

УДК 550.34.09

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ ГРЕНЛАНДСКО-ИСЛАНДСКО-ФАРЕРСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА СПУТНИКЕ CHAMP

© 2019 г. Д.Ю. Абрамова¹, Л.М. Абрамова², Ив.М. Варенцов², С.В. Филиппов¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
г. Москва, г. Троицк, Россия

² Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта,
г. Москва, г. Троицк, Россия

Анализируется распределение поля региональных литосферных магнитных аномалий над территорией Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса, являющегося частью Северо-Атлантической магматической провинции, одной из крупнейших магматических провинций в мире. Данные получены по измерениям геомагнитного поля, выполненным в последний год работы низколетящего спутника *CHAMP* (Германия), когда высота его полета существенно снизилась. Для выделения части, связанной с полем литосферных магнитных аномалий, разработана специальная оригинальная технология вычленения из общего объема записей спутника *CHAMP* долей поля, определяемых наличием глубинных источников региональных аномалий. Создана база экспериментальных данных модуля полного вектора индукции T_a аномального литосферного магнитного поля на спутниковой высоте. Построены разномасштабные карты аномального литосферного магнитного поля на высоте 280 км над Гренландско-Исландско-Фарерским вулканическим комплексом. При их построении использованы различные виды медианного осреднения по блокам размером 80×80 км и 10×10 км средствами *GMT*.

Обсуждаются связи выявленных литосферных магнитных аномалий со структурами изучаемой магматической провинции и с активными тектоническими процессами, протекающими в ней по настоящее время. Обширная область отрицательных значений аномального магнитного поля, наблюдаемая на высоте 280 км, отражает суперпозицию процессов спрединга Срединно-Атлантического хребта и магматической деятельности, которые протекают в этой зоне не только непосредственно вдоль оси хребта, но и по его периферийным ответвлениям. Прослеженные положительные магнитные аномалии, по-видимому, фиксируют наличие отдельных фрагментов древней континентальной коры, погруженных под мощные структуры базальтового основания.

Построенные по данным спутника *CHAMP* карты аномалий магнитного поля T_a на высоте 280 км над территорией Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса хорошо согласуются с представлениями об активных тектонических процессах, протекающих в исследуемой области.

Ключевые слова: спутниковые измерения, литосферные магнитные аномалии, Гренландско-Исландско-Фарерский вулканический комплекс, спрединг, мантийный плюм, древняя континентальная кора.

Введение

Цель представляемого в статье исследования – изучение связей аномалий литосферного магнитного поля с тектоническими процессами и геологическими структурами в районах Гренландско-Исландского хребта (*GIR*) и Исландско-Фарерского хребта (*IFR*). Эти хребты и плато объединены в комплекс, называемый Гренландско-

Исландско-Фарерским вулканическим комплексом (*GIRF*), который представляет собой часть Северо-Атлантической магматической провинции (*NAIP*), одной из крупнейших магматических провинций в мире [Saunders et al., 1997; Hjartarson et al., 2017].

Поскольку результаты большинства исследований в рассматриваемом регионе опубликованы в англоязычных изданиях, в своей статье мы будем использовать принятые в них аббревиатуры для обозначения названий рассматриваемых объектов. Расшифровка используемых сокращений приведена ниже в таблице.

Используемые в статье сокращенные названия исследуемых объектов

<i>GIRF</i>	Гренландско-Исландско-Фарерский вулканический комплекс
<i>GIR</i>	Гренландско-Исландский хребет
<i>IFR</i>	Исландско-Фарерский хребет
<i>NAIP</i>	Северо-Атлантическая магматическая провинция
<i>JMMC</i>	Микроконтинент Ян-Майен
<i>KR</i>	Срединно-океанический хребет Колбейнсей
<i>FB</i>	Фарерский бассейн
<i>AER</i>	Срединно-океанический хребет Егир
<i>GG</i>	Грабен Гридар
<i>PL</i>	Современное положение Исландского плюма

Названный регион был выбран нами в качестве одного из первых этапов приложения спутниковых магнитных данных к исследованиям Арктики. Этот выбор связан с тем, что в мировой литературе для провинции *NAIP* имелся достаточно большой объем геолого-геофизической информации, который в последние десятилетия увеличивался быстрыми темпами.

Потребность в научных исследованиях выбранного региона продиктована происходящими в нем сильными климатическими изменениями и проблемами разграничения экономических зон [Конторович и др., 2010]. Международные усилия способствуют проведению региональных геолого-геофизических наблюдений, накоплению всё большего объема данных, классификации результатов исследований прежних лет [Bijwaard et al., 1999; Dahl-Jensen et al., 2003; Alvey et al., 2008; Коротаев и др., 2010; Артюшков, 2010; Яковлев и др., 2012]. Новейшие исследования показали, что арктическая литосфера имеет существенно более сложную структуру, чем считалось ранее.

Магнитная съемка, осуществляемая низколетящими околоземными спутниками, в частности, спутником *CHAMP* (Германия), – один из наиболее дешевых и доступных геофизических методов, что, несомненно, актуально при изучении таких труднодоступных областей земного шара, как Арктика. Пространственное покрытие территории магнитными данными даже одного дня наблюдений спутника *CHAMP* больше, чем у всей мировой сети обсерваторий. Параметры, измеряемые спутниками в течение нескольких месяцев, а тем более, нескольких лет, обеспечивают беспрецедентный глобальный равномерный охват земной поверхности, что делает их привлекательными и перспективными для анализа.

Использование компонент аномального магнитного поля, полученных при измерениях на спутнике *CHAMP*, в комплексе с другими геофизическими методами открывает дополнительные перспективы для изучения региональной тектоники и глубинного картирования неоднородностей литосферы Арктики.

В последние десятилетия большой интерес вызывает применение данных спутниковых наблюдений для изучения крупномасштабных, имеющих протяженность в сотни километров литосферных магнитных аномалий [Hemant, Maus, Haak, 2005].

Аномалии магнитного поля континентальной литосферы сконцентрированы в так называемом магнитоактивном слое, т.е. в той части литосферы, где сосредоточены их источники. Магнитное поле индуцируется магнитными минералами в коре и верхней мантии, что может быть использовано как маркер для определения структуры и состава коры [Печерский, Геншафт, 2001; Hemant, Maus, 2005].

