

УДК 550.838.3

МОДЕЛЬ МАГНИТОАКТИВНОГО СЛОЯ ПАЛЕОРИФТОВОЙ СИСТЕМЫ БЕЛОГО МОРЯ

© 2018 г. Ю.В. Брусиловский¹, А.Н. Иваненко¹, А.С. Балувев², В.А. Журавлёв³

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия*

² *Геологический институт РАН, г. Москва, Россия*

³ *ОАО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция”, г. Мурманск, Россия*

По результатам анализа и комплексной интерпретации аномального магнитного поля с привлечением данных других геолого-геофизических методов авторами создана модель строения и формирования магнитоактивного слоя палеорифтовой системы Белого моря. Показано, что этот слой имеет сложное строение, отражающее все основные этапы тектонической активности Беломорского региона от среднего и позднего рифея до событий последнего ледникового периода в плейстоцене.

Модель магнитоактивного слоя включает три структурных уровня (горизонта), каждый из которых соответствует определённому этапу формирования изучаемой площади. Так, нижний структурный уровень (основание магнитоактивного слоя), по мнению авторов, отражает рифтовый этап эволюции Беломорского подвижного пояса в среднем и позднем рифее, характеризующийся проявлением континентального рифтогенеза [Балувев и др., 2012а]. Средний уровень, представленный рядами щелочных даек и трубок взрыва, в том числе и кимберлитового состава, соответствует среднепалеозойскому (позднедевонскому) этапу реактивации рифтовой системы, для которого характерен щелочно-ультраосновной магматизм. Верхний структурный уровень отражает высокочастотную составляющую аномального магнитного поля и связан с сильномагнитными источниками аномалий, расположенными в его верхней части. Характеристики этого структурного уровня позволяют предположить, что он мог быть сформирован во время последнего, наиболее позднего этапа тектонической активизации исследуемого региона.

Ключевые слова: палеорифтовая система Белого моря, рифтогенез, модель магнитоактивного слоя, обратная задача, разделение полей, эффективная намагничённость.

Геофизическая изучённость

Район Белого моря достаточно подробно изучен геофизическими методами. В последние годы объём геолого-геофизических исследований в нём резко увеличился, что связано с ростом перспектив нефтегазоносности Беломорского бассейна. Наиболее значимыми представляются морские комплексные геофизические исследования, выполненные Морской арктической геологоразведочной экспедицией (ОАО МАГЭ) в 2003–2008 гг. в северной части Белого моря (Воронка), проливе Горло и Центральном бассейне. Целью этих исследований было изучение верхней части земной коры и прогноз нефтегазоносности в области развития грабенообразных прогибов Беломорско-Мезенской рифтовой системы [Журавлёв, Павлов, Шипилов, 2007]. Комплекс геофизических работ включал сейсмические исследования методом МОВ ОГТ, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, грави- и магнитометрические наблюдения.

В 2001 г. в различных районах акватории Белого моря в рамках проекта “Системы Белого моря” программы РАН Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Рейсы 49, 50 Научно-исследовательского судна “Профессор Штокман”) были выполнены геомагнитные градиентные съёмки [Брусиловский и др., 2003]. В 2003 г. Институт океанологии

по программе МЧС провел магнитные съёмки на двух полигонах в глубоководной части Онежско-Кандалакшского палеорифта. В том же году силами ЗАО ГНПП “Аэрогеофизика” в восточной части Мезенской синеклизы на участке, примыкающем к Мезенской губе, были выполнены комплексные высокоточные аэрогеофизические работы, включая аэромагнитную съёмку масштаба 1:50000. Эти работы входили в состав региональных геофизических исследований, которые проводились в 1999–2004 гг. в Мезенском бассейне Альянсом компаний недропользователей для оценки перспектив нефтегазонасыщенности Мезенского бассейна [Аглонов и др., 2006].

На основе материалов, полученных в вышеперечисленных экспедициях, Геологическим институтом РАН была составлена Тектоническая карта Белого моря и прилегающих областей (масштаб 1:1500000) с объяснительной запиской к ней [Балуев и др., 2012а,б].

Общая характеристика района исследований

В рельефе кристаллического фундамента северо-восточного сегмента Восточно-Европейской платформы выделяется система рифтогенных желобов, которые погружаются к юго-востоку под чехол Мезенской синеклизы [Балуев и др., 2002]. Эта система желобов, получившая название палеорифтовой системы Белого моря, заложилась в среднем рифее на раннедокембрийском консолидированном основании, пережила этапы активизации в среднем палеозое, когда широкое развитие получил щелочной магматизм, и в конце кайнозоя, когда образовался современный бассейн Белого моря [Балуев и др., 2012а].

Общая протяжённость палеорифтовой системы Белого моря составляет более 1000 км при ширине от 300 до 500 км (рис. 1). В неё входят Онежско-Кандалакшский, Керецко-Пинежский, Чапомско-Лешуконский и Мезенский палеорифты, разделённые Архангельским, Товским, Кулойским и Мезенским выступами кристаллического фундамента. С юго-востока палеорифтовая система Белого моря ограничена Котласским грабеном; с северо-востока её перекрывает краевой шов Тимано-Варангерской системы байкалид [Балуев и др., 2012б].

Методы анализа магнитного поля

Основой для анализа магнитного поля Белого моря послужила сводная карта аномального магнитного поля (рис. 2, *вверху*), составленная авторами по материалам магнитных съёмок, выполненных ОАО МАГЭ в 2003–2004 гг., с привлечением материалов съёмок, проведенных Институтом океанологии РАН в 2001, 2003, 2004 гг., а также материалов, предоставленных авторам НПО “Архангельскгеология”. Аномальное магнитное поле отражает суммарное влияние источников аномалий, находящихся на разных глубинах. Крупные региональные аномалии связаны с глубинным строением земной коры, а характер, интенсивность и конфигурация локальных аномалий – с источниками, расположенными в верхней её части. Разделение поля на составляющие, обусловленные разными геологическими факторами, – важнейшая задача при изучении внутреннего строения коры. Для решения этой задачи и для оценки параметров магнитоактивного слоя в настоящей работе использованы независимые, взаимодополняющие методы количественной интерпретации, разработанные в лаборатории геофизических полей Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова. В частности, это пакет программ Magdepth3D, который в трёхмерном варианте впервые был применен при интерпретации детальных магнитных съёмок на Каспии [Иваненко и др., 2012].

