

ПРОЦЕССЫ ЭВОЛЮЦИИ ЛИТОСФЕРЫ В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА ПО ДАННЫМ КАРТИРОВАНИЯ ДОННЫХ ОБНАЖЕНИЙ МАГМАТИЧЕСКИХ ТЕЛ

Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Мороз Е.А., Добролюбова К.О.

Геологический институт РАН, Москва, Россия

e-mail: sysookolov@yandex.ru

В результате картирования рельефа дна многолучевым мелководным эхолотом в ходе 25-ого рейса НИС «Академик Николай Страхов» (2007 год, Геологический Институт РАН) к юго-западу от архипелага Земля Франца-Иосифа, был обнаружен 21 отпрепарированный выступ предположительно магматических тел, находящихся в пределах изобаты 350 м. В рельефе тела выражены формами типа «дайки» и «силлы». Тела имеют широкий набор азимутов, что говорит о возможности их формирования в геодинамическом режиме с переменными направлением осей напряжений и интенсивностью. По картине аномального магнитного поля выделяется предполагаемый трансформный разлом, к югу от которого сгруппированы формы типа «дайки», а к северу – «силлы». Вал Виктория вместе с отпрепарированными на его северо-восточном продолжении выступами магматических тел был сформирован в условиях транспрессии.

Ключевые слова: многолучевой эхолот, магнитное поле, аномалии типа «дайка», транспрессия, азимут простирания, Земля Франца-Иосифа.

LITHOSPHERE EVOLUTION OF THE FRANZ-JOSEF LAND ARCHIPELAGO BASED ON MAPPING THE BOTTOM DENUDATIONS OF MAGMA BODIES

The 25-th expedition of R/V «Akademik Nikolaj Strakhov» carried out by Geological institute RAS (2007), surveyed the sea bottom in south-west offshore of Franz-Joseph Land with multi-beam echo-sounder. It revealed 21 outcrops of supposedly magmatic bodies within the limits of 350 m isobath. These bodies are reflected in bathymetry as «dike» type and «sill» type features. The bodies were formed in geodynamic regime with alternating stress axis orientation and intensity according to wide range of azimuths of these forms observed in bathymetry. Magnetic field map reveals lineament most likely to be interpreted as a transform fault. The zones out of the lineament are «dikes» to the south of the fault and «sills» to the north of it. The Victoria swell together with outcrops of the magmatic bodies at its north-east continuation were formed in transpression conditions.

Keywords: multi-beam echo-sounder, magnetic anomalies, dike-type relief anomaly, transpression, strike azimuth, the Franz-Joseph Land.

Введение

Старт спрединговых процессов вдоль рифта Срединно-Атлантического хребта (САХ) на сегментах, разделенных сверхдлинными трансформными разломами (более 200 км), происходил в разное время: от ~170 млн. лет в центральном сегменте до ~59 млн. лет в северном и ~54 млн. лет в арктическом [1]. Процесс проградации САХ на север и далее в арктическую область сопровождался возникновением вторичных спрединговых центров (море Лабрадор), чья активность затухала при продолжении развития рифта по главной траектории. Таким «недоразвитым» спрединговым центром является также район юрско-мелового базальтоидного магматизма архипелага Земля Франца-Иосифа [2]. Рифтогенные процессы деструкции литосферы сопровождаются магматизмом различной продуктивности. Его пространственное распределение характеризует геодинамические условия данного этапа эволюции литосферы. Основным материалом для изучения магматических пород этого района был получен в наземных экспедициях на доступных обнажениях без ледникового покрова. Поскольку конфигурация аномального магнитного поля (АМП) района [1] и аномалии типа «дайки» и «силлы» на сейсмических

разрезах методом общей глубинной точки ОГТ [3] показывают, что источники АМП распространены далеко за пределами архипелага, картирование донных обнажений магматических тел на акватории становится актуальной задачей в исследовании района. Инструментальным способом решения этой задачи является применение многолучевых эхолотов, позволяющих в шельфовом диапазоне глубин получать карты масштаба до 1:10000. Использование сонарной выборки эхолотных данных позволяет анализировать рассеивающую способность пород дна, что эффективно при поиске плотных магматических пород. В данной работе приведены некоторые результаты картирования акватории к юго-западу от архипелага Земля Франца-Иосифа, выполненные в 25-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (Геологический институт РАН, 2007).