Аномальное магнитное поле отражает современное положение тектонических структур и их физические свойства, в связи с чем может использоваться для установления различий типов коры и выделения зон тектонической активизации, например, таких как Северо-Атлантическая магматическая провинция Арктики, расположенная в северной части акватории Атлантического океана в области его перехода к Северному Ледовитому океану.

В разные годы долгой “жизни” спутника *CHAMP* высота его орбиты менялась от 480 км до 250 км, благодаря чему теперь у нас есть возможность применять градиентные данные для исследования затухания магнитного поля с высотой.

Развиваемые нами технологии выделения “литосферной” части измеряемого спутниковыми магнитометрами суммарного магнитного поля позволяют использовать эти данные для определения положения региональных магнитных аномалий, обусловленных намагниченностью слоев земной литосферы [Абрамова и др., 2014, 2015, 2017].

Методика обработки данных

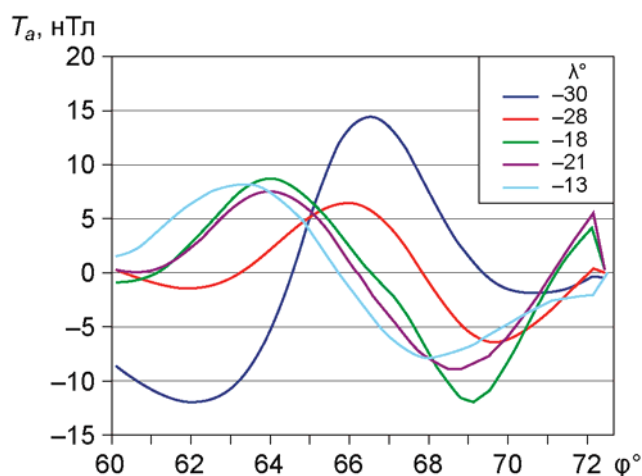
Измеренное на спутнике геомагнитное поле представляет собой сумму вкладов нескольких источников, которые являются внешними и внутренними по отношению к поверхности Земли.

Технология выделения параметров литосферного магнитного поля подробно описана в ряде публикаций, в том числе в четвертом номере журнала “Геофизические исследования” за прошлый год [Абрамова и др., 2018]. Следует особо отметить, что выполняемое для решения задач фундаментальной геологии и геофизики выделение компонент магнитного поля литосферы в высоких широтах имеет серьезные ограничения. Это связано с проведением наблюдений в пределах сложного и динамичного ионосферного источника поля – ионосферных токовых систем.

Пример выделенных аномалий для отдельных витков спутника *CHAMP* над исследуемой территорией показан на рис. 1.

Рис. 1. Изменения аномального литосферного магнитного поля T_a вдоль витков спутника *CHAMP* над Северо-Атлантической магматической провинцией (NAIP) при разных значениях долготы (λ°)

Fig. 1. Changes of the anomalous lithospheric magnetic field T_a along the pass of the CHAMP satellite above the North Atlantic igneous province (NAIP) at different longitudes (λ°)



В процессе обработки значительное количество спутниковых данных отбраковывается с учетом среднеквадратичных отклонений от соседних витков, что существенно обедняет объем использованного материала. Для исследуемой территории приблизительно 30 % данных спутника *CHAMP* было потеряно ввиду низкого значения отношения “сигнал/шум” и присутствия магнитосферных помех. Всего для построения карт в базе данных было использовано около 3 тыс. измерений.

Тектоническое строение Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса

Северо-Атлантическая магматическая провинция сформировалась в результате спрединговых и магматических процессов в северной части акватории Атлантического океана и в области его перехода к Северному Ледовитому океану. Она начала формироваться 60–63 млн. лет назад на фазе первоначального раскрытия Северо-Восточной Атлантики, когда Исландский мантийный плюм достиг уровня нижней коры под Центральной Гренландией. Это вызвало начало проявления интенсивного вулканизма на территории Восточной и Западной Гренландии, а также на Фарерских и Британских островах [Morgan, 1971; Brooks, 1973; White, McKenzie, 1989].

Фаза спрединга северной части Атлантики проходила в период позднего палеоцена (57–55 млн. лет); по всей территории формировались магматические поля, что продолжалось вплоть до окончательного раскрытия североатлантической рифтовой системы вдоль структурно слабых участков земной коры [Gaina, Gernigon, Ball, 2009].

Эта часть Северо-Восточной Атлантики перекрыта обширными лавовыми потоками, так называемыми базальтовыми плато [Larsen, Watt, 1985; Sogger, Holm, 2009]. В раннем эоцене (55–54 млн. лет) литосфера окончательно разрушилась, что привело к началу спрединга морского дна в Северо-Восточной Атлантике.

При определении границ Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса одним из решающих признаков была значительная мощность коры [Haase, Ebbing, Funck, 2016]. Аномально толстая кора является здесь результатом взаимодействия между собой двух систем: срединно-океанических рифтов и плюмов Исландия–Ян-Майен [Rickers, Fichtne, Trampert, 2013; Funck, Hopper, 2014]. Сейсмические исследования показывают, что в рассматриваемом регионе мощность коры, по крайней мере, в 3–4 раза превышает обычно наблюдаемые средние мощности океанической коры и простирается на ~1150 км через центр Северо-Восточной Атлантики между центральной частью восточной Гренландии и границей Евразии (рис. 2). Участок с самой мощной (более 40 км) корой на территории *GIFRC* находится в центральной части Исландии, расположенной непосредственно над мантийным плюмом. Здесь происходит постоянное активное приращение первоначальной коры материалом, поступающим из мантии через зону расплава [Darbyshire et al., 2000; Allen et al., 2002; Funck et al., 2014; Артюшков, 2010].

Томографические исследования [Allen et al., 2002] выявили наличие обширной подпитывающей плюмы системы, которая подает мантийный расплав в верхние магматические камеры, расположенные в коре. Показано, что низкоскоростная аномалия в коре Исландии представляет собой сейсмический образ неоднородностей исследуемой области системы плюма.

Западная граница комплекса *GIFRC* соответствует границе “континент–океан”, протягивающейся вдоль центральной части Восточной Гренландии; восточная его граница соответствует границе “континент–океан” к западу от Фарерских островов.

