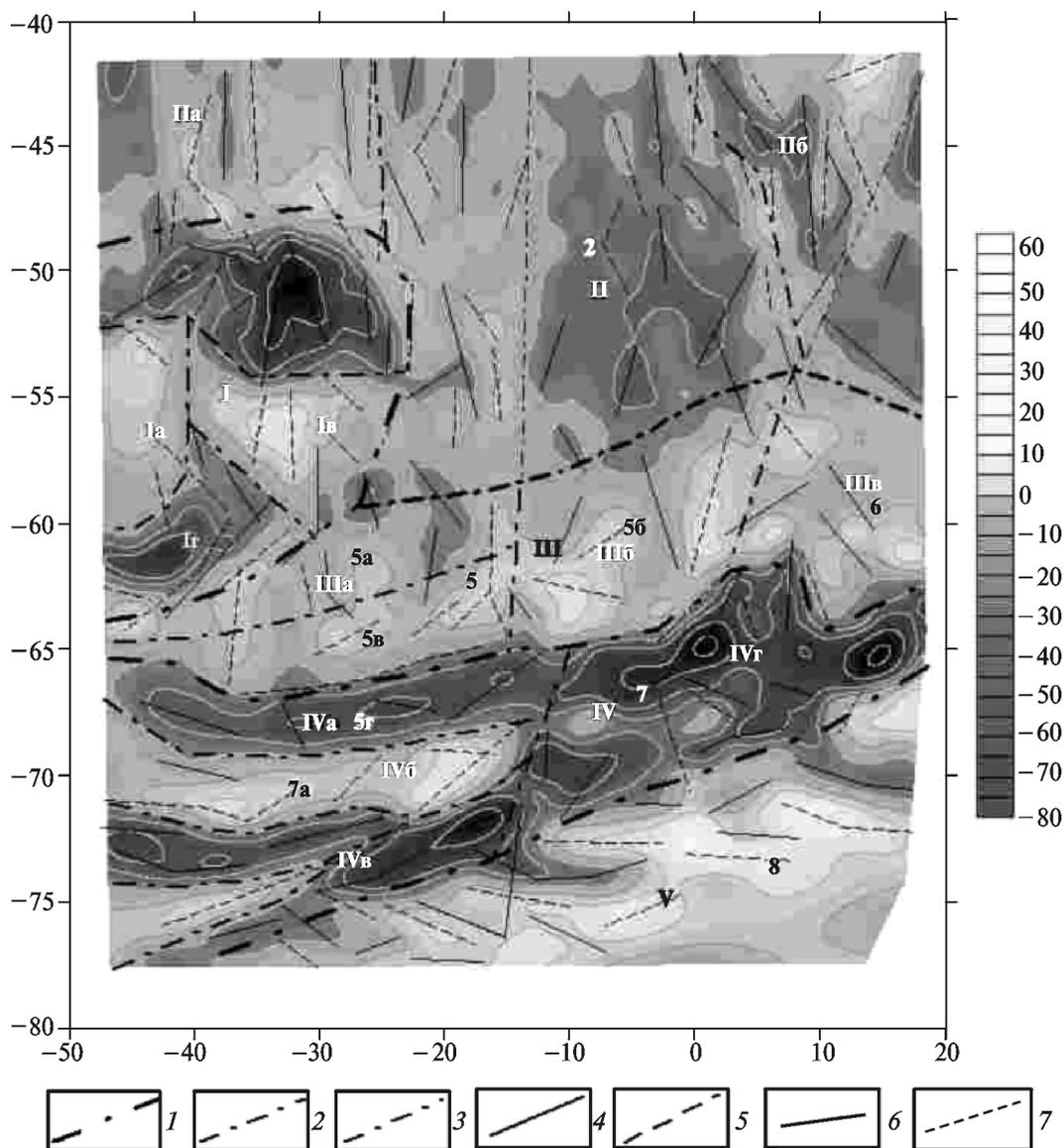


Рис. 2. Структурная схема магнитного поля: 1 – границы аномальных зон, 2 – границы аномальных областей, 3 – границы блоков в пределах аномальных областей, 4 – оси региональных положительных магнитных аномалий; 5 – оси региональных отрицательных магнитных аномалий; 6 – оси локальных положительных магнитных аномалий; 7 – оси локальных отрицательных магнитных аномалий. III – нумерация аномальных зон; IIIa – нумерация аномальных областей; 3 – нумерация аномальных зон по сводной структурной схеме, 3a – нумерация аномальных областей по сводной структурной схеме. Фоновое черно-белое заполнение – карта региональных магнитных аномалий, сечение 10 нТл

