



CORRELATION BETWEEN LITHOSPHERIC MAGNETIC ANOMALIES AND TECTONIC STRUCTURES IN THE NORWEGIAN-GREENLAND REGION OF THE ARCTIC

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

¹ *N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS, Moscow, Troitsk, Russia*

² *Geoelectromagnetic Research Center of O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Troitsk, Russia*

Abstract: The studies of the deep structure and tectonics of the Arctic are important for solving the fundamental problems of modern geodynamics and developing its natural resources. This region is also of interest from the geopolitical point of view, in particular, considering the boundaries of the marginal seas. Our study aims to investigate the lithospheric (anomalous) geomagnetic field in the Norwegian-Greenland region of the Arctic and to correlate the identified anomalies with tectonic structures located in the region under study. The database includes the CHAMP satellite measurements of the modulus of the total geomagnetic field vector (the satellite operated at the altitude of ~280 km). This article describes the satellite data processing method applied to distinguish between the lithospheric part and other components of the geomagnetic field. Map showing the total vector modulus of the lithospheric field has been constructed for the studied area. The article discusses the possible nature of the lithospheric magnetic anomalies and their relation to the processes that occur under the territory of Greenland. According to our interpretation of the maps, the geomagnetic field anomalies are related to the modern large-scale geological and tectonic structures located in the studied area. The obtained results can facilitate further comprehensive geological and geophysical studies and contribute to modeling of the evolution of the lithosphere.

Key words: crust; lithospheric structure of the Norwegian-Greenland basin; satellite measurements of the geomagnetic field; satellite long-wave lithospheric magnetic anomalies

RESEARCH ARTICLE

Received: May 11, 2018
Revised: August 17, 2018
Accepted: August 22, 2018

For citation: Abramova D.Yu., Abramova L.M., Filippov S.V., 2018. Correlation between lithospheric magnetic anomalies and tectonic structures in the Norwegian-Greenland region of the Arctic. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1163–1172. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0388.

Для цитирования: Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В. Корреляция литосферных магнитных аномалий и тектонических структур в норвежско-гренландской части Арктики // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 4. С. 1163–1172. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0388.

КОРРЕЛЯЦИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР В НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОЙ ЧАСТИ АРКТИКИ

Д. Ю. Абрамова¹, Л. М. Абрамова², С. В. Филиппов¹

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

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

Аннотация: Изучение глубинного строения и тектоники Арктики актуально для решения фундаментальных проблем современной геодинамики, освоения ее природных ресурсов, а также представляет интерес с геополитической точки зрения, в частности для определения границ шельфов окраинных морей. Цель настоящей работы – изучение литосферного (аномального) геомагнитного поля на территории норвежско-гренландской части Арктики и сопоставление выявленных аномалий с тектоническими структурами исследуемого региона. В качестве экспериментальных данных использовались измерения модуля полного вектора геомагнитного поля спутником CHAMP на высоте ~280 км. В работе описана методика обработки спутниковых данных с целью отделения литосферной части от остальных составляющих геомагнитного поля. В результате построена карта модуля полного вектора литосферного поля для исследуемой территории. Рассмотрена возможная природа литосферных магнитных аномалий и их связь с процессами, происходящими под территорией Гренландии. Интерпретация полученных карт показывает, что аномалии геомагнитного поля связаны с современными крупномасштабными геолого-тектоническими структурами исследуемой области. Полученные результаты представляют существенный интерес для дальнейших комплексных геолого-геофизических исследований и построения обоснованных моделей эволюции литосферы.

Ключевые слова: земная кора; строение литосферы Норвежско-Гренландского бассейна; спутниковые измерения геомагнитного поля; спутниковые длинноволновые литосферные магнитные аномалии

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к освоению природных ресурсов в сложном построенном Арктическом регионе и связанные с этим геополитические проблемы разграничения особых экономических зон на арктическом шельфе [Kontorovich et al., 2010] требуют разномасштабного и междисциплинарного изучения геолого-тектонических процессов, протекающих в этой области.

Выбор норвежско-гренландской части Арктики в качестве объекта исследования обусловлен тем, что в мировой литературе имеется значительное количество геолого-геофизической информации [Bijwaard, Spakman, 1999; Dahl-Jensen et al., 2003; Alvey et al., 2008; Korotaev et al., 2010; Jakovlev et al., 2012; и др.], которая впоследствии может быть использована при интерпретации карт магнитных аномалий. Последние исследования региона [Kumar et al., 2007; Hjartarson et al., 2017; Steffen et al., 2017] показали, что он характеризуется гораздо более сложным строением, чем считалось ранее. Область исследования включает в себя весьма раз-

нородные в тектоническом отношении структуры: стабильный Гренландский щит, центр современного спрединга – Срединно-Атлантический хребет, бассейны Гренландского и Норвежского морей, характеризующиеся океаническим типом коры [Gaina et al., 2014], а также остров Исландия, под которым по геофизическим данным расположен мантийный плюм [Jakovlev et al., 2012; Rickers et al., 2013].