Схема работ и первичные данные

Схема маршрута 25-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» в районе исследований показана на рис. 1. Работы проводились по системе субширотных галсов между архипелагом Земля Франца-Иосифа и государственной границей. Съемка осуществлялась мелководным многолучевым эхолотом SeaBat 8111 (Дания), работающим на частоте

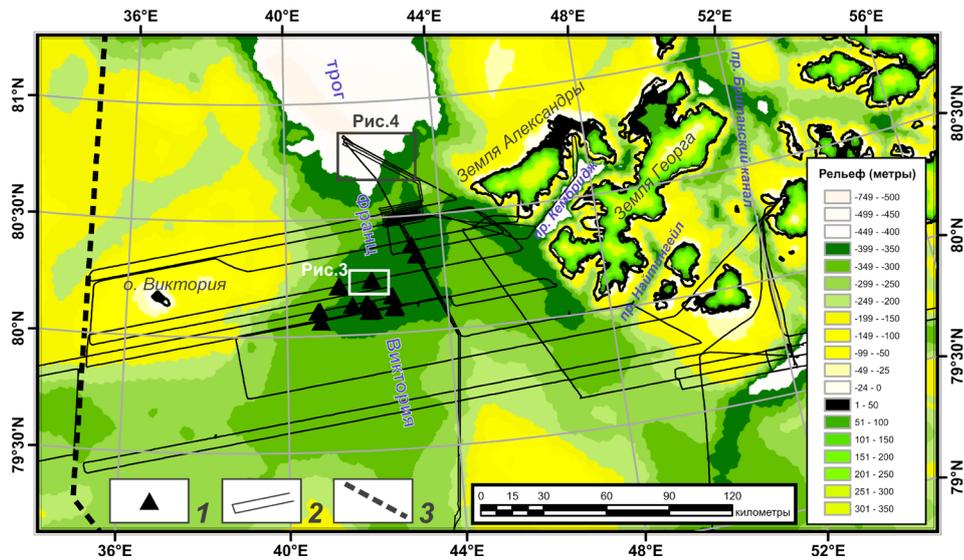


Рис. 1. Район работ 25-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» в Баренцевом море (Геологический институт РАН, 2007) к юго-западу от архипелага Земля Франца-Иосифа. Квадратами с номерами рисунков показаны положения детальных фрагментов рельефа дна, приведенных далее. 1 – аномалии рельефа дна типа «дайка»; 2 – маршрут экспедиции; 3 – государственная граница 2011 года

100 кГц и имеющим 101 луч с эффективными телесными углами по 1.5° в развороте 150° , что обеспечивает в шельфовом диапазоне глубин полосу озвучивания в пределах 600-1100 м (~ 2.5 глубины воды). Используемая модификация SeaBat 8111 имеет возможность регистрации сонарной выборки зарегистрированного акустического поля в отдельную запись, аналогичную сигналу гидролокатора бокового обзора (ГБО). Это позволяет одним прибором осуществлять сбор гидроакустической информации различного вида без учета раздельной геометрии приборов относительно GPS антенны с синхронной пространственной привязкой обоих наборов данных – батиметрии и сонарных.

Анализ сонограмм и рельефа дна показал наличие таких донных форм, как газовые воронки (покмарки), борозды выпаживания (плугмарки), аномалии рельефа типа «дайка» и проч. Последние представляют собой возвышенности рельефа с заметно большей интенсивностью рассеивания акустического сигнала, чем у фонового пространства дна, которое представлено либо четвертичными отложениями, либо мезозойскими терригенными отложениями. Пример записи с аномалией такого типа приведен на рис. 2. Положительная форма рельефа высотой около 30 м и шириной у основания около 300 м является валом, ориентированным субперпендикулярно траектории судна и содержащим внутри себя области с резко контрастной интенсивностью рассеивания пород дна, выстроенные в цепочки. Кроме того, в 1.5-2.5 км от этого вала, который интерпретируется нами как отпрепарированный выступ магматического тела, наблюдается система небольших уступов, косо ориентированных к траектории судна. Подобная картина акустического поля может быть сформирована серией субгоризонтальных тел высо-

кой плотности, обнажающихся на дне под небольшим углом к поверхности. Эта форма может быть интерпретирована как обнажение пачки силлов. Магматическая природа аномалий рельефа подобного рода (см. рис. 2) в этой части Баренцева моря подтверждается в ранних исследованиях сопоставлением с данными АМП [4].