20 км и поля разностных аномалий (разности между полями на разных высотах) 0–50, 0–75, 0–100 и 50–100 км. Результаты анализа полученных трансформант магнитного поля представлены на рис. 2.

Изменение аномальных и морфологических характеристик поля при переходе от низкочастотной компоненты к высокочастотной сказывается в основном только в более высокой степени детализации. По низкочастотной компоненте магнитного поля выделяется несколько зон и областей в их пределах, различающихся по морфологическим и аномальным признакам: среднему уровню магнитного поля в зоне (области), преобладающему направлению простираения локальных аномалий в пределах этих зон (областей), по степени насыщенности и интенсивности локальных аномалий.

Аномальная зона I (рис. 2) расположена в северо-западной четверти исследуемого региона и в пределах ранее выделенной по гравитационному полю аномальной зоны 1. Граница этой зоны с прилегающими областями в магнитном поле скорее морфологическая, градиентная она только на участках хребтов Северный и Южный Скотиа. В пределах этой зоны по картам низко- и среднечастотных компонент магнитного поля в северной части по интенсивным положительным аномалиям выделяется область Ib с блоками о. Южный Георгия, Северный Георгия, банки Снэг и Маурик; в западной части зоны выделяется область Ia пониженных значений магнитного поля, приходящаяся на восточное окончание плиты Восточная Скотиа, в южной части интенсивными положительными аномалиями представлена область Ig,