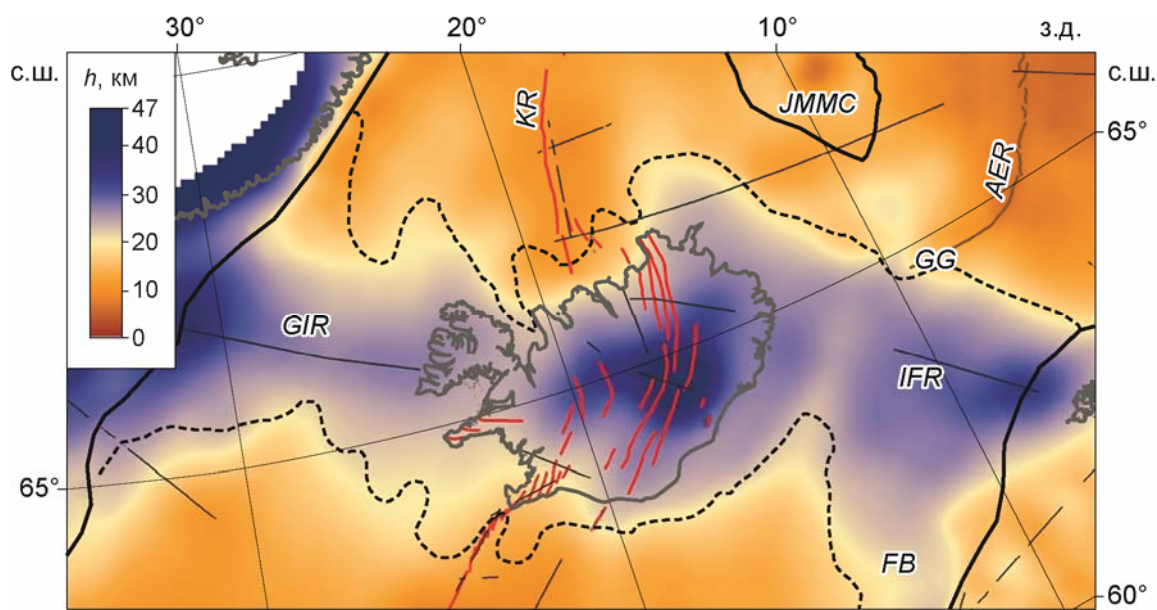


Рис. 2. Карта мощности коры комплекса *GIFRC* (по [Funck et al., 2014], шкала h , км слева). Штриховая черная линия – граница комплекса *GIFRC*, сплошная черная – граница “континент–океан”, красные линии – вулканические зоны на территории Исландии. Тонкие черные отрезки прямых – линии, вдоль которых получены сейсмические данные, использованные при построении карты поверхности Мохо. Расшифровку аббревиатур см. в таблице

Fig. 2. Crustal thickness map of the *GIFRC* complex (according to [Funck et al., 2014], scale h , km on the left). The dashed black line is the boundary of the *GIFRC* complex, the solid black line is the “continent–ocean” border, and the red lines are the volcanic zones in Iceland. The thin black lines show the locations of the seismically constrained Moho (SCM) points from seismic refraction data. Transcript of abbreviations, see Table

На территории комплекса *GIFRC* наблюдается значительная неоднородность глубины моря, морфологии морского дна, мощности земной коры, гравитационных, палеомагнитных, геохимических и петрологических характеристик при одновременно продолжающемся влиянии современного мантийного плюма [Fitton et al., 1997; Thirlwall et al., 2004; Thordarson, Larsen, 2007].

Остров Гренландия, соседствующий с комплексом *GIFRC*, представляет собой участок прочной континентальной литосферы докембрийского возраста. Он состоит из двух архейских блоков, разделенных подвижными поясами протерозойского возраста [Henriksen et al., 2000].

Магнитные аномалии Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса

В данной работе анализируются магнитные аномалии, полученные по данным наблюдений спутника *CHAMP* в последние месяцы 2010 г., когда понизившаяся до 280 км альтитуа орбит позволяла регистрировать повышенные примерно в 2–3 раза величины амплитуд аномального магнитного поля.

Для анализа распределения аномалий на исследуемой территории были выделены и обработаны данные параметров модуля полного вектора индукции аномального геомагнитного поля T_a , покрывающие сектор 60° – 0° з.д. и 55° – 75° с.ш.

Построенная по данным спутника *CHAMP* карта аномалий T_a над *NAIP* на высоте 280 км приведена на рис. 3. При построении карты использовано медианное осреднение по блокам размером 80×80 км средствами *GMT*.