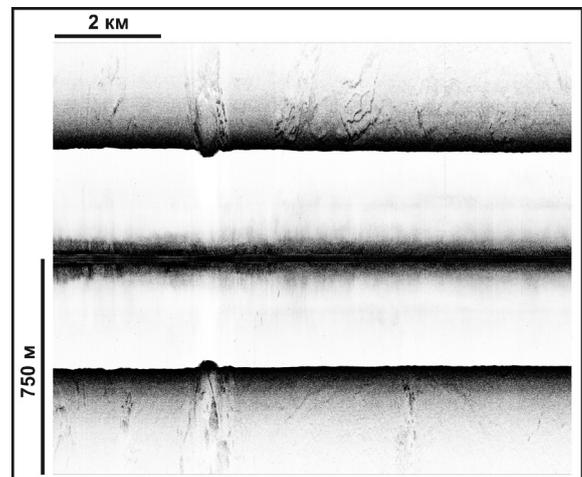


Рис. 2. Образец записи сонарных данных эхолота 25-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (Геологический институт РАН, 2007) с аномалией типа «дайка»

По результатам съемки, выявлена 21 аномалия типа «дайка», положение которых показано на рис. 1. Распределение этих объектов в пространстве сконцентрировано в устьевой части трога Франц-Виктория в пределах изобаты 350 метров и глубже. Учитывая насыщенность мезозойского разреза магматическими телами [3], разумно предположить, что аналогичные объекты могли бы быть отпрепарированы и в других частях акватории, где проходил маршрут экспедиции. Но экзарационная

деятельность ледников, по всей видимости, имела максимальную интенсивность именно в этой части акватории, переходящей к северу в трог Франц-Виктория.

Детальные формы рельефа дна

На рисунке 3 приведен образец данных рельефа дна с аномалиями типа «дайка». На северном галсе карты расположена форма, аналогичная рис. 2. Она представлена сдвоенной грядой, имеющей азимут около 350° (см. рис.3-1). Рядом с ней наблюдаются несколько гряд амплитудой 8-10 м с азимутом от 310° до 335° . Это показывает сложную систему трещиноватости вмещающих пород, по которой шло внедрение магматических тел. На южном галсе (см. рис.3-2) наблюдаются перекрещенные аномалии типа «дайка» с амплитудами от 5 до 10 м и с системой азимутов $\sim 30^\circ$ и $\sim 290^\circ$, близкой к взаимно перпендикулярной. Эти примеры показывают, что терригенная толща, в которую происходило внедрение магматических тел, обладает сложной системой тектонических нарушений. Она могла быть сформирована в условиях геодинамического режима (возможно, с переменной интенсивностью), при котором формируется парагенез тектонических нарушений, имеющих несколько направлений разрывов. Таким режимом может быть транспрессия.

На рисунке 4 представлен образец данных рельефа дна с аномалиями типа «силл» и «дайка».

В юго-восточной части карты (см. рис. 4-1) в восточном борту трога Франц-Виктория наблюдается сдвоенный уступ с азимутом 335° и перепадами от кровли до подножия 21 и 23 м. В сонарной записи этот объект представлен интенсивным рассеиванием, отличным от фонового. Данный объект интерпретируется как пачка «силлов», обнажившихся в борту трога в результате экзарационной деятельности. Отметим, что этот объект в днище трога имеет сопряженные субперпендикулярные уступы амплитудой 5-7 м и азимутом 275° . В северо-западной части карты (см. рис. 4-2) наблюдаются изолированные объекты типа «дайка» со средним размером 350-400 м и перепадом высот 25-30 м.