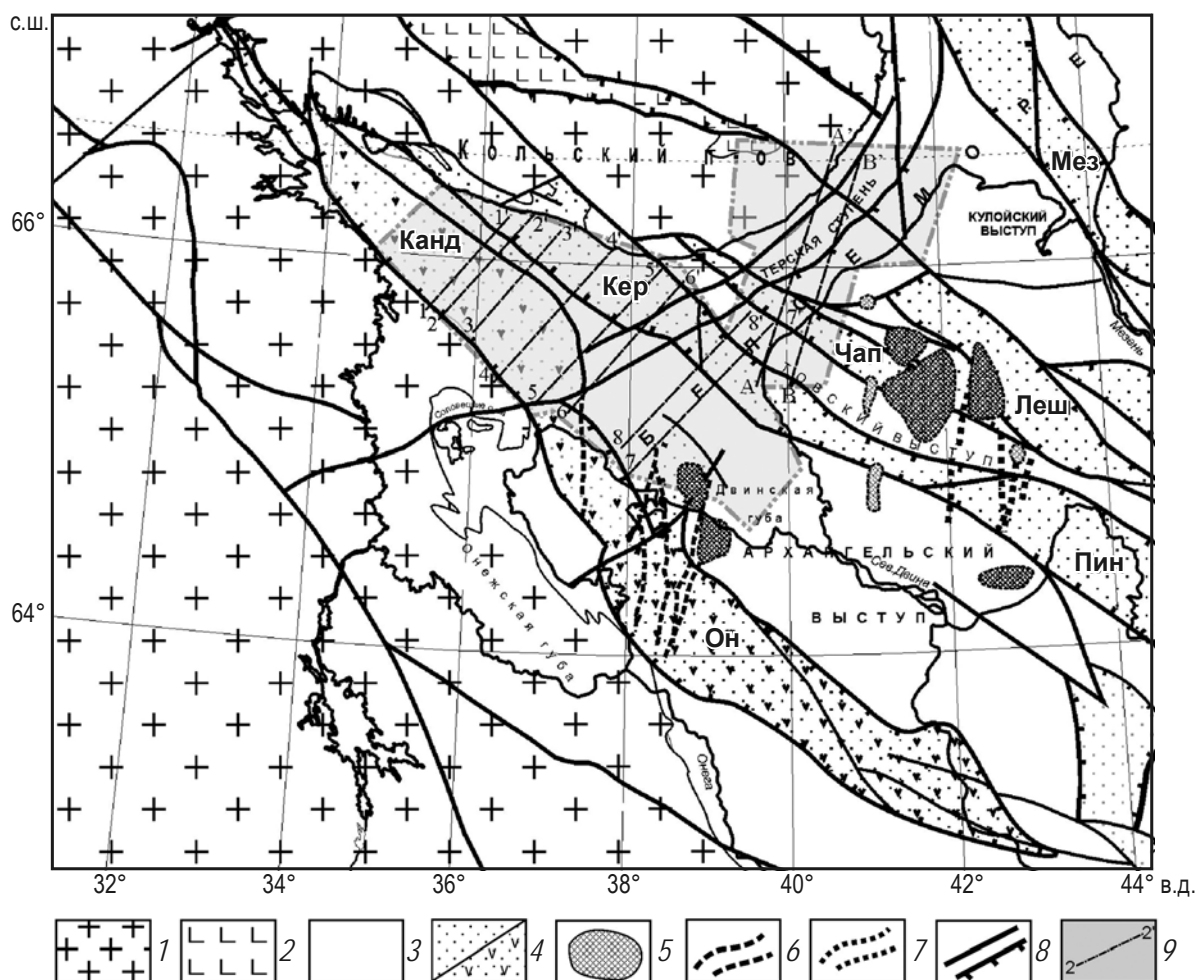


Рис. 1. Схема тектоники Беломорского региона (по [Балуев и др., 2012б; Буш, Калмыков, 2015] с изменениями)

1 – Балтийский щит; 2 – Имандра-Варзугский палеопротерозойский проторифтогенный пояс (вулканогенно-осадочная формация); 3 – плитная часть платформы, перекрытая осадочным чехлом; 4 – осадочное (сверху) и вулканогенно-осадочное (внизу) выполнение рифейских грабенов палеорифтовой системы Белого моря; 5 – ареалы проявления среднепалеозойского эксплозивного магматизма щелочно-ультраосновного состава; 6–7 – не выходящие на поверхность дайки базитов вендского (6) и среднепалеозойского (7) возраста; 8 – разломы неустановленной кинематики (сверху), сбросы и сдвиго-сбросы, ограничивающие рифтогенные грабены (снизу); 9 – рассматриваемые в статье профили морской магнитометрической съемки с указанием их номеров. Область с серой заливкой – исследуемая площадь

Использованы сокращения: Канд – Кандалакшский рифейский грабен, Он – Онежский, Кер – Керецкий, Пин – Пинежский, Чап – Чапомский, Леш – Лешуконский, Мез – Мезенский

Fig. 1. Tectonic scheme of the White Sea region (compiled from [Baluev et al., 2012b; Bush and Kalmykov, 2015])

1 is the Baltic Shield; 2 is Imandra-Varzuga Paleoproterozoic protorotogenic belt (volcanogenic-sedimentary formation); 3 is plate part of the platform overlaid with sedimentary cover; 4 is sedimentary (above the diagonal) and volcanogenic-sedimentary (below) implementation of Riphean grabens of the White Sea paleorift system; 5 are areas of the Middle Paleozoic explosive magmatism of alkaline-ultrabasic composition; 6 and 7 are Vendian and the Middle Paleozoic dikes of basites not reaching the surface; 8 are faults; 9 are profiles of marine magnetometric survey. The gray shading marks the area studied