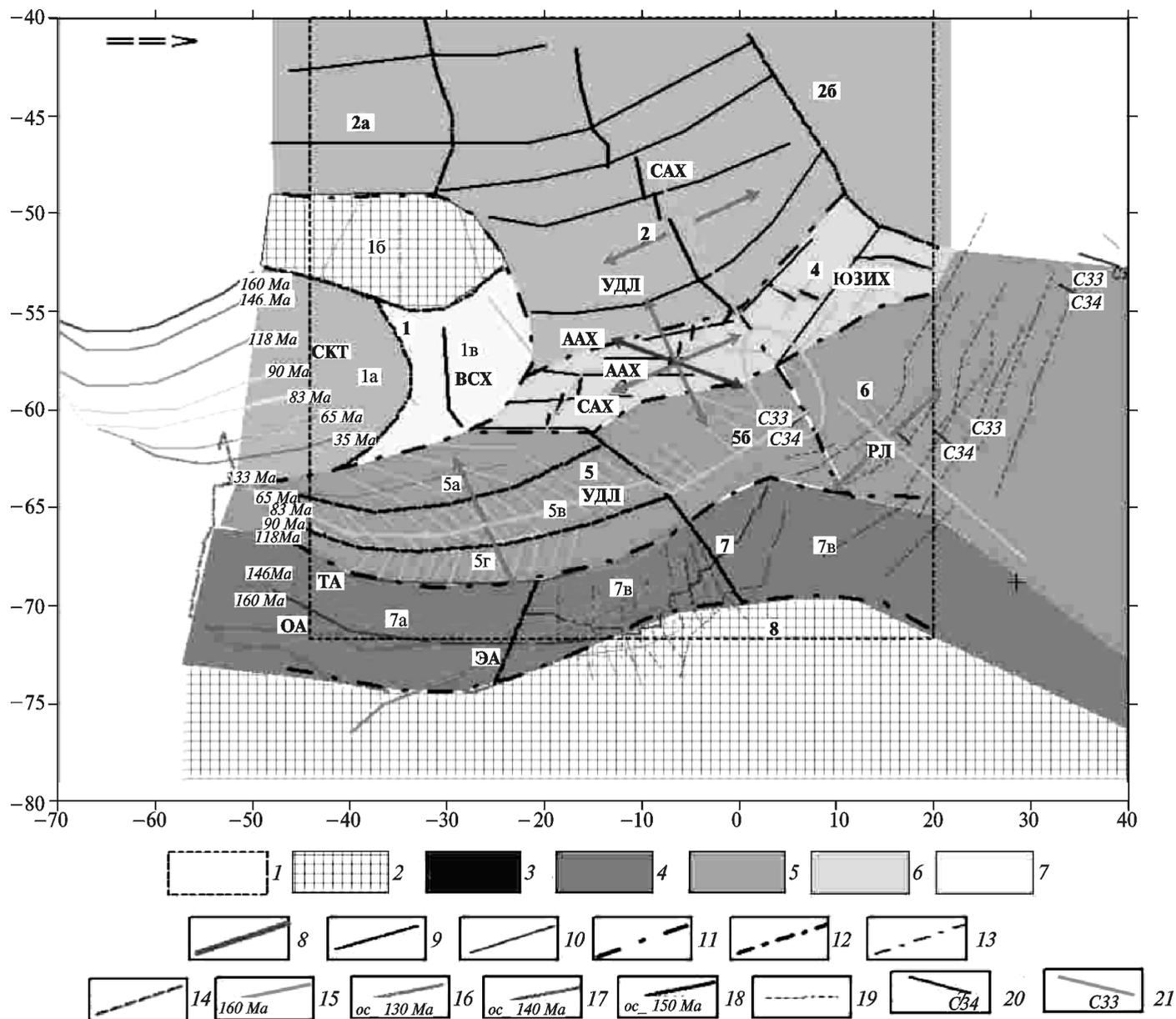


Рис. 3. Сводная структурная схема зональности тектоносферы: 1 – границы региона регионального анализа; 2 – литосфера континентальная или содержащая блоки континентальной коры в переходных зонах от континента к океану; 3 – литосфера в переходной зоне континент–океан (растянутая); 4 – океаническая литосфера спрединговых систем моря Уэдделла (УДЛ) и Ризер Ларсена (РЛ); 5 – океаническая литосфера спрединговых систем Срединно-Атлантического хребта (САХ) и моря Скотиа (СКТ); 6 – океаническая литосфера спрединговых систем Американско-Антарктического (ААХ) и Юго-Западно-Индийского (ЮЗИХ) хребтов; 7 – океаническая литосфера спрединговой системы хребта Восточный Скотиа (ВСХ); 8 – оси спрединговых систем; 9 – разломные зоны, трансформные разломы; 10 – наиболее крупные разломные зоны без уточнения типа; 11 – границы аномальных зон, выделенные по структурному анализу гравитационного и магнитного полей (1–8); 12 – границы аномальных областей в пределах аномальных зон, выделенные по структурному анализу гравитационного и магнитного полей (1а–7а); 13 – границы подобластей, по которым меняется структура полей (мощность, простираение, плотность слоев тектоносферы). Некоторые элементы ранней реконструкции Южной Атлантики [König, 2005]: 14 – граница континент–океан (СОТ); 15 – синтетические изохроны, рассчитанные по перемещениям пиков магнитной аномалии С34 (83 Ма) назад и вперед во времени (изохроны к югу от Южной Америки показывают их положение, которое они занимали бы, если бы Сандвичева плита не перекрыла участки более древнего океанического дна); 16–18 – оси спрединга 130, 140 и 150 Ма соответственно; 19 – разломные зоны С33–С34 (море Ризер Ларсена); 20 – магнитная аномалия С34 (море Ризер Ларсена); 21 – магнитная аномалия С33 (море Ризер Ларсена); ЭА – аномалия Эксплора, ОА – аномалия Орион, ТА – аномалия Т

приуроченная к Южно-Оркнейскому блоку, банкам Брук и Дискавери; в восточной части зоны расположена область пониженных значений магнитного поля **Ив**, в основном приходящаяся на область развития спрединговой системы хр. Восточный Скотиа. В поле высокочастотной компоненты зона **I** представлена

мозаичным полем с интенсивными локальными аномалиями обоих знаков.