Выявленные особенности рельефа дна линейной формы (не являющиеся бороздами выпихивания) имеют ориентацию, соответствующую четырем направлениям: субмеридиальному, субширотному, северо-западному и северо-восточному. Эта упорядоченность азимутов объектов дна согласуется с показателями ориентации осей сжатия, установленных в пределах архипелага Земля Франца-Иосифа [5], особенно в его северо-западной части, называемой Александровской структурно-формационной зоной. Район работ, где были выявлены объекты типа «дайка», является юго-западным продолжением этой зоны. Наличие трещиноватости с азимутальным распределением отмеченного выше

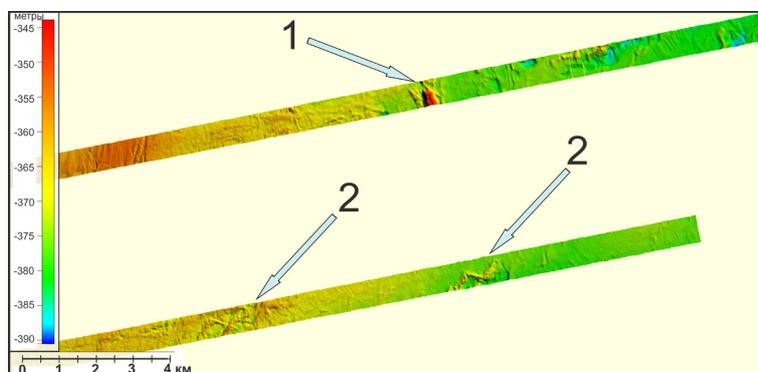


Рис. 3. Образец детальной карты рельефа дна, построенной по данным многолучевого эхолота и содержащей аномалии типа «дайка». Положение карты показано на рисунке 1. 1 – аномалия типа «дайка»; 2 – перекрещенные аномалии типа «дайка»

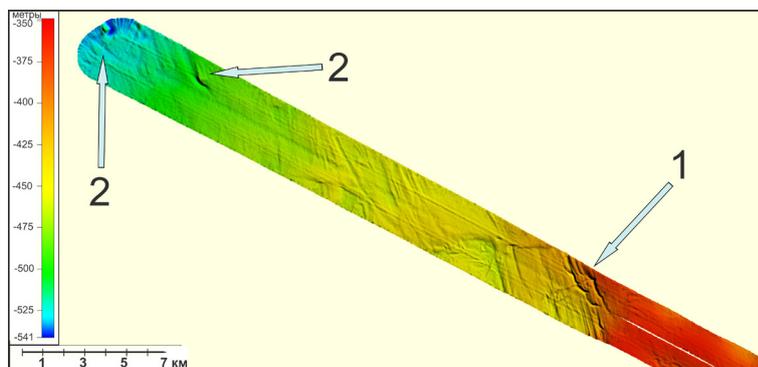


Рис. 4. Образец детальной карты рельефа дна, построенной по данным многолучевого эхолота и содержащей аномалии типа «силл» и «дайка». Положение карты показано на рисунке 1. 1 – аномалия типа «силл»; 2 – аномалии типа «дайка»

вида также указывает на геодинамический режим с переменным направлением главных осей напряжений и, возможно, переменной интенсивностью. Разнообразие ориентации тектонических нарушений может указывать на наличие сдвиговой компоненты.

Сопоставление с аномальным магнитным полем
Процесс тектонической эволюции литосферы в зонах рифтогенеза сопровождается формированием эффективного магнитоактивного слоя, который представляет собой интегральный результат по множеству отдельных магматических тел (дайки, силлы) или по сплошным базальтовым покровам различной мощности. Рассмотрим сопоставление данных об аномалиях рельефа типа «дайка» с картой АМП (рис. 5), построенной по данным [1]. В случае недоразвитого вторичного спредингового центра [2] структура АМП содержит четко выраженную осевую аномалию (см. рис. 5-4), в данном случае отрицательную. Положительные аномалии с обеих сторон от осевой имеют признаки линейности, которые позволяют на юго-западном фланге вторичного центра выделить до 5 магнитных аномалий. Спрединговый конвейер после непродолжительного функционирования в валанжине-барреме (нижний мел) [2] остановился. Судя по положительной форме наиболее древних линейных аномалий, не содержащих промежуточных минимумов, продуктивность магматизма в начале рифтогенеза была высокой. Это привело к перекрытию магматических тел разных линейных зон.