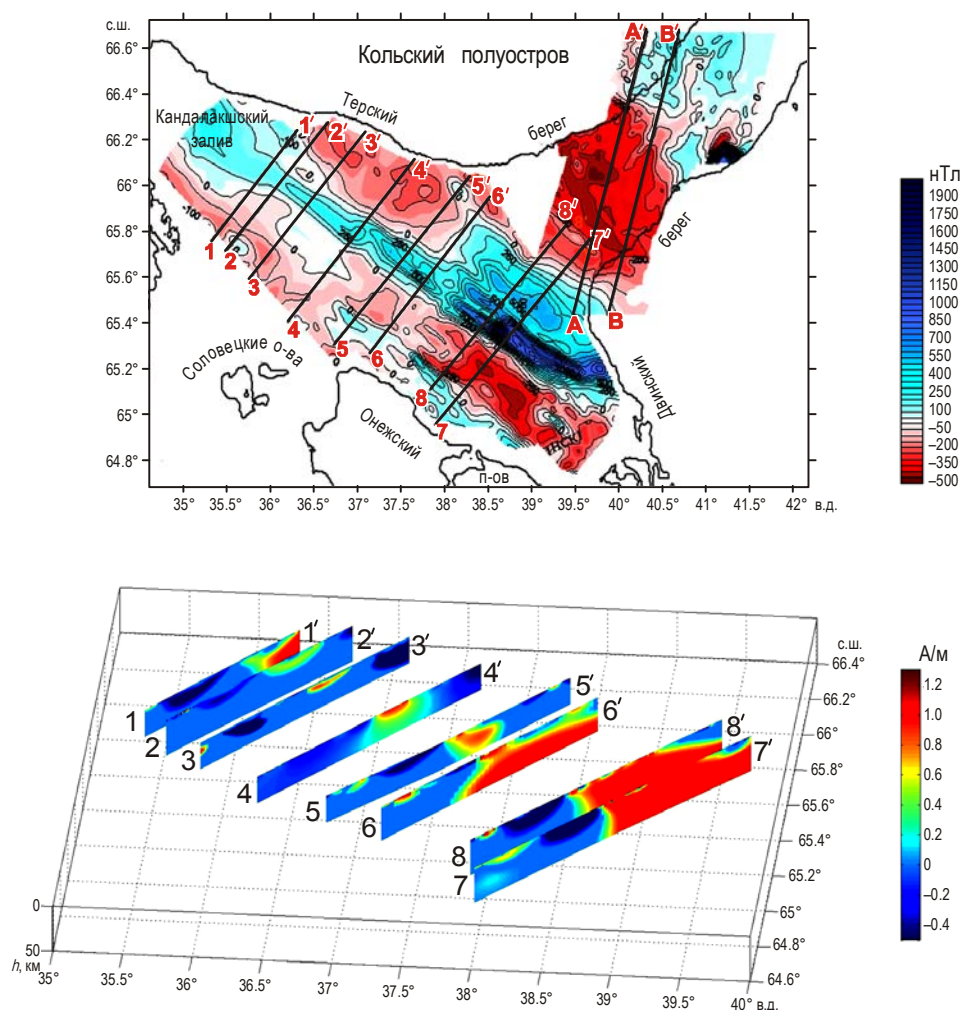


Рис. 2. Карта аномального магнитного поля (АМП) исследуемой площади (вверху, шкала – нТл) и 2D-модели распределения эффективной намагниченности для профилей 1–1'...8–8' (внизу, шкала – А/м). Положение профилей см. на рис. 1

Fig. 2. (Top) Map of the anomalous magnetic field in nT. (Bottom) 2D models of effective magnetization in A/m for profiles 1–1'...8–8' shown in Fig. 1

Для оценки глубин до верхних и нижних кромок источников аномалий в пакете программ Magdepth3D применяется несколько методов – работающий в частотной области спектральный метод, алгоритм “эйлеровской деконволюции”, метод подбора формы аналитического сигнала (два последних “работают” в пространственной области). При анализе радиально осреднённого спектра поля нами установлена приуроченность верхних кромок источников к нескольким структурным уровням (горизонтам). Выделение спектральной составляющей для каждого предполагаемого уровня позволяет оценить глубину до его верхних и нижних кромок. Полосовая фильтрация в частотной области в соответствии с выделенными диапазонами глубин дает возможность эффективно разделить аномалии от разноглубинных источников. Разделение источников по латерали выполняется автоматически с использованием разработанных алгоритмов локализации и скелетонизации максимумов горизонтального градиента и аналитического сигнала аномалий [Иваненко, Шишляев, 2013]. Проверка получаемых геометрических параметров осуществлялась подбором простых моделей источников для изолированных аномалий.

При решении обратной задачи в плоском варианте использовался комплекс Linverse2D, реализующий большинство современных алгоритмов решения таких задач. Сначала с помощью алгоритмов определения особых точек, деконволюции Эйлера и анализа аналитического сигнала аномалий определялась геометрия области распределения аномальной намагниченности, для чего привлекалась также априорная информация – данные о рельефе дна, сейсмические данные, другая геолого-геофизическая информация. Затем выделенная область разбивалась на элементарные блоки; для сформированной таким образом совокупности тел решалась прямая задача, после чего запускался итерационный процесс решения линейной обратной задачи с контролем заданных свойств решения. В нашем случае для контроля использовался гибридный критерий качества получаемых решений – взвешенная сумма их компактности [Last, Kubik, 1983] и четкости границ [Portniaguine, Zhdanov, 1999].

Для отдельных профилей была решена обратная задача методом прямого подбора в формате 2.5D [Cooper, 1997]. При этом магнитоактивный слой не разделялся по вертикали, а представлялся набором вертикальных блоков с эффективной намагниченностью, величина которой отражает интегральную намагниченность блока по глубине. Для уменьшения неоднозначности решения при оценке глубины верхних кромок привлекались данные о глубине залегания фундамента.

Анализ материалов магнитных исследований Центрального бассейна Белого моря

Анализ составленной авторами сводной карты аномального магнитного поля (см. рис. 2, *вверху*) показал наличие в Центральном бассейне Белого моря отчётливо выделяемых интенсивных положительных аномалий, простирающихся в северо-западном направлении от Двинского залива Белого моря в Кандалакшский. Амплитуда аномалий постепенно уменьшается в названном направлении и аномалии сливаются в единую широкую полосу. Для оценки распределения источников аномалий по вертикали была выполнена процедура разделения наблюдаемого поля по глубинам до источников, что позволило создать модель магнитоактивного слоя. Модель включает три структурных уровня (горизонта), каждый из которых отражает определённый этап формирования изучаемой площади. Положение верхних кромок источников магнитных аномалий для этих уровней представлено в левом столбце на рис. 3. Далее при описании для обозначения уровней используются римские цифры: I – нижний, II – средний, III – верхний уровни.

Нижний структурный уровень (основание магнитоактивного слоя) представлен крупными блоками преимущественно северо-западного простирания. В центральной части модели отмечаются максимальные глубины залегания нижних (15–13 км) и верхних (9–7 км) кромок источников магнитных аномалий. Эта область имеет отчётливо выраженное северо-западное простирание и представлена двумя крупными блоками. Протяжённость северного блока составляет 110 км при поперечном размере 40 км; размеры южного блока – 105 и 30 км соответственно. Между собой северный и южный блоки разделены узкой областью северо-восточного простирания, которая совпадает с выделяемым в этом месте разломом того же простирания. Вдоль границ выделяемой области наблюдается значительное уменьшение глубин нижних кромок до 10–8 км, верхних – до 6–4 км.