Аномальная зона **II** расположена к северу и востоку от зоны **I** и приходится на спрединговую систему САХ. В восточной части зоны **II** отдельной аномальной областью выделяется восточный фланг

Срединно-Атлантической спрединговой системы (**Пб**) с возрастом океанической литосферы более 40 млн лет, характеризующийся линейно вытянутыми полосами интенсивных локальных знакопеременных аномалий в полях низко-, средне- и высокочастотной компонент. Простирание аномалий преимущественно близмеридиональное, север-северо-западное. В западной части зоны **II** выделяется аномальная область **IIa**, приходящаяся на западные фланговые участки САХ с возрастом океанической литосферы более 40–50 млн лет и представленная также линейно вытянутыми в меридиональном направлении знакопеременными аномалиями, но меньшей интенсивности, чем в области **IIб**. В центре зоны **II** (океаническая литосфера, образованная спрединговой системой САХ, моложе 40 млн лет) в полях низко- и среднечастотной компонент выделяется область развития положительных аномалий небольшой интенсивности, приуроченных к южному сегменту САХ (от 45° ю.ш. до точки тройственного сочленения Буве). Эти аномалии в полях низко- и среднечастотных компонент имеют близмеридиональное простирание, согласующееся с простиранием оси спрединга САХ, а более интенсивные высокочастотные аномалии вытянуты в непротяженные цепочки аномалий с теми же простираниями, что и в поле низко- и среднечастотной компонент.

Южная граница аномальной зоны **II** неградиентная, нечетко устанавливается по полям низко- и среднечастотных компонент. К этой зоне по характеру магнитного поля здесь можно присоединить области развития спрединговых систем Американско-Антарктического хребта и северо-западных сегментов ЮЗИХ, которые на структурной схеме (рис. 3) представлены зонами **3** и **4** соответственно. Южные сегменты спрединговой системы САХ, северо-восточный сегмент аномалии ААХ и северо-западный сегмент ЮЗИХ образуют в региональном плане область тройственного сочленения Буве [Булычев и др., 1997] и представлены одинаковой высокочастотной компонентой магнитного поля, а в низко- и среднечастотной компонентах — аномалиями небольшой интенсивности с простираниями, характерными для каждой из спрединговых систем области сочленения.

Центральную часть исследуемой территории (приблизительно от 58 до 66° ю.ш.) занимает зона **III** (большая часть зон **3–6** на структурной схеме, рис. 3). В полях средне- и низкочастотной компонент магнитного поля она представляет собой некоторую переходную область между зонами **I** и **II**, расположенными к северу от нее, и зоной **IV**, находящейся к югу. В тектоническом отношении эта зона приходится на более древние по возрасту (старше 30 млн лет) фланги спрединговых систем ААХ и ЮЗИХ и на, возможно, деформированный северный фланг спрединговой системы моря Уэдделла с возрастом моложе 60 млн лет, расположенный к югу от плиты Восточная Скотия.

Северная граница этой зоны проведена в основном по морфологическим признакам поля — изменению интенсивности и простирания аномалий средне- и низкочастотных компонент магнитного поля. Южная граница резкая, градиентная и представляет собой переход к существенно иному морфологическому и аномальному типу поля зоны **IV**.

В целом зона **III** представлена достаточно интенсивными отрицательными и относительно слабopоложительными аномалиями, имеющими преимущественно близмеридиональное и диагональные северо-восточное и северо-западное простирания. Поле высокочастотной компоненты отличается от поля зон **I–II**, расположенных к северу от нее, большей интенсивностью и упорядоченностью простираний локальных аномалий. По интенсивности и простиранию аномалий в полях средне- и высокочастотной компонент эту зону можно разделить на три аномальные области: в восточной части зоны — область юго-западного фланга ЮЗИХ и моря Ризер Ларсена (**IIIв**), в центральной части зоны — область юго-восточного фланга ААХ и фланга спрединговой системы моря Уэдделла (**IIIб**), в западной части зоны — переходная область между зонами **I** и **IV** — фланг деформированной океанической литосферы спрединговой системы моря Уэдделла с возрастом моложе 60 млн лет и юго-восточный фланг ААХ (**IIIа**).