Структура АМП такова, что к северу от Земли Александры наблюдается линеамент северо-восточной ориентации, фрагментирующий АМП. Параллельно ему на юге наблюдаются повторяющиеся трогги в пределах архипелага в виде глубоких проливов (Кембридж, Найтингейл) с глубинами

до 500 м (см. рис. 1). Подобная фрагментация, на наш взгляд, указывает на наличие трансформной разломной зоны (см. рис. 5-5) в передовой части развивающегося вглубь континента рифтового сегмента. Формирование трансформного разлома должно возникать с необходимостью при условии ограниченности длины вторичного спредингового центра структурным барьером. Аналогом такого трансформного разлома является сдвиг Гренландии и острова Элсмир в передовой части рифтовой системы моря Лабрадор. Собственно архипелаг Земля Франца-Иосифа является конечной зоной, далее которой вторичный спрединговый сегмент не продвигался.

Выявленные в результате съемки аномалии типа «дайка» практически полностью расположены к югу от предполагаемого разлома (см. рис. 5). Там же расположен обширный малоамплитудный максимум АМП, отделенный разломом от области с однородным околонулевым полем. Поскольку на разрезах ОГТ [3] в области этого максимума и южнее его наблюдается повышенная плотность магматических интрузивных тел, полагаем, что структура АМП в этой области определяется именно ими. Другими словами, несмотря на ограниченное продвижение вторичного спредингового центра на юг до $\sim 80^\circ$ с.ш., проявления юрско-мелового магматизма связаны с мантийным источником на существенно большей территории Баренцева моря, в том числе на юго-запад от архипелага Земля Франца-Иосифа. В районе работ (см.рис.1) вскрытыми и доступными для картирования акустическими методами эти тела оказались в основном в устьевой части трога Франц-Виктория.

Распределение известных донных объектов

На рисунке 6 показано распределение донных объ-

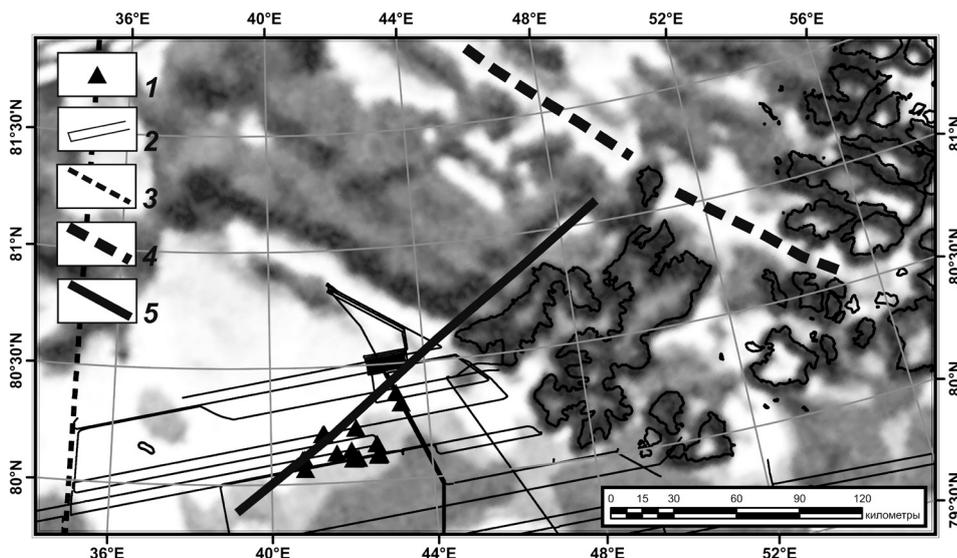


Рис. 5. Карта аномального магнитного поля (АМП) по данным [1] (темно серый соответствует положительным значениям, белый – отрицательным), схема работ 25-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (Геологический институт РАН, 2007) и элементы интерпретации. 1 – аномалии рельефа дна типа «дайка»; 2 – маршрут экспедиции; 3 – государственная граница 2011 года; 4 – ось палеоспрединга; 5 – предполагаемый трансформный разлом