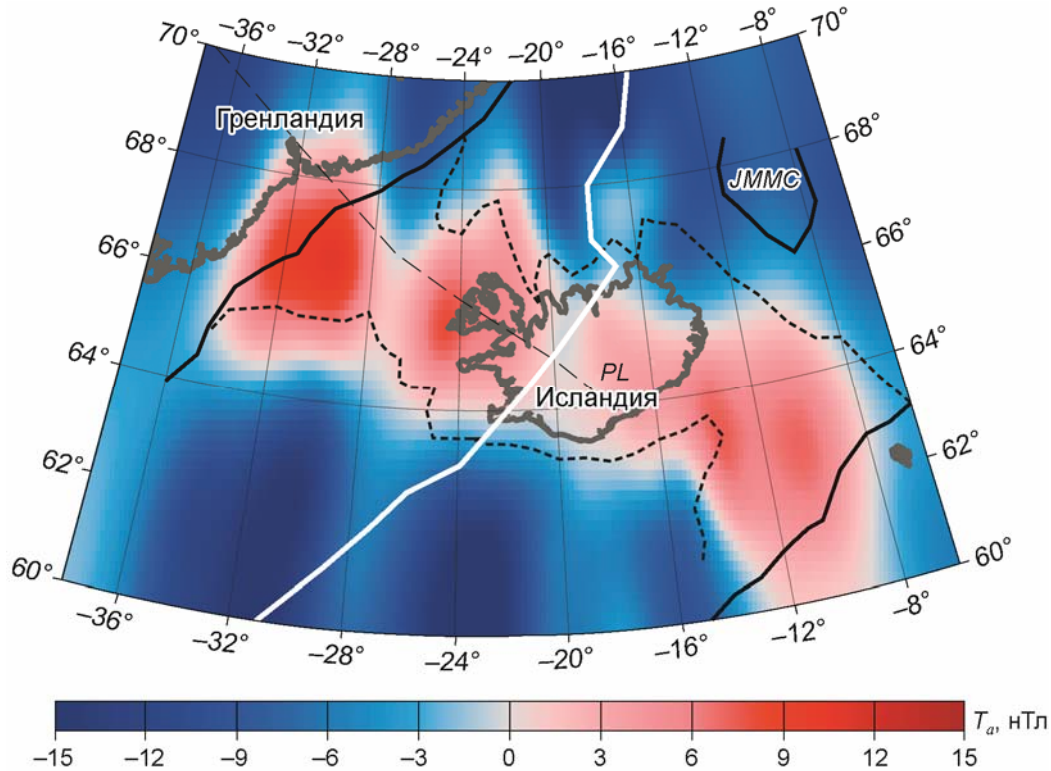


Рис. 3. Карта аномального литосферного поля T_a на высоте 280 км над территорией Северо-Атлантической магматической провинции. Сплошная белая линия – положение Срединно-Атлантического хребта, тонкая штриховая – предполагаемая траектория прохождения Исландского плюма. Остальные обозначения см. на рис. 2

Fig. 3. Map of the anomalous lithospheric field T_a at an altitude of 280 km above the North Atlantic igneous province (NAIP). The white solid line is the position of the Mid-Atlantic ridge, the thin dashed line indicates the assumed trajectory of the Iceland plume. See the remaining of the notations in Fig. 2

Можно видеть, что аномальное магнитное поле над входящей в зону спрединга Северной Атлантикой имеет существенно пониженный уровень практически вдоль всего протяжения Срединно-Атлантического хребта, положение оси которого на карте показано сплошной белой линией.

Вся обширная область отрицательных значений T_a занимает территорию, связанную со спредингом Срединно-Атлантического хребта и магматическими процессами, обусловленными деятельностью мантийных плюмов.

В Северной Атлантике четко прослеживается интенсивная низкоскоростная аномалия под Норвежско-Гренландским бассейном, которая, по-видимому, отражает активные процессы спрединга, протекающие в этой зоне по периферийным ответвлениям, а не только непосредственно вдоль оси Срединно-Атлантического хребта [Яковлев и др., 2012]. Весьма схожие сейсмические результаты для этой территории получены при глобальных и региональных томографических исследованиях, проведенных другими авторами (см., например, [Bijwaard, Spakman, 1999; Rickers, Fichtne, Trampert, 2013]).

Отмеченное, несомненно, объясняет низкий уровень литосферного аномального магнитного поля в океанической части (см. рис. 3). Активные процессы разогрева астеносферы поднимают по глубине уровень, на котором достигается температура Кюри для ферромагнитных минералов, что ведет к сокращению мощности намагниченных слоев в литосфере.

От восточного края центральной части Гренландии и до шельфа Фарерских островов через середину обширной области отрицательного аномального поля проходит пояс изометрических положительных аномалий. Природа этих положительных литосферных магнитных аномалий на территории комплекса *GIRF*, где происходят явления, связанные с мощной тектонической активизацией, возможно, состоит в том, что, как полагают авторы работы [Allen et al., 2002; Foulger, Anderson, 2005], отдельные микроплиты разрушавшейся древней коры в процессе рифтинга погружались под активные области.

К юго-востоку от Исландии практически до шельфа Фарерских островов на уровне наблюдения 280 км фиксируется положительная аномалия *IF* с амплитудой ~ 7 нТл, магнитное поле которой весьма неоднородно. Эта аномалия показана на рис. 4 в более крупном масштабе. При построении приведенного планшета (карты) использовалось медианное осреднение по блокам размером 10×10 км средствами *GMT*.

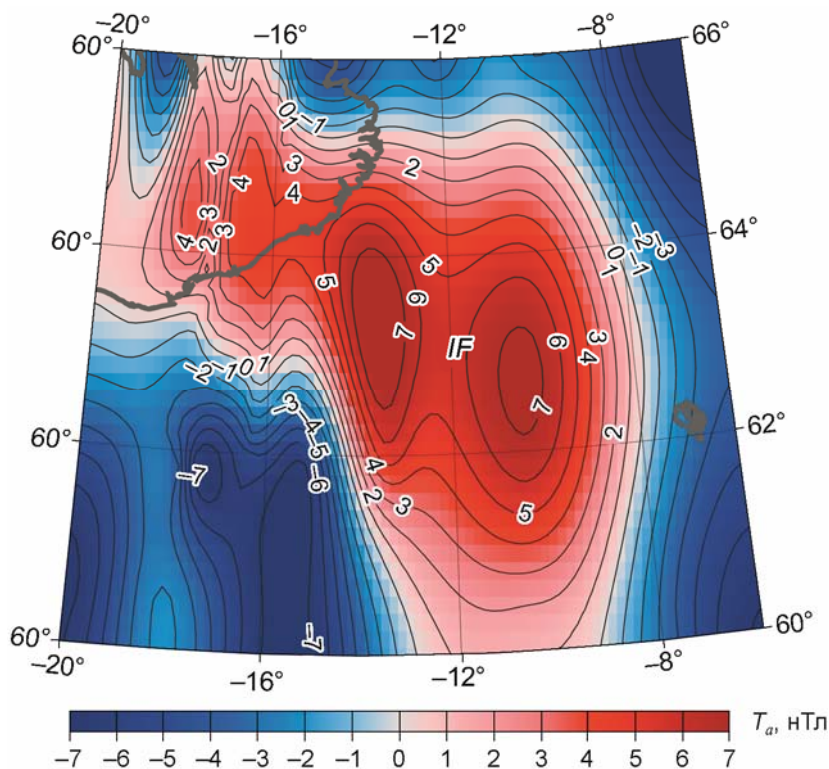


Рис. 4. Положительные магнитные аномалии литосферного поля T_a на высоте 280 км над областью Исландия–Фарерские о-ва (*IF*). Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 4. Positive magnetic anomalies of the lithospheric field T_a at an altitude of 280 km above the Iceland–Faroe Islands (*IF*) region. See notations in Fig. 2

Карта положительных литосферных аномалий, расположенных между восточным краем Гренландии и западной частью Исландии, представлена на рис. 5. На этой карте, построенной при меньшем осреднении, выделенные аномалии имеют изометричную форму и выглядят аналогично аномалиям на рис. 4. Амплитуда в центре одной из аномалий (западной) составляет около 10 нТл, в центре другой (восточной) – 9 нТл.