Магнитная съемка с использованием спутников Земли является одним из наиболее дешевых и доступных геофизических методов изучения глубинного строения нашей планеты, что особенно актуально для труднодоступных областей земного шара. Пространственное покрытие данными даже одного дня наблюдений спутника больше, чем у всей сети обсерваторий мира. Спутниковые данные, полученные в течение нескольких месяцев, а тем более нескольких лет, обеспечивают беспрецедентный глобальный и равномерный охват земной поверхности, что делает их привлекательными и перспективными для использования в фундамен-

тальных и прикладных исследованиях [Maus et al., 2002; Hemant, Maus, 2005]. В последние несколько десятилетий базовым инструментом изучения литосферного поля Земли стали спутниковые измерения миссий (в скобках годы работы и высоты полета): Magsat (1979–1980, 578–352 км), Ørsted (1999, 833–632 км), CHAMP (2000–2010, 460–260 км) и, наконец, Swarm (2013 – по настоящее время, 530–450 км).

Одним из геофизических полей, широко используемых для изучения строения литосферы, является литосферное магнитное поле Земли, также известное как аномальное магнитное поле (АМП). Так называют ту часть геомагнитного поля, источники которого расположены в литосфере. Это поле обязано своим существованием остаточной или индуцированной намагниченности горных пород. Первая возникает во время остывания породы ниже температуры точки Кюри (~600 °C), вторая – как результат процессов метаморфизма [Yanovsky, 1978].

Верхняя граница магнитоактивного слоя может совпадать с земной поверхностью или находиться в складчатых районах на глубинах более 10 км [Arkani-Hamed, Strangway, 1986; Tanaka et al., 1999], в то время как вопрос о его нижней границе до сих пор остается открытым. Принципиальная возможность намагниченности верхов мантии для регионов с низкими глубинными температурами подтверждалась геотермическими расчетами: изотерма Кюри магнетита оказывалась в ряде случаев на глубине до 100 км [Buryanov et al., 1983; Artemieva, Mooney, 2001].

Таким образом, поскольку магнитное поле индуцируется магнитными минералами в коре и верхней мантии, его параметры могут использоваться как маркер для определения структуры литосферы [Hemant, Maus, 2005]. АМП, отражающее современное положение тектонических структур и их физические свойства, может быть использовано для расчета параметров земной коры, в частности для расчета поверхности изотермы Кюри [Gao et al., 2017]. Опираясь на данные об АМП, можно оценивать площадное распределение погруженных проводящих коровых слоев, ассоциированных с шовными зонами внутри и на периферии древних кратонов, выявлять зоны платформенной активизации, а также изучать геодинамические процессы в активных регионах – выделять глубинные разломные зоны и «корневые» области частичного плавления в верхней мантии [Hemant, Maus, 2005; Abramova et al., 2017].

Попытки интерпретации литосферных аномалий приводят к выводу о их связи с несколькими равновероятными источниками. По мнению большинства авторов [Pechersky, 1994; Arkani-Hamed, Strangway, 1986], они могут быть вызваны измене-

нием средней эффективной намагниченности крупных участков литосферы и вариациями мощности ее магнитоактивного слоя. Другим не менее важным источником литосферных магнитных аномалий являются латеральные вариации состава магнитных минералов.

Поскольку помимо литосферного поля в наблюдаемое геомагнитное поле на спутниковых высотах вносят вклад и другие основные составляющие: внутреннее, главное, поле источников ядра Земли и внешнее поле магнитосферных и ионосферных токовых систем [Yanovsky, 1978], основная трудность при расчете параметров АМП заключается в отделении его от других составляющих наблюдаемого геомагнитного поля. В настоящее время существует два направления решения этой проблемы [Olsen et al., 2017]. В первом из них создается глобальная модель геомагнитного поля, где литосферное поле оценивается совместно с другими магнитными источниками (например, ядром и магнитосферой). Таким образом построены CHAOS-модели [Olsen et al., 2014; Finlay et al., 2016], модели LCS-1 [Olsen et al., 2017], EMM2017 [Enhanced Magnetic Model..., 2017] и др.

В другом подходе из наблюдаемых данных последовательно удаляют все априорно известные составляющие геомагнитного поля, получая в остатке литосферное поле. Такой подход предполагает тщательный отбор экспериментальных данных и применение эмпирических поправок. На его основе построена серия MF-моделей [Maus et al., 2002, 2008, 2009], модели [Stockmann et al., 2009; Kother et al., 2015; Thébaud et al., 2016], а также модели, созданные в ИЗМИРАН [Abramova et al., 2009, 2011]. Существование большого числа различных моделей показывает, что задача точного определения параметров литосферного поля очень сложна, что обусловлено трудностями выделения всех составляющих геомагнитного поля. При этом все вышеперечисленные и другие известные модели, как правило, дают очень близкие результаты [Olsen et al., 2017]. В целом по миру их различия укладываются в 5%-ный диапазон, за исключением полярных областей, где большие расхождения обусловлены присутствием в них (в магнитосфере и ионосфере) мощных внешних токовых источников, которые трудно корректно выделить в отдельные составляющие.