К югу от зоны **III**, южнее 65° ю.ш., в широкой полосе (шириной до 10°, т.е. от 65 до 70–75° ю.ш.) выделяется зона **IV**, резко отличная по характеру поля. Западная часть этой зоны, представленная областями **IVa–в**, в полях низко- и среднечастотной компонент характеризуется чередованием широких полос интенсивных региональных аномалий положительного и отрицательного знака с преимущественно широтным и близким к нему простиранием. В поле высокочастотной компоненты эти полосы также четко прослеживаются, а локальные аномалии в их пределах, кроме близширотного простирания, могут иметь и диагональное, чаще северо-восточное простирание. Эта западная часть зоны представляет область океанической литосферы, образованной спрединговой системой моря Уэдделла. Восточная половина зоны представлена областью **IVг**. В этой области в целом простирание локальных аномалий в полях низко- и среднечастотных компонент северо-восточное и близширотное, в то время как поле высокочастотной компоненты имеет мозаичный характер с простиранием локальных аномалий от меридионального через диагональные до широтного. Особенно это характерно для участка, расположенного между 63 и 71° ю.ш. и между 1° з.д. и 11° в.д. Этот участок морфологически представляет собой узел слияния полосовых линейных аномалий из западной части зоны **IV** (области **IVa–в**), с запада на восток изменяющих простирание от широтного до северо-восточного. Интенсивность локальных аномалий на

этом участке очень высокая (максимальная для всей рассматриваемой территории).

В самой южной части региона расположена аномальная зона V (рис. 3, 8), простирающаяся аномалий по всем компонентам магнитного поля резко отличаются от таковых в зоне IV. В полях низко- и среднечастотной компонент эта зона представлена интенсивными аномалиями преимущественно отрицательного знака с четко выраженным близширотным и широтным простиранием. Локальные аномалии высокочастотной компоненты в основном такие же, но интенсивнее и чередуются по знаку. Северная граница этой зоны преимущественно морфологическая (выделена по резкому изменению простирания региональных и локальных магнитных аномалий).

Анализ роз-диаграмм для поля низко- и среднечастотной компоненты показывает, что более 1/3 площади, приходящейся на северную половину территории исследования (зона II), имеет преобладающее меридиональное простирание, характерное также для областей Ia и IVг. Диагональное простирание характерно почти для всей зоны I и восточных областей зон III и IV. Широтным простиранием аномалий характеризуется западная половина зоны IV (IVа, в, г). По высокочастотной компоненте анализ направлений простирания на всю площадь некорректен по вышеизложенным причинам.

Исходя из анализа изменения основных направлений простирания можно заключить, что: 1) в целом сохраняется унаследованность направлений простирания для всех компонент магнитного поля в пределах выделенных областей; 2) диагональное простирание, представленное в основном интенсивными аномалиями обоих знаков, характерно для областей древней океанической литосферы (IVг) и континентальной и субконтинентальной литосферы (Iа, г, хребты Северный и Южный Скотиа); 3) широтным и близким к нему простиранием представлена область древнего спрединга моря Уэдделла; 4) океаническая кора спрединговой системы САХ в основном представлена аномалиями меридионального простирания, а области спрединговых систем ААХ и ЮЗИХ имеют наряду с меридиональным и широтным северо-западное и северо-восточное направления простирания.

**Зональность региона по совместному анализу структуры гравитационного и магнитного полей.** Аномальная зона I (рис. 3) в структуре гравитационного и магнитного полей представлена интенсивными относительно отрицательными и положительными аномалиями, как изометричными (например, блок Южно-Оркнейского микроконтинента, хр. Северный и Южный Георгия), так и имеющими четко выраженное меридиональное простирание (в областях Ia, Ib), широтное, северо-западное и северо-восточное — в областях Ia, Ib и Ig. Распределение и знак аномалий гравитационного поля связаны не только с вещественным составом литосферы (в первую очередь ее верхнего слоя, коры), но и главным образом с ее типом, который

отражен в величине мощности. Магнитное поле в большей степени дает представление об изменении вещественного состава коры, а не ее мощности, в связи с чем знак региональных аномалий для тех же структур, отраженных в гравитационном поле, может быть обратным.