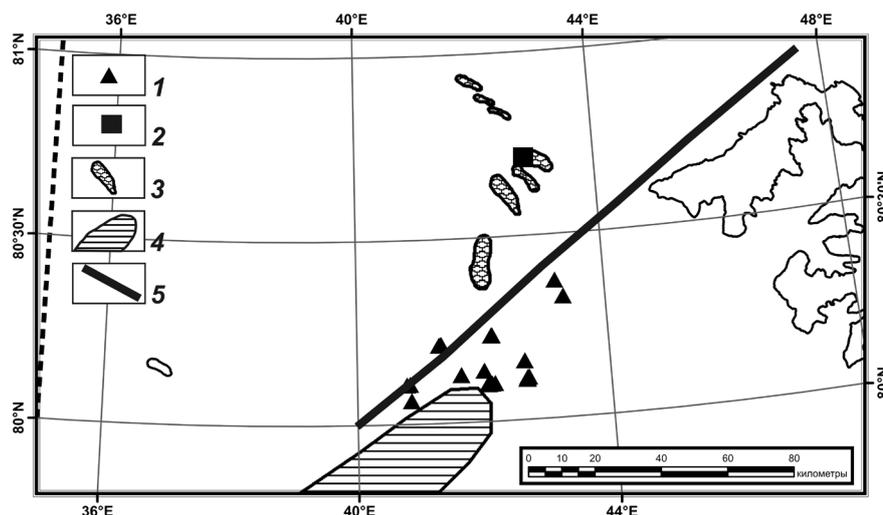


Рис. 6. Сводная карта аномальных элементов картирования дна акватории к западу от архипелага Земля Франца-Иосифа.

1 – аномалии рельефа дна типа «дайка»; 2 – аномалии рельефа дна типа «силл»; 3 – отпрепарированные подводные выступы [6]; 4 – вал Виктории; 5 – предполагаемый трансформный разлом.

ектов, интерпретация происхождения которых может быть сведена к магматическим процессам. К югу от предполагаемой разломной зоны в основном расположены аномалии типа «дайка». Это положение имеет структурную привязку (см. рис. 6-4) к валу Виктории, который в сейсмической записи [3] имеет, по мнению авторов данной работы, форму, сходную с положительной «цветочной» структурой. Такие формы записи возникают при транспрессионном геодинамическом режиме, что указывает на наличие сдвига со сжатием по направлению, перпендикулярному оси палеоспредиинга. Наличие этого режима вполне логично при возникновении недоразвитого спредингового центра и остановке его проградации на юг около непреодолимого барьера. Кроме того, локальное поднятие по валу Виктории может быть механизмом подъема интрузивных тел, расположенных на разрезе в интервале глубин 700-4000 м ближе к поверхности, где они подверглись препарированию.

К северу от предполагаемой разломной зоны, по данным [6] (см. рис.6-3), расположены отпрепарированные выступы и дайки мелового возраста. Проход через один из этих выступов маршрутом 25-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» показал наличие обнаженной в борту аномалии типа «силл» (см. рис. 4) и подтвердил его положение на карте [6]. Таким образом, на настоящий момент изученности картина распределения обнажений магматических тел на дне – по нашим и опубликованным данным – в районе исследований выглядит, как несимметричное относительно предполагаемого разлома облако объектов и, возможно, их типов (дайки на юге, силлы на севере). Тем не менее, если исходить из карты рельефа дна (см. рис. 1), данная асимметрия может отражать в большей степени экзарационную деятельность ледников, чем развитие трещиноватости при рифтогенном разрушении литосферы. Но необходимо отметить, что к северу и югу от предпо-

лагаемого разлома наблюдается привязка объектов к АМП с разным рисунком: на юге к малоамплитудному обширному максимуму, на севере к краевым частям АМП недоразвитого спрединга.

Выводы

1. По результатам 25-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (Геологический институт РАН, 2007), к юго-западу от архипелага Земля Франца-Иосифа откартирована 21 аномалия рельефа дна типа «дайка» и «силл». Большинство аномалий расположено в пределах изобаты 350 м и глубже в устье трога Франц-Виктория, что указывает на ледниковую экзарационную деятельность, приведшую к препарированию и обнажению магматических тел в рельефе дна.

2. Аномалии рельефа имеют широкий набор азимутов: субмеридиональный, субширотный, северо-восточный и северо-западный. Подобное разнообразие трещин, по которым шел процесс внедрения магматических тел, могло быть сформировано в условиях геодинамического режима с переменной интенсивностью и направлением главных осей напряжений. Имеющийся парагенез тектонических нарушений мог сформироваться при геодинамическом режиме транспрессии.