Оценки глубин до верхних и нижних кромок источников магнитных аномалий оказались близки к результатам сейсмических работ, которые были выполнены ОАО МАГЭ и показали, что глубина погружения кристаллического фундамента Кандалакшского грабена составляет 8–9 км [Журавлёв, 2007].

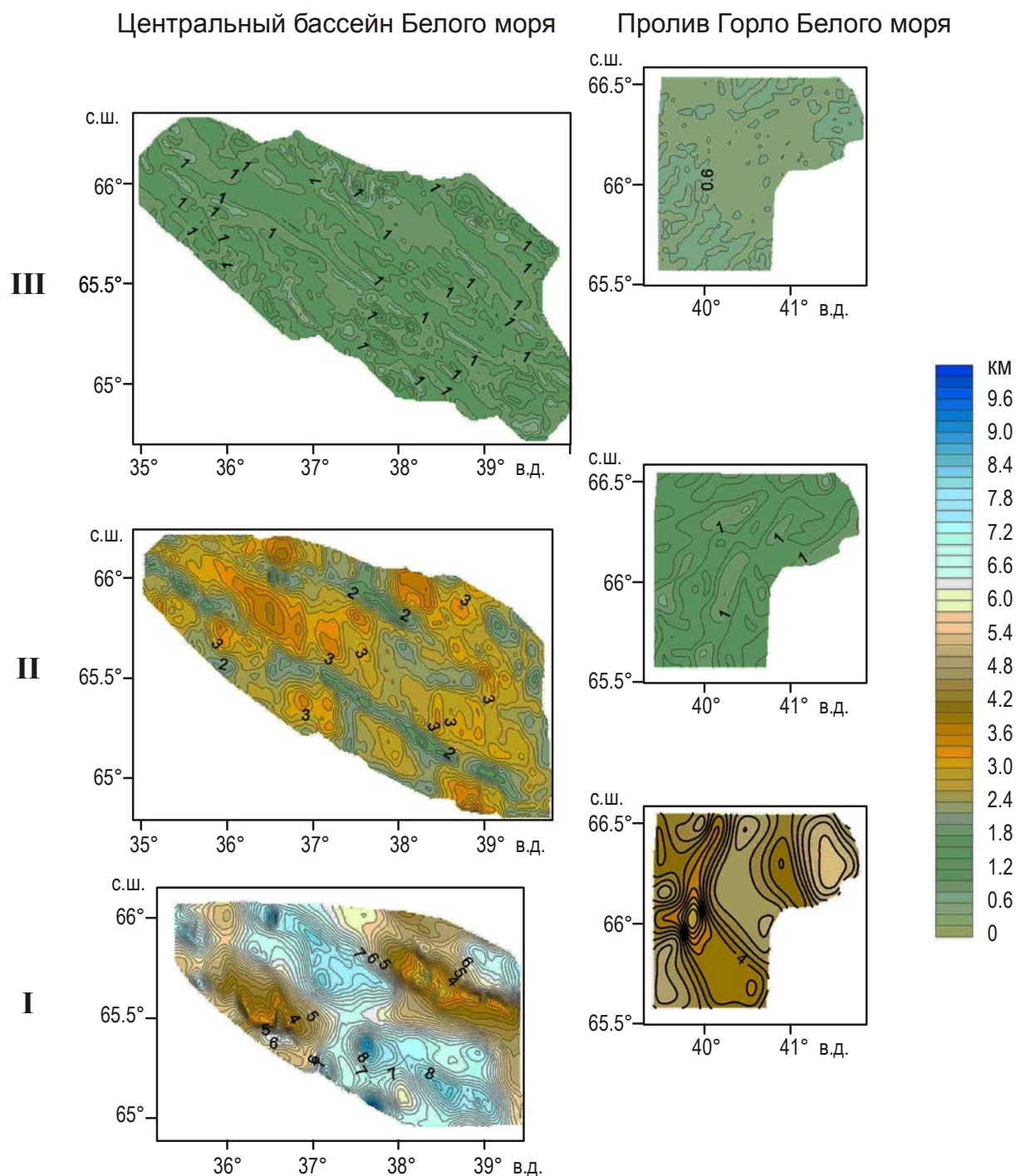


Рис. 3. Положение верхних кромок источников магнитных аномалий Центрального бассейна Белого моря (*левый столбец*) и пролива Горло Белого моря (*правый*)

Снизу вверх: I – нижний структурный уровень; II – средний; III – верхний. Шкала – глубины залегания верхних кромок, км

Fig. 3. Sources of magnetic anomalies in the White Sea Central basin (left panel) and the White Sea Throat (right panel): (bottom I) the lower, (center II) the middle, and (top III) the upper structural levels. Scale indicates the upper limits of levels in km

Сопоставление структуры нижнего уровня I с тектонической картой Белого моря [Балуев и др., 2012б] показало, что границы самой глубокой его области в плане совпадают с границами Онежско-Кандалакшского палеорифта, а границы северной и южной областей, вблизи которых глубины уменьшаются, – с основными разломными ограничениями, проходящими по контактам грабенов с Карельским и Архангельским выступами кристаллического фундамента.

Онежско-Кандалакшский рифт на тектонической карте Белого моря отмечается как область современного грабенообразования, в которой известны эпицентры землетрясений с интенсивностью более трех баллов [Балуев и др., 2012б], что предполагает процессы современной тектонической активности. По мнению авторов названной работы, нижний структурный уровень отражает рифтовый этап эволюции Беломорского подвижного пояса в среднем и позднем рифее, для которого характерно проявление континентального рифтогенеза.

Средний структурный горизонт II, расположенный на уровне осадочного выполнения рифтогенных грабенов, лежит в интервале глубин от 6–3 км до 4–1.5 км и также представлен узкими, линейно-вытянутыми телами преимущественно северо-западного простирания, которые приурочены к границе Онежско-Кандалакшского рифта с выступами кристаллического фундамента. Наряду с локальными телами названного простирания в пределах этого структурного уровня прослеживается и серия локальных тел север–северо-западного простирания, связанных, по всей видимости, с реактивацией палеорифтовой системы Белого моря в среднем палеозое. Следует отметить, что верхняя кромка среднего структурного уровня наиболее структурирована – наряду с линейно-вытянутыми телами северо-западного простирания здесь присутствует серия тел субмеридионального простирания, которые являются фактическим продолжением в акваторию Белого моря даек базитов вендского возраста, выделенных В.А. Бушем и Б.А. Калмыковым [2015] на Онежском полуострове.