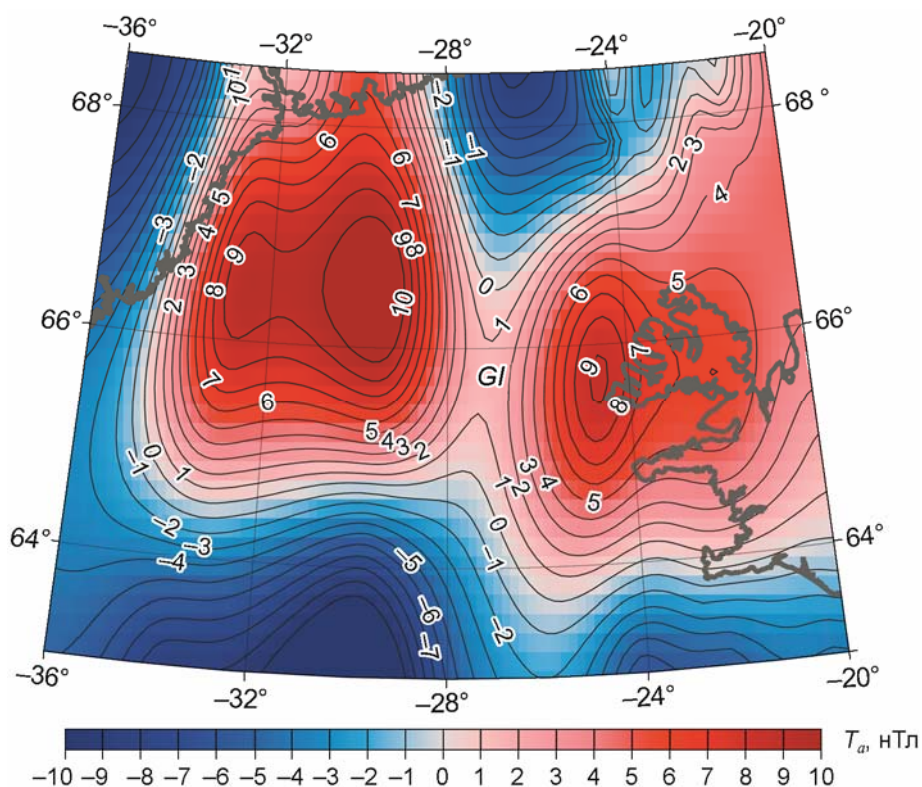


Рис. 5. Положительные магнитные аномалии литосферного поля T_a на высоте 280 км над областью Гренландия–Исландия (GI)

Fig. 5. Positive magnetic anomalies of the lithospheric field T_a at an altitude of 280 km above the Greenland–Iceland region (GI)

На границах аномалий наблюдаются большие градиенты аномального магнитного поля, что, по-видимому, обусловлено наличием вокруг погруженных микроплит поясов торшения и дробления отдельных блоков земной коры. Последнее характерно для магнитных аномалий микроконтинентов в зонах тектонической активизации [Абрамова, Абрамова, 2014].

В разные годы [Bodvarsson, Walker, 1964; Hjartarson, Sæmundsson, 2014] на субширотном профиле, проходящем от континентального склона Гренландии через Гренландско-Исландский хребет, о. Исландия и Исландско-Фарерский хребет, проводились обширные сейсмические и геологические исследования. В результате обобщения материалов этих исследований получены данные, которые служат аргументами в пользу существования на изучаемой территории погруженных микроплит древней континентальной коры. Как и ожидалось, данные сейсмических наблюдений, проведенных над *IFR*, позволили обнаружить присутствие мощного слоя базальтового основания и лав. Кроме того, под Фарерским шельфом была выявлена структура, имеющая форму купола – по мнению авторов работы [Hjartarson, Sæmundsson, 2014], она может быть интерпретирована как кристаллическое основание. Положительная магнитная аномалия *IF* (см. рис. 4), по-видимому, является отражением более обширной глубинной области – погруженного микроконтинента.

Геохимические исследования, представленные в [Torsvik et al., 2015], также свидетельствуют о наличии отдельных фрагментов континентальной коры под вулканическими породами в области юго-восточного побережья Исландии.

Таким образом, достаточно уверенно можно говорить, что положительная магнитная аномалия IF (см. рис. 4) является образом микроблока континентальной коры, разрушенной действием мантийного Исландского плюма.

Две аномалии магнитного поля GI (см. рис. 5) также с большой вероятностью свидетельствуют о наличии между Гренландией и Исландией погруженных микроконтинентов, представляющих собой остатки древней континентальной коры, разрушенной в более раннее время в процессе прохождения в этой области Исландского плюма.

Выводы

Построенные по данным спутника *CHAMP* карты аномалий модуля полного вектора индукции T_a литосферного магнитного поля на высоте 280 км над территорией Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса, являющегося частью Северо-Атлантической магматической провинции, отражают протекавшие в исследуемом регионе активные тектонические процессы и их последствия.

Обширная область отрицательных значений T_a покрывает площадь, связанную со спредингом Срединно-Атлантического хребта и деятельностью мантийных плюмов. Аномальное магнитное поле отражает суперпозицию процессов спрединга и магматической деятельности, протекающих в этой зоне, причем не только непосредственно вдоль оси Срединно-Атлантического хребта, но и по периферийным ответвлениям.

Фиксируемые крупные положительные магнитные аномалии IF и GI , по-видимому, связаны с существованием микроплит древней континентальной коры, которые в процессе прохождения Исландского плюма погрузились под структуры базальтового основания и лав.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам за вдумчивые и полезные отзывы.

Карты аномального магнитного поля по данным спутника *CHAMP* построены с использованием программы *GMT* [Wessel, Smith, 2007].