Аномальная зона 2 в структуре гравитационного и магнитного полей также представлена разными по знаку региональными аномалиями в пределах всех выделенных областей. Области 2а и 2б с более древней (более 40 млн лет) и мощной литосферой представлены в гравитационном поле более интенсивными положительными аномалиями, чем фланги САХ, где литосфера имеет меньшую мощность и возраст 20–40 млн лет, и центральная часть САХ с литосферой минимальной мощности и возрастом 0–20 млн лет. При этом на знак поля, конечно, кроме мощности литосферы большое влияние оказывает повышение ее плотности с увеличением возраста, а также изменение мощности и плотности астеносферы в зависимости от возраста. Структура же магнитного поля отражает скорее всего вещественный состав коры в целом — малоамплитудный отрицательный фон, слабо возрастающий по знаку в сторону осевой области спрединга. Знакопеременные магнитные аномалии на западной границе области 2б и внутри нее характеризуют структурные и вещественные особенности коры в разломной зоне и в пределах самой области.

Зоны 3 и 4 спрединговых систем ААХ и ЮЗИХ в структуре гравитационного и магнитного полей охарактеризованы в основном так же, как и зона 2 спрединговой системы САХ. Можно отметить присутствие в гравитационном поле положительной гравитационной аномалии на границе зон 3 и 4 (рис. 1), которая, по-видимому, связана с утолщением литосферы в зоне сочленения плит, созданных спрединговыми системами ААХ и ЮЗИХ. Об изменении вещественного состава литосферы с увеличением возраста можно судить по возрастающим значениям регионального гравитационного поля. Сказать что-либо более определенное об особенностях структуры и вещественного состава коры можно по анализу локальной компоненты гравитационного поля (рис. 1). В магнитном поле такая информация практически отсутствует, что скорее всего связано с редкой сетью магнитных профилей в зонах 2–4.

Аномальная зона 5 на представленной структурной схеме (рис. 3) характеризует область океанической литосферы, сформированной в результате спрединга в море Уэдделла. Если предположить, что спрединг начался приблизительно 147 млн лет назад [König, 2005], то вся литосфера моложе 147 млн лет океаническая, а более древняя может представлять континентальную литосферу. Тогда граница континент — океан должна проходить по выделенной нами линии ЮГРКЛ (южная граница растянутой континентальной литосферы), а не по границе между

аномальными зонами **5** и **7** (118 млн лет). Но спредингу предшествовал длительный этап растяжения континентальной литосферы (начавшийся, вероятно, около 150–160 млн лет назад). Следовательно, литосфера с возрастом более 150 млн лет, расположенная в зоне **7**, испытала длительное растяжение, возможно, с внедрениями мантийного материала по зонам растяжения и представляет литосферу переходного типа.

Картину начального этапа раскола Гондваны можно проследить и в структуре гравитационного и магнитного полей. По гравитационному полю (рис. 1) границу между континентальной литосферой Антарктиды и растянутой континентальной корой можно провести приблизительно так, как проведена граница между зонами **7** и **8** (рис. 3). Зона континентальной растянутой коры в поле низкочастотной компоненты представлена интенсивной градиентной зоной, к северу от которой резко меняется структура гравитационного поля. В структуре магнитного поля вся аномальная зона **IV** (рис. 2) до границы ЮГРКЛ представлена региональными (низкочастотными) широкими полосовыми знакопеременными аномалиями. Такая картина поля может быть отчасти связана с интенсивными процессами растяжения континентальной литосферы до начала раскола Гондваны. Таким образом, вся зона, подвергнутая растяжению, сменившемуся позже активным спредингом, может быть представлена не только аномальной зоной **5**, но и областью **7a**, расположенной к югу от нее, а южная граница континентальной (растянутой) литосферы и литосферы, подвергнутой растяжению с последующим спредингом, будет проходить по выделенной нами границе ЮГРКЛ, совпадающей с магнитной аномалией Орион. Южная граница аномальной зоны **5**, проведенная как граница аномальной зоны на структурной схеме (рис. 3) и совпадающая с линией возраста 118 млн лет, и будет южной границей океанической литосферы, образованной спрединговой системой моря Уэдделла.