Верхний структурный уровень III (интервал глубин от 3.0 до 0.4 км) представлен преимущественно узкими локальными телами северо-западного простирания, унаследованного от более древних и более глубоких горизонтов. В его пределах выделяются также сильномагнитные (эффективная намагниченность 4–6 А/м) тела изометричной формы трубчатого типа и тела с простиранием, отличным от северо-западного. Диапазон глубин залегания этих тел меняется от 1 до 0.2 км. В целом, верхний структурный уровень отражает высокочастотную составляющую аномального магнитного поля и связан с сильномагнитными источниками аномалий, расположенными в его верхах.

Приведённые характеристики позволяют предполагать, что верхний структурный уровень мог быть сформирован во время последнего, наиболее позднего этапа тектонической активизации региона, проявившейся в пределах Беломорья формированием системы активизированных разрывных дислокаций, отчетливо выраженных в рельефе дна бассейна Белого моря и в очертаниях береговых линий [Балуев и др., 2012б]. Позже во время последнего ледникового периода (в плейстоцене) верхняя часть осадочного комплекса была перекрыта флювиогляциальными отложениями (моренами), которые, видимо, и являются основным источником интенсивных высокочастотных аномалий.

Помимо процедуры разделения аномального магнитного поля и анализа отдельных структурных уровней, для ряда профилей было проведено 2D моделирование. При этом для каждого профиля сначала выполнялась процедура частотного разделения АМП, а затем решалась обратная задача отдельно для высокочастотной составляющей поля, связанной с источниками в верхней части коры (рис. 4), и для низкочастотной, обусловленной более глубокими горизонтами земной коры (см. рис. 2, *внизу*).

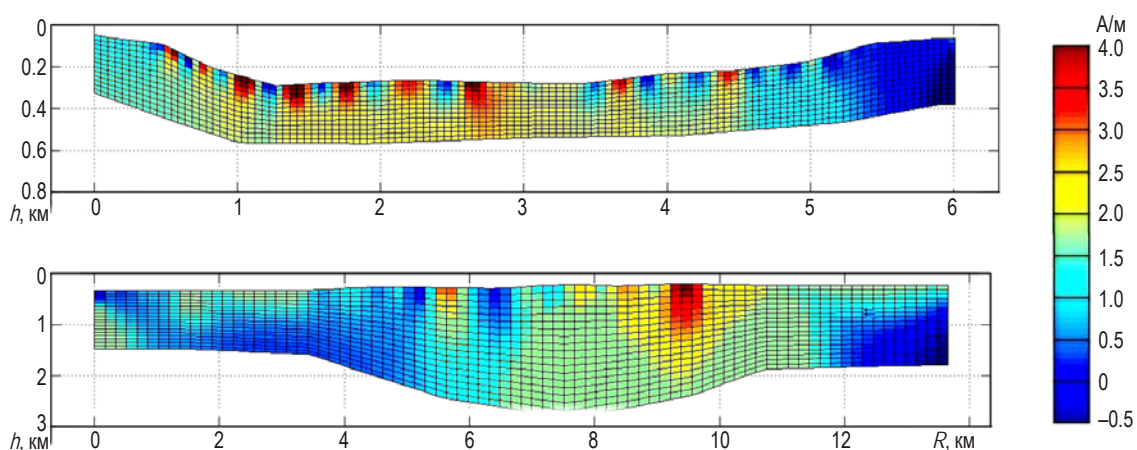


Рис. 4. Двумерные модели для высокочастотных составляющих аномалий поля, полученные для профилей 1–1' (вверху) и 2–2' (внизу). Положение профилей см. на рис. 1. Шкала справа – значения эффективной намагниченности, А/м

Fig. 4. 2D models of high-frequency components of anomalies for profiles 1–1' (top) and 2–2' (bottom). Scale gives the effective magnetization in A/m

Наибольший интерес для авторов представляет глубинное строение региона. На рис. 2, *внизу* представлены модели магнитоактивного слоя для низкочастотной составляющей АМП, где можно видеть, что в юго-восточной части исследуемой площади выделяется массивный сильномагнитный источник аномалий с эффективной намагниченностью 1.0–1.5 А/м. Видимая протяжённость этого объекта вдоль профиля составляет 50–70 км, глубина нижних кромок – порядка 30 км, верхних – 4–8 км. К северо-западу рассматриваемый объект выклинивается – нижние кромки поднимаются до глубин 15–25 км, видимая протяжённость вдоль профиля составляет уже 30–40 км.

Полученные оценки свидетельствуют, что по мере погружения кристаллического фундамента к юго-востоку в том же направлении погружаются и источники аномалий. Возможно, заложение Онежско-Кандалакшского рифта сопровождалось проявлением активного магматизма с основным источником, расположенным в юго-восточной части изучаемой площади.

Здесь следует отметить, что в эволюции палеорифтовой системы Белого моря и, в частности, Онежско-Кандалакшского палеорифта, прослеживается как минимум два этапа проявления магматизма – этап рифейско-вендского основного вулканизма, инициированного непосредственно процессами континентального рифтинга, и этап среднепалеозойского (позднедевонского) щелочно-ультраосновного магматизма, связанного со среднепалеозойской реактивацией рифтовой системы.

Рифейские вулканогенно-обломочные породы, вмещающие силлы и дайки диабазов и долеритов, вскрыты бурением на Онежском полуострове в Онежском грабене палеорифта. Кроме этого, характерные аномалии потенциальных полей предполагают наличие внутри рифейской толщи Кандалакшского грабена таких же вулканогенных образований. По-видимому, вулканогенные породы довольно широко распространены в северо-западной и центральной частях Кандалакшского грабена и на юго-востоке Керецкого. Подводящим каналом мог служить мощный разлом – Беломорский шов, который, вероятно, и отображается в магнитном поле в виде описанной выше мощной линейной положительной аномалии. При погружении краевых структур Архангельского горста в Керецкий грабен (см. рис. 1) увеличивается и глубина залегания верхних кромок магнитоактивных тел.

Характерно, что все тела ориентированы в направлении северо-запад–юго-восток. Это говорит о том, что магматизм либо активно развивался на этапе заложения рифтогенных прогибов, либо был многостадийным и проявлялся впоследствии только вблизи магмаподводящего центра – Беломорской шовной зоны.

Среднепалеозойская активизация палеорифтовых структур проявилась во внутриплитном магматизме, представленном роями щелочных даек и трубок взрыва, в том числе и кимберлитового состава, а также сложными кольцевыми массивами щелочно-ультраосновной и щелочной формаций, которые расположены в зонах динамического влияния рифтов Беломорской системы.