Литература

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М. Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (по измерениям спутника *CHAMP*) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. С.1081–1092.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В. Анализ аномалий литосферного магнитного поля в рамках геолого-геофизического исследования корово-мантийных структур Карпато-Балканского региона // Геофизика. 2017. № 2. С.71–78.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В. Роль спутниковых литосферных магнитных аномалий при анализе геолого-геофизических данных в Центрально-Азиатской коллизионной зоне // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов (Материалы VI международного симпозиума). Бишкек: ИС РАН, 2015. С.45–54.
- Артюшков Е.В. Континентальная кора на хребте Ломоносова, поднятии Менделеева и в котловине Макарова. Образование глубоководных впадин в неогене // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 11. С.1515–1530.
- Головков В.П., Зверева Т.И., Чернова Т.А. Метод создания пространственно-временной модели главного магнитного поля путем совместного использования методов сферического гармонического анализа и естественных ортогональных компонент // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 2. С.272–278.

- Конторович А.Э., Эпов М.И., Буриштейн Л.М., Каминский В.Д., Курчиков А.Р., Мальшев Н.А., Прищепина О.М., Сафронов А.Ф., Ступакова А.В., Супруненко О.И. Геология, ресурсы углеводородов шельфов Арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С.7–17.
- Коротаев С.М., Жданов М.С., Орехова Д.А., Кругляков М.С., Трофимов И.Л., Шнеер В.С., Щорс Ю.Г. Перспективы магнитотеллурических зондирований на некоторых крупных структурах Северного Ледовитого океана // Физика Земли. 2010. № 9. С.48–54.
- Печерский Д.М., Геншафт Ю.С. Петромагнетизм континентальной литосферы и природа региональных магнитных аномалий: обзор // Российский журнал наук о Земле. ИФЗ РАН. 2001. Т. 3, № 2. http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v03/rje01059/rje_1059.htm.
- Порохова Л.Н., Абрамова Д. Ю., Порохов Д.А. Модели электропроводности мантии, построенные методом эффективной линеаризации по глобальным наземным и спутниковым данным // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 34, № 5. С.137–146.
- Ротанова Н.М., Харитонов А.Л., Фрунзе А.Х., Филиппов С.В., Абрамова Д.Ю. Аномальные магнитные поля из измерений на спутнике CHAMP для территории Курской магнитной аномалии // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 5. С.712–719.
- Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. С.1261–1272.
- Abramova D.Yu., Abramova L.M. Morphology of the East Europe deep structure by results of magnetic field measurements from the CHAMP satellite // Bulgarian Geophysical Journal. 2009. V. 35. P.17–32.
- Allen R., Nolet G., Morgan W., Vogfjord K., Nettles M., Ekstrom G., Bergsson B., Erlendsson P., Foulger G., Jakobsdottir S., Julian B., Pritchard M., Ragnarsson S., Stefansson R. Plume-driven plumbing and crustal formation in Iceland // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. ESE 4-1–ESE 4-19, <https://doi.org/10.1029/2001JB000584>
- Alvey A., Gaina C., Kuszniir N.J., Torsvik T.H. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 27. P.310–321.
- Arkani-Hamed J., Langel R.A., Purucker M.E. Magnetic anomaly maps of Earth derived from POGO and Magsat data // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P.24075–24090.
- Bijwaard H., Spakman W. Tomographic evidence for a whole-mantle plume below Iceland // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 166. P.121–126.
- Bođvarsson G., Walker G.P.L. Crustal drift in Iceland // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1964. V. 8. P.285–300. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1964.tb06295.x>
- Brooks, C.K. Rifting and Doming in Southern East Greenland // Nature Physical Science. 1973. V. 244. P.3.
- Dahl-Jensen T., Larsen T.B., Woelbern I., Bach T., Hanka W., Kind R., Gregersen S., Mosegaard K., Voss P., Gudmundsson O. Depth to Moho in Greenland: Receiver-function analysis suggests two Prot erozoic blocks in Greenland // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 205. P.379–393.
- Fitton J.G., Saunders A.D., Norry M.J., Hardarson B.S., Taylor R.S. Thermal and chemical structure of the Iceland plume // Earth Planet. Sci. Lett. 1997. V. 153. P.197–208.
- Foulger G.R., Anderson D.L. A cool model for the Iceland hotspot // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2005. V. 141. P.1–22.
- Funck T., Hopper J.R. Crustal structure. Tectonostratigraphic Atlas of the North-East Atlantic Region // Geological Surv. of Denmark and Greenland (GEUS). Copenhagen, Denmark, 2014. P.69–128.
- Gaina C., Gernigon L., Ball P. Palaeocene–Recent plate boundaries in the NE Atlantic and the formation of the Jan Mayen microcontinent // Journal of the Geological Society. London. 2009. V. 166. P.601–616. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-112>
- Haase C., Ebbing J., Funck T. A 3D crustal model of the NE Atlantic based on seismic and gravity data // The NE Atlantic Region: A Reappraisal of Crustal Structure, Tectonostratigraphy and Magmatic Evolution / Eds. G. Peron-Pinvidic, J.R. Hopper, T. Stoker, C. Gaina, H. Doornebal,