Заметим, что южная граница океанической литосферы, образованной спредингом в море Уэдделла, по среднечастотной компоненте гравитационного поля (рис. 1) совпадает с границей ЮГРКЛ. Однако в поле высокочастотной компоненты удалось проследить локальные аномалии, связанные со спредингом (структура «елочка»), только до границы между аномальными зонами **5** и **7**. Эта же граница подтверждается магнитными данными (магнитная аномалия Т) и результатами проведенных различными авторами реконструкций [König, 2005]. Особенности строения литосферы в полосе между этими границами (граница между зонами **5** и **7** и ЮГРКЛ), отраженные в среднечастотной компоненте гравитационного поля, могут быть связаны с изменением скорости (возможно, и направления) растяжения континентальной литосферы после 150–160 млн лет.

Границы выделенных в пределах аномальной зоны **5** областей **5a**, **5b** и **5c** (рис. 3) совпали с линиями

возраста 65 и 90 млн лет [König, 2005]. Это объясняется тем, что в это время происходило изменение режима спрединга (скорость, направление), что повлияло на формирование структур тектоносферы, а поэтому и отразилось в структуре гравитационного и магнитного полей.

Область **5b** в структурном плане по гравитационному и магнитному полям имеет сходство с областью **5a** (рис. 1, 2 и 3), но направление простирания локальных аномалий ближе к направлению локальных аномалий области **5b**. Эта область замыкает на востоке аномальную зону **5**. Исходя из этого аномальная область **5b** может иметь самостоятельное значение и быть переходной между областями спрединга морей Уэдделла и Ризер Ларсена в первую очередь, а также и между расположенными к северу от нее спрединговой системой ААХ и переходной зоной континентальной (растянутой) литосферы к югу.

Основанием для такого вывода может быть следующая интерпретация. Область на северной своей границе контактирует с восточным флангом ААХ, а на южной границе — с областью, интерпретируемой нами как область переходной литосферы (претерпевшей растяжения на ранних этапах раскола Гондваны). Кроме того, эта область расположена между двумя зонами древней океанической литосферы: на западе она граничит с литосферой, созданной спредингом в море Уэдделла, а на востоке — с океанической литосферой, созданной спредингом в море Ризер Ларсена. Обе эти спрединговые системы имеют практически одинаковый возраст начала спрединга, но режимы спрединга в них были разные. Поэтому область **5b** может быть областью сочленения двух этих спрединговых систем, а не продолжением области спрединга моря Уэдделла, как мы ранее предположили.

Структура гравитационного и магнитного полей в этой области имеет свои характерные особенности. Простирание региональных аномалий (низко- и среднечастотная компоненты) в ней северо-восточное, в отличие от широтного в море Уэдделла и почти меридионального в море Ризер Ларсена, что подчеркивается северо-восточным (ближе к меридиональному) простиранием магнитных аномалий. Морфология спрединговых аномалий типа «елочка», характерная для спрединга в море Уэдделла, прослеживается слабо, а в магнитном поле наряду с северо-западными (характерными для моря Уэдделла) простираниями локальных аномалий присутствуют аномалии меридионального и северо-восточного простираний, характерных для моря Ризер Ларсена. Поэтому строение тектоносферы в пределах области **5b** представляется следующим образом: 1) мощность и плотность подкоровой литосферы слабо возрастают с запада на восток, образуя в плане выпуклость на север дугу, огибающую область **7b** (также аномальную), в переходной зоне **7**; 2) океаническая кора резко отличается от таковой в прилегающих областях по интенсивности и простиранию структур, слагающих ее.

Аномальная зона **б** (рис. 3) является западной частью расположенной за пределами исследуемой территории области спрединга моря Ризер Ларсена. Региональная положительная аномалия гравитационного поля изометричной формы (слегка вытянутая в север-северо-восточном направлении), а также изометричные отрицательные региональные магнитные аномалии свидетельствуют о мощной и плотной океанической литосфере. Простираение аномалий средне-частотных компонент гравитационного и магнитного полей (рис. 1 и 2) имеет северо-западное направление, характерное для простираения оси спрединга в море Ризер Ларсена. Но аномалии слабоамплитудные, что скорее всего связано не только с большой глубиной залегания аномальных масс, создающих их (глубина дна более 5000 м), но и, видимо, с большей скоростью спрединга в нем (полускорость спрединга 20–25 мм/г по определениям Jokat и др.) по сравнению со скоростью спрединга в море Уэдделла.