3. Фрагментация АМП района такова, что к северу от архипелага Земля Франца-Иосифа по смещениям аномалий выделяется предполагаемый трансформный разлом. Аномалии рельефа дна в основном сгруппированы по типу относительно него: дайки к югу от разлома, силлы к северу от него.

4. Выявленные донные аномалии являются дополнительной фактурой, подтверждающей широкое распространение интрузивного магматизма за пределами архипелага.

5. К югу от разлома расположен вал Виктории, который вместе с отпрепарированными на его

северо-восточном продолжении выступами магматических тел образует зону, сформированную в условиях транспрессии, что вполне логично для недоразвитой спрединговой системы, прекратившей распространение на юг из-за невозможности преодолеть структурный барьер.

Авторы благодарны экипажу НИС «Академик Николай Страхов» за самоотверженную работу в тяжелых условиях крайнего севера, в которых был получен использованный в статье материал.

Работа выполнена в рамках темы «Оценка связи рельефа дна Атлантического и запада Северного

Ледовитого океанов, деформаций осадочного чехла, процессов дегазации и опасных геологических явлений с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии» (государственная регистрация № 01201459183), а также при поддержке грантов РФФИ 15-05-05888, 16-35-00596 и 16-35-00591 мол_а, программ Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» (П.ЗП) и «Мировой океан – многомасштабность, многофазность, многопараметричность» (ЗП).

Список литературы

1. Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Минаков А.Н., Меркурьев С.А., Чилдерс В.А., Брозина Д.М. История формирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана по результатам геосторического анализа аномального магнитного поля // Геотектоника. 2006. №4. С.21-42
2. Шипилов Э.В., Карякин Ю.В. Дайки острова Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа): тектоническая позиция и геодинамическая интерпретация // ДАН. 2014. т. 457. №3. с.327-331.
3. Павлов С.П., Шлыкова В.В., Величко Б.М., Васильев В.В. Геологическое строение северной части Баренцева моря // Разведка и охрана недр. 2014. №4. С.18-23
4. Solheim A., Musatov E., Heintz N. Geological aspects of Franz Josef Land and the northernmost Barentz Sea // Meddelelser N.151. Oslo: Norsk Polarinstitut, 1998. 120 p.
5. Трегуб А.И., Карякин Ю.М., Кашкаров Н.Н. Поля напряжений архипелага Земля Франца Иосифа по морфоструктурным данным // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы. Материалы XVI Междунар. конф. 20-24 сент. 2010. Воронеж. Т. 2. С. 267-270
6. Качурина Н.В., Дымов В.А. Геоморфологическая карта // Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Лист U-37-40. СПб.: ФГУНПП ПМГРЭ, 2004.

Bibliography

1. Glebovskii V.Yu., Kaminskii V.D., Minakov A.N., Merkur'ev S.A., Childers V.A., Brozina D.M. Istoriya formirovaniya Evraziiskogo basseina Severnogo Ledovitogo okeana po rezul'tatam geoistoricheskogo analiza anomal'nogo magnitnogo polya // Geotektonika. 2006. №4. S.21-42
2. Shipilov E.V., Karyakin Yu. V. Daiki ostrova Heisa (arhipelag Zemlya Frantsa-Iosifa): tektonicheskaya pozitsiya i geodinamicheskaya interpretatsiya // DAN. 2014. t. 457. №3. s.327-331.
3. Pavlov S.P., Shlykova V.V., Velichko B.M., Vasil'ev V.V. Geologicheskoe stroenie severnoi chasti Barentseva morya // Razvedka i ohrana neдр. 2014. №4. S.18-23
4. Solheim A., Musatov E., Heintz N. Geological aspects of Franz Josef Land and the northernmost Barentz Sea // Meddelelser N.151. Oslo: Norsk Polarinstitut, 1998. 120 p.
5. Tregub A.I., Karyakin Yu.M., Kashkarov N.N. Polya napryazhenii arhipelaga Zemlya Frantsa Iosifa po morfostrukturnym dannym // Struktura, svoitva, dinamika i minerageniya litosfery Vostochno-Europeiskoi platformy. Materialy XVI Mezhdunar. konf. 20-24 sent. 2010. Voronezh. T. 2. S. 267-270
6. Kachurina N.V., Dymov V.A. Geomorfologicheskaya karta // Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii. Mashtab 1:1000000. List U-37-40. SPb.: FGUNPP PMGRE, 2004.