- T. Funck, U. Arting. Geological Society, London, Special Publications. 2016. V. 447, N 12. <https://doi.org/10.1144/SP447.8/>
- Hemant K., Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P.1–23.
- Hemant K., Maus S., Haak V. Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // *Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit.* 2005. P.249–254.
- Henriksen N., Higgins A.K., Kalsbeek F., Pulvertaft T.C.R. Greenland from Archaean to Quaternary. Descriptive text to the Geological map of Greenland 1:2 500 000 // *Geology of Greenland Survey Bull.* 2000. N 185. 93 p.
- Hjartarson A., Erlendsson O., Blisghke A. The Greenland–Iceland–Faroe Ridge Complex. Geological Society London Special Publications. April 2017. 21 p.
- Hjartarson A., Sæmundsson K. Geological Map of Iceland. Bedrock. 1:600 000. Iceland Geo-Survey (I'SOR). 2014. Reykjavik, Iceland.
- Langel R.A., Hinze W.J. The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere: The Satellite Perspective. U.K. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998.
- Larsen L.M., Watt W.S. Episodic volcanism during break-up of the North Atlantic: evidence from the East Greenland plateau basalts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1985. V. 73. P.105–116, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90038-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90038-X)
- Morgan W.J. Convection plumes in the lower mantle // *Nature.* 1971. V. 230. P.42–43.
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30 (2). P.129–134.
- Rickers F., Fichtne A., Trampert J. The Iceland–JanMayen plume system and its impact on mantle dynamics in the North Atlantic region // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 367. P.39–51.
- Saunders A.D., Fitton J.G., Kerr A.C., Norry M.J., Kent R.W. The North Atlantic igneous province / Eds. J.J. Mahoney, M.F. Coffin. Large Igneous Provinces. American Geophysical Union, Geophysical Monograph. 1997. V. 100. P.45–93.
- Søager N., Holm P.M. Extended correlation of the Paleogene Faroe Islands and East Greenland plateau basalts // *Lithos.* 2009. V. 107. P.205–215. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.002>
- Thordarson T., Larsen G. Volcanism in Iceland in historical time: Volcano types, eruption styles and eruptive history // *Journal of Geodynamics.* 2007. V. 43. P.118–152.
- Torsvik T.H., Amundsen H.E.F. Continental crust beneath southeast Iceland // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2015. V. 112. P.1818–1827.
- White R., McKenzie D. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P.7685–7729.

Сведения об авторах

АБРАМОВА Дарья Юрьевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(926) 196-18-36. E-mail: abramova@izmiran.ru

АБРАМОВА Людмила Мамиконовна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(495) 851-09-06. E-mail: labramova@mail.igemi.troitsk.ru

ВАРЕНЦОВ Иван Михайлович – кандидат физико-математических наук, директор, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(495) 851-09-06. E-mail: ivan_varentsov@mail.ru

ФИЛИППОВ Сергей Витальевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(495) 851-02-95. E-mail: izmiran1@gmail.com

INVESTIGATION OF LITHOSPHERIC MAGNETIC ANOMALIES OF THE GREENLAND-ICELAND-FAROE RIDGE COMPLEX ON MEASUREMENTS OF THE CHAMP SATELLITE

D.Yu. Abramova¹, L.M. Abramova², Iv.M. Varentsov², S.V. Filippov¹

¹ *Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

² *Geoelectromagnetic Research Centre, Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

Abstract. The distribution of the field of regional lithospheric magnetic anomalies above the Greenland-Iceland-Faroe ridge complex (GIFRC) which is part of the North Atlantic igneous province, one of the largest magmatic provinces in the world, is analyzed. The data were obtained from measurements of geomagnetic field made by the low-flying German CHAMP satellite, when its altitude significantly decreased.

To isolate the part associated with the field of lithospheric magnetic anomalies, a special original technology of separating the field parts from the total volume of the CHAMP satellite records determined by the presence of deep sources of regional anomalies was developed. Database of experimental data of the absolute induction vector module T_a of the anomalous lithospheric magnetic field at satellite altitude was created.

Maps of different scales for the anomalous lithospheric magnetic field at an altitude of 280 km above the Greenland-Iceland-Faroe ridge complex were constructed. In their construction, various types of median averaging blocks of size 80×80 km and 10×10 km by means of GMT were used. The relations between the identified lithospheric magnetic anomalies with the structures of the studied magmatic province and the active tectonic processes occurring in it up to the present day were discussed. The vast area of negative values of the anomalous magnetic field, observed at an altitude of 280 km, reflects the superposition of the spreading of the Mid-Atlantic Ridge and magmatic processes occurring in this zone, not only directly along the axis of the ridge, but also along its peripheral branches.

The traced positive magnetic anomalies, apparently, fix the presence of separate fragments of the ancient continental crust, submerged under the powerful structures of the basaltic base.

The maps of the anomalies of T_a magnetic field at an altitude of 280 km above the territory of the GIRF volcanic complex show a good agreement with the active tectonic processes taking place in this region.

Keywords: satellite measurements, lithospheric magnetic anomalies, Greenland-Iceland-Faroe ridge complex (GIFRC), spreading, mantle plume, old continental crust.

References

- Abramova D.Yu., Abramova L.M. Lithospheric magnetic anomalies in the territory of Siberia (from measurements by the CHAMP satellite), *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 854-863.
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov Iv.M., Filippov S.V. Analysis of lithospheric magnetic field anomalies within the framework of geological and geophysical studies of the crust-mantle structures of the Carpathian-Balkan region, *Geophysics*, 2017, no. 2, pp. 71-78.
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov Iv.M., Filippov S.V. The role of satellite lithospheric magnetic anomalies in the analysis of geological and geophysical data in the Central Asian collision zone, *Problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens*, Proceedings of the VI International Symposium, Bishkek: NS RAS, 2015, pp. 45-54.
- Allen R., Nolet G., Morgan W., Vogfjord K., Nettles M., Ekstrom G., Bergsson B., Erlendsson P., Foulger G., Jakobsdottir S., Julian B., Pritchard M., Ragnarsson S., Stefansson R. Plume-driven plumbing and crustal