Два приводимых на рис. 4 примера распределения источников АМП для высокочастотной составляющей согласуются с предположением авторов о том, что верхний структурный горизонт был сформирован во время наиболее позднего этапа тектонической активизации, когда проявлялась современная тектоническая активность. Затем во время последнего ледникового периода (в плейстоцене) поверх этих комплексов были наложены ледниково-осадочные отложения (морены), которые и являются основным источником интенсивных высокочастотных аномалий.

Анализ материалов магнитных исследований пролива Горло Белого моря

Анализ аномального магнитного поля пролива Горло Белого моря позволил авторам построить модель магнитоактивного слоя, которая, как и в случае Центрального бассейна, представлена тремя структурными уровнями (горизонтами), обозначаемыми на рис. 3 как I (нижний), II (средний), III (верхний).

Нижний структурный уровень I (см. рис. 3, I, *справа*), формирующий основание магнитоактивного слоя, прослежен в виде положительной, линейно-вытянутой структуры северо-западного простирания, разделяющей две отрицательных структуры того же простирания. Сопоставление границ нижнего уровня с тектонической картой Белого моря [Балуев и др. 2012б] показало их совпадение с основными разломными ограничениями, которые проходят по контакту Лешуконского (с севера) и Керецкого (с юга) палеорифтов с Товским выступом кристаллического фундамента. Этот структурный уровень отражает рифтовый этап эволюции Беломорского подвижного пояса в среднем и позднем рифее, характеризующийся мощным проявлением континентального рифтогенеза [Балуев и др., 2012а].

Верхняя кромка среднего структурного уровня II залегает на глубине 1.4–1.0 км (см. рис. 3, II, *справа*), нижняя – 2.0–3.2 км. Уровень II находится в верхней части консолидированного фундамента и представлен узкими, линейно-вытянутыми телами преимущественно северо-восточного простирания. Эти тела ортогональны структурам нижнего уровня I, но конформны простиранию самого пролива, который представляет собой современный грабен, заложённый вдоль системы разломов, также имеющих северо-восточное простирание. Изменение простирания выделяемых тел с северо-западного, наблюдаемого в нижнем уровне I, на северо-восточное в среднем может быть связано с активизацией именно этих поперечных структур, игравших значительную роль в формировании бассейна Белого моря. Помимо того, что позднекайнозойские сбросы определили границы современного грабена пролива Горло Белого моря, материалы сейсмоакустического профилирования показали существование системы разрывных нарушений северо-восточного простирания в породах, подстилающих четвертичные отложения в центральной части грабена. В рельефе дна каждому из разрывов соответствует отрицательная форма в виде ложбины или рва, что свидетельствует о “живом” характере этих дислокаций. С точки зрения унаследованности, грабен пролива заложён

над ступенчатой структурой фундамента, погружающегося от Балтийского щита под чехол Мезенской синеклизы.

Структурный уровень III (см. рис. 3, III, *справа*) расположен в верхах осадочного чехла и представлен преимущественно локальными телами разнообразной формы и простираения, отражая высокочастотную составляющую поля. Приведённые характеристики позволяют предполагать, что верхний структурный горизонт отражает те неоднородности на поверхности вендского осадочного чехла, выполняющего дно пролива, или в его приповерхностном слое, которые возникли в результате неотектонических подвижек фундамента. Позже, во время последнего ледникового периода (в плейстоцене) в самом верхнем горизонте сформировались ледниково-осадочные отложения (морены) – основные источники интенсивных высокочастотных аномалий.

Наряду с процедурой разделения АМП и выделением на её основе трёх структурных уровней авторами для двух профилей в формате 2.5D [Cooper, 1997] была решена обратная задача (рис. 5).

Полученные модели представлены набором источников магнитных аномалий, расположенных на разных структурных уровнях, отражающих разные этапы активизации внутриплитного магматизма палеорифтовой системы Белого моря. При этом источники аномалий приурочены к диапазонам глубин, выделяемым с помощью процедуры разделения АМП.

При сопоставлении графиков магнитного поля с гравиметрическими данными по материалам альтиметрии, проведенной на тех же профилях, установлено, что магнитные и гравитационные аномалии находятся в противофазе – к отрицательной длиннопериодной магнитной аномалии приурочена положительная аномалия силы тяжести (см. рис. 5). Такое соотношение полей, не характерное для рассматриваемой области в целом, является отличительной чертой Терско-Зимнегорского блока Беломорского подвижного пояса, перекрытого в данном случае водами акватории пролива Горло Белого моря. Блок, видимо, сложен более плотными породами нижней части гранитогнейсового основания. Характер аномальных полей и результаты бурения говорят о том, что вещественные комплексы этого блока прослеживаются в юго-восточном направлении через этот пролив на Зимний берег, где ими сложены выступы фундамента и, возможно, северный борт Керецкого грабена.

Следует отметить, что в пределах блока на Терском и Зимнем берегах обнаружены трубки мелилититов, алмазоносных кимберлитов и лампроитов. Возможно, отмечаемое локальное повышение значений аномального магнитного поля вблизи 60-го километра профиля А–А' (см. рис. 5, *вверху*) может быть объяснено существованием еще одного поля кимберлитовых трубок в пределах акватории пролива Горло Белого моря.

Отметим и тот факт, что в северо-восточной части обоих профилей положительная длиннопериодная магнитная аномалия соответствует Восточно-Кольскому блоку (домену) Центрально-Кольского геоблока, а градиент совпадает с границей последнего с Беломорским подвижным поясом, вдоль которого протягивается раннепротерозойский Имандра-Варзуга-Устьпонойский зеленокаменный пояс, представляющий собой межблоковую грабен-синклиналь, выполненную вулканогенно-осадочным комплексом пород с содержанием коматиитов в разрезе.

Представленные в статье результаты позволяют сделать вывод, что использование современных компьютерных технологий решения задач фильтрации, разделения полей, прямой и обратной задач магнитометрии в комплексе с другими геолого-геофизическими методами создает основу для эффективного изучения строения и эволюции верхней части земной коры.