**Заключение.** В целом описание структурной схемы (рис. 3), приведенное выше, представляет выводы о региональных особенностях строения тектоносферы исследуемого региона, которые получены по результатам структурного анализа гравитационного и магнитного полей. Эти выводы подкреплены двумерным и трехмерным моделированием тектоносферы, которое проведено авторами для спрединговой системы ААХ и прилегающих к ней тектонических областей (провинций): САХ, Южно-Сандвичевой дуги и Сандвичевой плиты [Булычев и др., 2008, 2009]. Двумерное и трехмерное гравитационное моделирование позволило более детально охарактеризовать глубинный разрез тектоносферы по выделенным на структурной схеме

зонам и областям, что повышает достоверность наших построений.

Сопоставление структурных схем, представленных нами, с моделью реконструкции раннего раскола Гондваны, приведенной в работе [König, 2005], показало, что результаты проведенного авторами структурного анализа потенциальных полей несут полезную информацию, существенно дополняя и повышая достоверность ранее проведенных реконструкций физических, тектонических и геологических процессов, происходящих в ходе эволюции тектонических провинций и областей.

Особое значение информация, полученная по результатам структурного анализа гравитационного и магнитного полей, имеет для регионов, которые слабо изучены геофизическими методами. Примером этому может служить исследованная нами спрединговая система Американско-Антарктического хребта. По результатам структурного анализа нами проведено трехмерное и двумерное гравитационное моделирование, расширившее представления о строении тектоносферы этой области. Эти представления в целом согласуются с данными о возрасте литосферы, представленными в работе [Muller, 1997], с данными о строении океанической коры в зоне спрединга [Булычев и др., 2009] и другими выводами об особенностях геологического строения этой области, полученными разными исследователями. Нами сделана попытка пойти дальше — увязать результаты структурного анализа с историей развития региона и определить место, которое занимает спрединговая система ААХ в эволюции Южного Атлантического океана, и ее взаимодействие с прилегающими тектоническими структурами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев А.А., Гилод Д.А. Двумерное гравитационное моделирование тектоносферы Американско-Антарктического хребта // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 5. С. 36–48.
2. Булычев А.А., Гилод Д.А., Верецагина М.И. Структурный анализ гравитационного поля Американско-Антарктического хребта // Там же. 2008. № 5. С. 27–32.
3. Булычев А.А., Гилод Д.А., Шрейдер А.А. и др. Детальные геомагнитные исследования точки тройственного сочленения литосферных плит в регионе острова Буве // Океанология. 1997. Т. 37, № 6. С. 897–909.
4. Булычев А.А., Гилод Д.А., Шрейдер А.А. и др. Гравимагнитные исследования глубинного строения тройственной точки Буве (Южная Атлантика) // Тез. докл. ежегодной науч. конф. «Ломоносовские чтения». М., 1997. С. 162–163.
5. Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А., Булычев А.А. и др. Геохронология Американско-Антарктического хребта // Океанология. 2006. Т. 46, № 1. С. 123–132.
6. Kovacs L.C., Morris P., Brozena J., Tikku A. Seafloor spreading in the Weddell Seas from magnetic and gravity data // Tectonophysics. 2002. Vol. 347. P. 43–64.
7. König M. Processing of shipborne magnetometer data and revision of the timing and geometry of the Mesozoic break-up of Gondwana // PhD thesis. University Bremen, 2005. 139 p.
8. Muller R.D., Roest W.R., Royer J.-Y. et al. Digital isochrones of the world's ocean floor // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, N B2, P. 3211–3214.
9. National Geophysical Data Center (NGDC), model NGDC-720 (Z-Antarctic 15). URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/> (10.05.2008).
10. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // Ibid. 1997. N B5. P. 10039–10054. URL: <http://topex.ucsd.edu/> (15.01.2007).
11. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global seafloor topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings // Science. 1997. Vol. 277, N 26. P. 1957–1962. URL: <http://topex.ucsd.edu/> (15.01.2007).