- formation in Iceland, *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107. ESE 4-1–ESE 4-19, <https://doi.org/10.1029/2001JB000584>
- Alvey A., Gaina C., Kuszniir N.J., Torsvik T.H. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, vol. 27, pp. 310-321.
- Arkani-Hamed J., Langel R.A., Purucker M.E. Magnetic anomaly maps of Earth derived from POGO and Mag-sat data, *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, pp. 24075-24090.
- Artyushkov E.V. Continental crust in the Lomonosov ridge, Mendeleev ridge, and Makarov basin. The formation of deep-waterbasins in the Neogene, *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 11, pp. 1515-1530.
- Bijwaard H., Spakman W. Tomographic evidence for a whole-mantle plume below Iceland, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, vol. 166, pp. 121-126.
- Boðvarsson, G., Walker, G.P.L. Crustal drift in Iceland, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1964, vol. 8, pp. 285-300, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1964.tb06295.x>
- Brooks, C.K. Rifting and Doming in Southern East Greenland, *Nature Physical Science*, 1973, vol. 244, pp. 3.
- Dahl-Jensen, T., Larsen T.B., Woelbern I., Bach T., Hanka W., Kind R., Gregersen S., Mosegaard K., Voss P., Gudmundsson O., Depth to Moho in Greenland: Receiver-function analysis suggests two Proterozoic blocks in Greenland, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, vol. 205, pp. 379-393.
- Fitton, J.G., Saunders, A.D., Norry, M.J., Hardarson, B.S. & Taylor, R.S. Thermal and chemical structure of the Iceland plume, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, vol. 153, pp. 197-208.
- Foulger, G.R., Anderson, D.L. A cool model for the Iceland hotspot, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, vol. 141, pp. 1-22.
- Funck, T., Hopper, J.R. Crustal structure. Tectonostratigraphic Atlas of the North-East Atlantic Region. Geological Surv. of Denmark and Greenland (GEUS). Copenhagen, Denmark, 2014, pp. 69-128.
- Gaina, C., Gernigon, L. and Ball, P. Palaeocene–Recent plate boundaries in the NE Atlantic and the formation of the Jan Mayen microcontinent, *Journal of the Geological Society*, London, 2009, vol. 166, pp. 601-616, <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-112>
- Golovkov, V.P., Zvereva, T.I., Chernova, T.A., Space–time modeling of the main magnetic field by combined methods of spherical harmonicanalysis and natural orthogonal components, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 256-262.
- Haase, C., Ebbing, J. and Funck, T. A 3D crystal model of the NE Atlantic based on seismic and gravity data, eds. G. Peron-Pinvidic, J.R. Hopper, T. Stoker, C. Gaina, H. Doornebal, T. Funck, U. Arting, *The NE Atlantic Region: A Reappraisal of Crystal Structure, Tectonostratigraphy and Magmatic Evolution*, Geological Society, London, Special Publications, 2016, vol. 447, no. 12, <https://doi.org/10.1144/SP447.8/>
- Hemant K., Maus S., Haak V., Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique, *Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit*, 2005, pp. 249-254.
- Hemant, K., Maus, S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique, *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, pp. 1-23.
- Henriksen N., Higgins A.K., Kalsbeek F., Pulvertaft T.C.R., Greenland from Archaean to Quaternary. Descriptive text to the Geological map of Greenland 1:2 500 000, *Geology of Greenland Survey Bull.*, 2000, vol. 185, pp. 93.
- Hjartarson A., Erlendsson O., Blisghke A. *The Greenland–Iceland–Faroe Ridge Complex*, Geological Society London Special Publications. April 2017, 21 p.
- Hjartarson, A., Sæmundsson, K. Geological Map of Iceland. Bedrock. 1:600 000. Iceland Geo-Survey (ÍSOR). Reykjavik, Iceland, 2014.
- Jakovlev A.V., Bushenkova N.A., Koulakov I.Yu., and Dobretsov N.L. Structure of the upper mantle in the Circum-Arctic region from regional seismic tomography, *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, pp. 1261-1272.
- Kontorovich A.E., Epov M.I., Burshtein L.M., Kaminskii V.D., Kurchikov A.R., Malyshev N.A., Prischepa O.M., Safronov A.F., Stupakova A.V., Suprunenko O., Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development, *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 1, pp. 7-17.
- Korotaev S.M., Zhdanov M.S., Orekhova D.A., Kruglyakov M.S., Trofimov I.L., Shneer V.S., Shchors Yu.G. Perspectives of magnetotelluric sounding on some large structures of the Arctic Ocean, *Izvestiya, Physics of the solid Earth*, 2010, no. 9, pp. 48-54.
- Langel R.A., Hinze W.J. *The Magnetic Field of the Earth's Lithosphere: The Satellite Perspective*. Cambridge Univ. Press. U. K.: Cambridge, 1998.

- Larsen, L.M., Watt, W.S. Episodic volcanism during break-up of the North Atlantic: evidence from the East Greenland plateau basalts, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1985, vol. 73, pp. 105-116, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90038-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90038-X)
- Morgan, W.J. Convection plumes in the lower mantle, *Nature*, 1971, vol. 230, pp. 42-43.
- Pechersky, D.M., Genshaft, Yu.S., Petromagnetism of the continental lithosphere and the origin of regional magnetic anomalies: A review, *Russ. J. Earth Sci.*, 2001, vol. 3 (2), <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v03/rje01059/rje1059.htm>
- Porokhova L.N., Abramova D.Yu., Porokhov D.A. Mantle electrical conductivity models, constructed by effective linearization using global terrestrial and satellite data, *Geomagnetism and Aeronomy*, 1996, vol. 34, no. 5, pp. 137-146.
- Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P. CHAMP mission status, *Adv. Space Res.*, 2002, vol. 30 (2), pp. 129-134.
- Rickers F., Fichtne A., Trampert J. The Iceland–JanMayen plume system and its impact on mantle dynamics in the North Atlantic region, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, vol. 367, pp. 39-51.
- Rotanova N.M., Kharitonov A.L., Frunze A.H., Filippov S.V., Abramova D.Yu. Anomalous magnetic fields from CHAMP satellite measurements for the Kursk magnetic anomaly territory, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2005, vol. 45, no. 5, pp. 712-719.
- Saunders, A.D., Fitton, J.G., Kerr, A.C., Norry, M.J., Kent, R.W. The North Atlantic igneous province, eds. Mahoney, J.J. & Coffin, M.F., *Large Igneous Provinces. American Geophysical Union, Geophysical Monograph*, 1997, vol. 100, pp. 45-93.
- Søager, N. & Holm, P.M. Extended correlation of the Paleogene Faroe Islands and East Greenland plateau basalts, *Lithos*, 2009, vol. 107, pp. 205-215, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.002>.
- Thordarson, T., Larsen, G. Volcanism in Iceland in historical time: Volcano types, eruption styles and eruptive history, *Journal of Geodynamics*, 2007, vol. 43, pp. 118-152.
- Torsvik, T.H., Amundsen, H.E.F. Continental crust beneath southeast Iceland, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, vol. 112, pp. 1818-1827.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., The Generic Mapping Tools. Technical Reference and Cookbook Version 4.2, 2007. <http://gmt.soest.hawaii.edu>
- White, R., McKenzie, D. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts, *J. Geophys. Res.*, 1989, vol. 94, pp. 7685-7729.