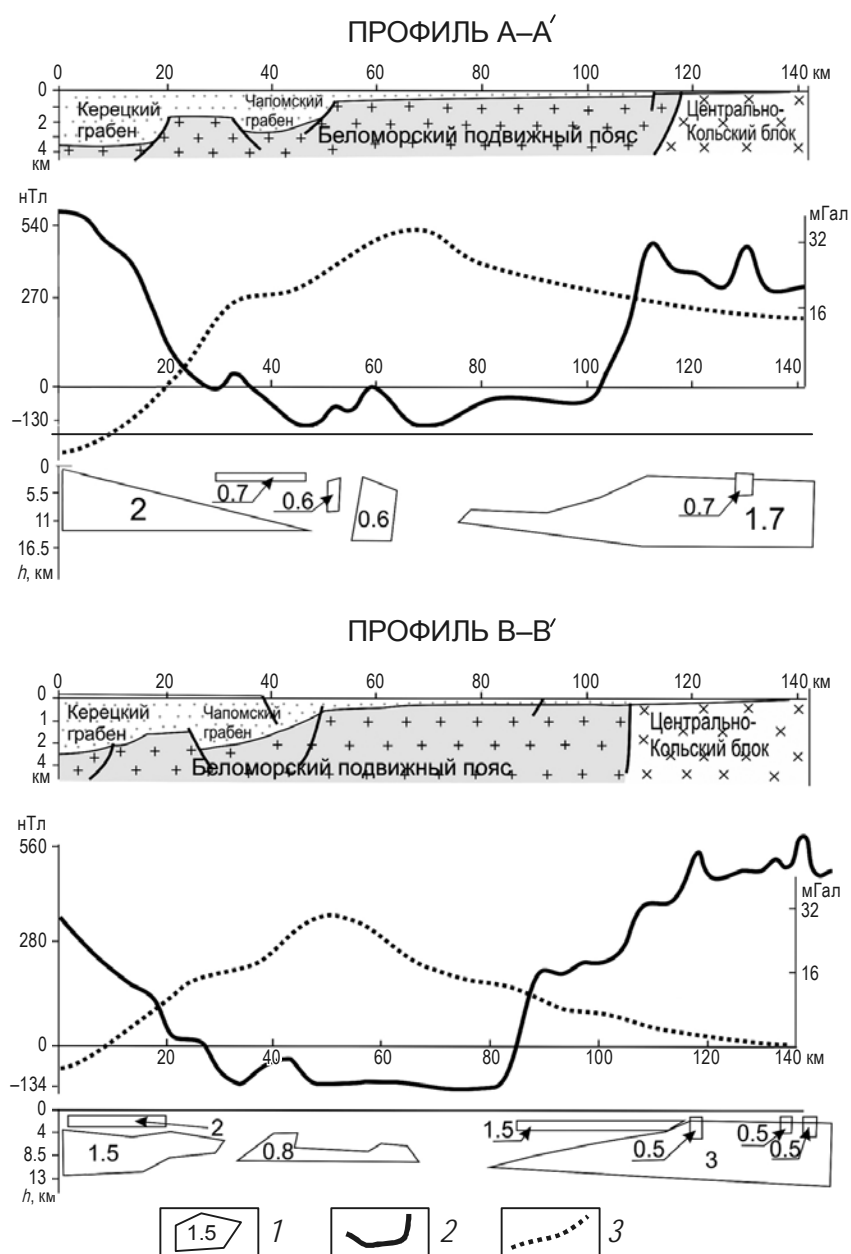


Рис. 5. Пролив Горло Белого моря. Модели источников магнитных аномалий, построенные для профилей А–А' (вверху) и В–В' (внизу)

1 – контуры выделяемых источников с указанием значения эффективной намагниченности, А/м; 2 – кривые аномального магнитного поля ΔT_a , нТл (шкала слева); 3 – кривые гравитационного поля в редукции Буге, ΔG , мГал (шкала справа)

Fig. 5. Models for sources of magnetic anomalies for A–A' (top) and B–B' (bottom) profiles in the White Sea Throat; 1 is magnetization in A/m, 2 is anomalous magnetic field ΔT_a in nT (left axis), and 3 is the gravitational field in the Bouguer reduction ΔG in mGal (right axis)

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 0149-2018-0005 при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 14-05-00149, 18-05-00316).

Литература

- Аплонов С.В., Бурзин М.В., Вейс А.Ф., Владимирова Т.В., Горбачёв В.И., Капустин И.Н., Коваленко В.С., Лебедев Б.А., Махоткин А.И., Рассомахин В.Я., Сапожников Р.Б., Симоненко Л.А., Сулейманов А.К., Тимошенко О.М., Тимошенкова Н.В., Фёдоров Д.Л., Хисамов Р.С., Чамов Н.П., Ченборисова Р.З., Ширококов В.Н. Геодинамика Мезенского осадочного бассейна. СПб.: Наука, 2006. 319 с.
- Балуев А.С., Васильева Т.И., Глуховский М.З., Моралёв В.М., Пржиягловский Е.С., Терехов Е.Н. Геодинамическая эволюция палеорифтовых систем Белого и Баренцева морей // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX–XXI веков. Т. 1. Тектоника, стратиграфия, литология: Материалы Всероссийской научной конференции. М.: ООО “Связь-принт”, 2002. С.23–25.
- Балуев А.С., Журавлёв В.А., Терехов Е.Н., Пржиягловский Е.С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий: Объяснительная записка к “Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий” масштаба 1:500000. М.: ГЕОС, 2012а. 104 с.
- Балуев А.С., Журавлёв В.А., Колодяжный С.Ю., Пржиягловский Е.С., Слабунов А.И., Терехов Е.Н., Шаров Н.В., Шкарубо С.И. Тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий масштаба 1:500000 / Гл. ред. М.Г. Леонов, Г.С. Казанин; Отв. ред. А.С. Балувев. М.: ИПП “Куна”, 2012б. 104 с.
- Брусиловский Ю.В., Иваненко А.Н., Попов К.В., Филлин А.М. Геомагнитная съёмка в Белом море // Океанология. 2003. Т. 43, № 2. С.274–278.
- Буш В.А., Калмыков Б.А. Новые данные по домезозойскому внутриплитному магматизму Восточно-Европейской платформы // Геотектоника. 2015. № 5. С.43–61.
- Журавлёв В.А. Структура земной коры Беломорского региона // Разведка и охрана недр. 2007. № 9. С.22–26.
- Журавлёв В.А., Павлов С.П., Шитилов Э.В. Структура фундамента и осадочного чехла Беломорского сектора Восточно-Европейской платформы // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна (проект программы “Исследование природы Мирового океана” федеральной целевой программы “Мировой океан”). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. Вып. 2. С.302–310.
- Иваненко А.Н., Брусиловский Ю.В., Филлин А.М., Шишкина Н.А. Современные технологии обработки и интерпретации магнитных данных при работах на морских месторождениях нефти и газа // Геофизика. 2012. № 3. С.60–71.
- Иваненко А.Н., Шишляев В.В. Автоматическое картирование источников потенциальных полей // Материалы XX Международной научной конференции (Школы по морской геологии). М.: ГЕОС, 2013. Т. 5. С.116–119.
- Cooper G.R.J. Forward modelling of magnetic data // Comput Geosci-computers & Geosci. 1997. V. 23, N 10. P.1125–1129.
- Last B.J., Kubik K. Compact gravity inversion // Geophysics. 1983. V. 48. P.713–721.
- Portniaguine O., Zhdanov M.S. Focusing geophysical inversion images // Geophysics. 1999. V. 64. P.874–887.

Сведения об авторах

БРУСИЛОВСКИЙ Юрий Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: ura77777@rambler.ru

ИВАНЕНКО Александр Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-49. E-mail: ivanenko.ocean@gmail.com

БАЛУЕВ Александр Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Геологический институт РАН, 119017, Москва, пер. Пыжевский, д. 7, стр. 1. Тел.: +7(495) 959-01-70. E-mail: albaluev@yandex.ru

ЖУРАВЛЁВ Виталий Алексеевич – начальник комплексной геолого-геофизической партии ОАО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция”. 183038, г. Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26. Тел.: +7(8152) 400-580 (доб. 227). E-mail: vitalyzh@mage.ru

A MODEL OF THE MAGNETICALLY ACTIVE LAYER OF THE WHITE SEA PALEORIFT SYSTEM

Yu.V. Brusilovskiy¹, A.N. Ivanenko¹, A.S. Baluev², V.A. Zhuravlyov³

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

² Geological Institute, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

³ Marine Arctic Geological Expedition, Murmansk, Russia

Abstract. The model of structure and formation of a magnetically active layer of the White Sea paleorift system was created based on the results of analysis and interpretation of anomalous magnetic field and other geological and geophysical data. It is shown that the structure of this layer is complex and reflects all main stages of tectonic activity of the region from the middle and late Riphean to events of the last ice age in a Pleistocene. The model of the magnetically active layer is composed from three structural levels (horizons); each level reflects a certain stage of formation of the studied area. The lower structural level in the basis of a magnetically active layer reflects a rift stage of evolution of the White Sea mobile belt in the middle and a late Riphean characterized by manifestation of a continental riftogenesis [Baluev et al., 2012]. The average structural horizon reflects the middle Paleozoic, late Devonian, stage of the rift system reactivation characterized by alkaline and ultramafic magmatism and presented by swarms of alkaline dikes and tubes of explosion including kimberlites. The upper structural level reflects a high-frequency component of anomalous magnetic field and is connected with the sources of high magnetic anomalies located at its top. Characteristics of this structural level suggest that it could be formed during the last late stage of tectonic activation of this region.

Keywords: paleorift system of the White Sea, rifting model, magnetically active layer, inverse problem, a division of fields, effective magnetization.

References

- Aplonov S.V., Burzin M.V., Weiss A.F., Vladimirova T.V., Gorbachev V.I., Kapustin I.N., Kovalenko V.S., Lebedev B.A., Makhotkin A.I., Rassomakhin V.Ya., Sapozhnikov R.B., Simonenko L.A., Suleymanov A.K., Tymoshenko O.M., Timoshenkov N.V., Fyodorov D.L., Hisamov R.S., Chamov N.P., Chenborisova R.Z., and Shirobokov V.N. *Geodinamika Mezenskogo osadochnogo basseina* (Geodynamics of the Mezen sedimentary basin), St.Petersburg: Nauka, 2006.
- Baluev A.S., Vasilyeva T.I., Glukhovskiy M.Z., Moralyov V.M., VA., Przhiyaglovskiy E.S., and Terekhov E.N. Geodynamic evolution of the paleorift systems of the White and Barents seas. *Geologiya, geokhimiya i geofizika na rubezhe XX-XXI vekov, t. 1 Tektonika, stratigrafiya, litologiya* (Geology, geochemistry, and geophysics at a turn of XX XXI centuries. Tectonics, stratigraphy, lithology), Moscow: Svyaz-print, 2002, vol. 1, pp. 23-25.
- Baluev A.S., Zhuravlyov V.A., Terekhov E.N., and Przhiyaglovskiy E.S. *Tektonika Belogo morya i prilegayushchikh territorii* (Tectonics of the White Sea and adjacent territories. An explanatory note to “The tectonic map of the White Sea and adjacent territories” scale 1:500000), Moscow: GEOS, 2012.
- Baluev A.S., Zhuravlyov V.A., Kolodyazhny S.Yu., Przhiyaglovskiy E.S., Slabunov A.I., Terekhov E.N., Sharov N.V., and Shkarubo S.I. *Tektonicheskaya karta Belogo morya i prilegayushchikh territorii* (Tectonic map of the White Sea and adjacent territories), scale 1:500000, ed. M.G. Leonov and G.S. Kazanin, Moscow: IPP “Kuna”, 2012.

- Brusilovsky Yu.V., Ivanenko A.N., Popov K.V., and Filin A.M. Geomagnetic Survey in the White Sea, *Oceanology*, 2003, vol. 43, no. 2, pp. 258-262.
- Bush V.A. and Kalmykov B.A. New data on domezozoosky intra slabby magmatism of the East European platform, *Geotectonics*, 2015, no. 5, pp. 43-61.
- Cooper G.R.J. Forward modelling of magnetic data, *Comput geosci-computers & geosci*, 1997, vol. 23, no. 10, pp. 1125-1129.
- Ivanenko A.N., Brusilovsky Yu.V., Filin A.M., and Shishkina N.A. Modern technologies of processing and interpretation of magnetic data during the works on sea oil and gas fields, *Geophysics*, 2012, no. 3, pp. 60-71.
- Ivanenko A.N. and Shishlyaev V.V. Automatic mapping of sources of potential fields, *Materialy XX Mezhd. Nauch. Konf. (Shkola po morskoi geologii) (Proc. XX Int. Sci. Conf. (School on sea geology)*, Moscow: GEOS, 2013, vol. 5, pp.116-119.
- Last B.J. and Kubik K. Compact gravity inversion. *Geophysics*, 1983, vol. 48, pp. 713-721.
- Portniaguine O. and Zhdanov M.S. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*, 1999, vol. 64, pp. 874-887.
- Zhuravlyov V.A. Structure of crust of the White Sea region, *Razvedka i okhrana neдр (Investigation and protection of a subsurface)*, 2007, no. 9, pp. 22-26.
- Zhuravlyov V.A., Pavlov S.P., and Shipilov E.V. Structure of the basement and sedimentary cover of the White Sea sector of the East European platform. *Kompleksnye issledovaniya potsessov, kharakteristik i resursov rossiiskikh morey Severo-Evropеiskogo basseina (Complex research of processes, characteristics, and resources of the Russian seas of the North European basin)*, Apatity: KNTS RAN, 2007, no. 2, pp. 302-310.