В настоящей работе с помощью авторской методики впервые выделена литосферная часть модуля полного вектора геомагнитного поля по данным спутника CHAMP для территории норвежско-гренландской части Арктики, построены карты этого поля и проведено сопоставление выявленных аномалий с тектоническими структурами исследуемого региона.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

В работе использованы данные спутника СНАМР, который имел околополярную круговую орбиту с углом наклона 87.3° , что позволяло покрывать поверхность всего земного шара качественными высокоточными измерениями и использовать их в каждой точке пространства в разное локальное время. За одни сутки спутник совершал около 14 витков, равномерно охватывая весь интервал локального времени [Reigber et al., 2002]. Несомненным преимуществом данных этого спутника (в частности, для выделения литосферного поля) является более низкая высота полета (особенно в конце его работы) по сравнению с другими аналогичными миссиями.

Методика, примененная в данной работе, ранее успешно использовалась для исследований АМП различных регионов Земли [Abramova et al., 2009, 2011, 2014, 2016, 2017; Abramova D.Yu., Abramova L.M., 2014]. Как уже упоминалось выше, один из подходов построения литосферного поля состоит в тщательном выборе экспериментальных данных и последовательном исключении из измеренных значений магнитного поля всех «лишних» составляющих, что дает в остатке лишь литосферное поле. В нашем случае для построения модели литосферного поля отбирались только те данные, которые измерялись спутником в ночное время (с локальным временем с 22.00 до 6.00 часов) и в спокойные в магнитном отношении дни ($k_p \leq 2$ и $Dst \leq 20$); тем самым минимизировалась внешняя составляющая геомагнитного поля. Внутреннее поле источников ядра Земли было аппроксимировано Среднесуточной Сферической Гармонической Моделью (ССГМ) с числом гармоник $n=m=14$ [Golovkov et al., 2007, 2009]. ССГМ строилась по всем наблюдаемым за одни сутки полета спутника данным, включая высокие широты. Сутки, за которые строится модель, должны удовлетворять критерию $k_p \leq 1$ и $Dst \leq 10$ и не должны по времени отставать или опережать обрабатываемый набор данных более чем на 15–20 суток, т.е. предполагается, что ССГМ рассчитывается отдельно для каждого обрабатываемого месячного набора данных. Вычитая из значений измеренного на спутнике геомагнитного поля модель ССГМ, мы удаляем составляющую главного магнитного поля (поля ядра Земли). В результате остается сумма литосферного поля, поля внешних (магнитосферных и ионосферных) источников и полей, индуцированных токами в проводящих слоях земной коры и верхней мантии. Последние на высоте спутника ничтожно малы по сравнению с другими составляющими геомагнитного поля [Yanovsky, 1978], и ими можно пренебречь.

Ранее мы удаляли составляющие магнитосферных источников с помощью аппроксимации их первой зональной гармоникой в разложении данных по сферическим функциям (присоединенным функциям Лежандра), а ионосферных – линейными или параболическим трендами, аппроксимируя исходные данные [Abramova et al., 2009, 2011]. Опыт этих работ показал, что названные внешние составляющие по величине не превышают нескольких нТл, т.е. на порядок меньше выделяемого на высоте спутника литосферного поля. Таким образом, если пренебречь вкладом этих составляющих и не удалять их из исходных данных, то получаемые карты АМП лишь незначительно изменятся количественно, а на качественном уровне конфигурация выделяемых аномалий сохранится. Также опыт наших работ [Abramova et al., 2009, 2011, 2017] показал, что наиболее устойчиво (в зависимости от набора данных) получаются карты литосферного поля полного вектора магнитного поля, поэтому в данной работе представлены и анализируются именно такие карты.

Таким образом, технология выделения параметров магнитных аномалий над территорией Норвежско-Гренландского бассейна Арктики включала следующие этапы:

- отбор по критериям исходных данных измерений магнитного поля спутником СНАМР, включая приведение их к удобной для дальнейшей обработки форме;
- построение модели ССГМ;
- удаление из отобранных данных главного магнитного поля с помощью модели ССГМ;
- построение карт магнитных аномалий на высотах спутниковых измерений.

Для анализа распределения региональных магнитных аномалий рассматриваемой территории были выделены и обработаны, в соответствии с описанной выше методикой, спутниковые магнитные данные за период апрель – май 2010 г., равномерно покрывающие сектор $60-0^\circ$ W и $55-80^\circ$ N. Выбранный период, когда высоты наблюдений составляли ~ 280 км, позволяет получать более значительные величины амплитуд аномального магнитного поля по сравнению с измеренными в предшествующие годы (в 2–3 раза больше), когда высота орбиты спутника составляла около 400–450 км.

Карты пространственного распределения модуля аномального литосферного магнитного поля на высоте полета спутника ~ 280 км для территории Норвежско-Гренландского бассейна были построены с использованием программы GMT [Wessel, Smith, 2007].

Исходя из общепринятой, проверенной практикой оценки и теоретических расчетов [Blokh, 2009]

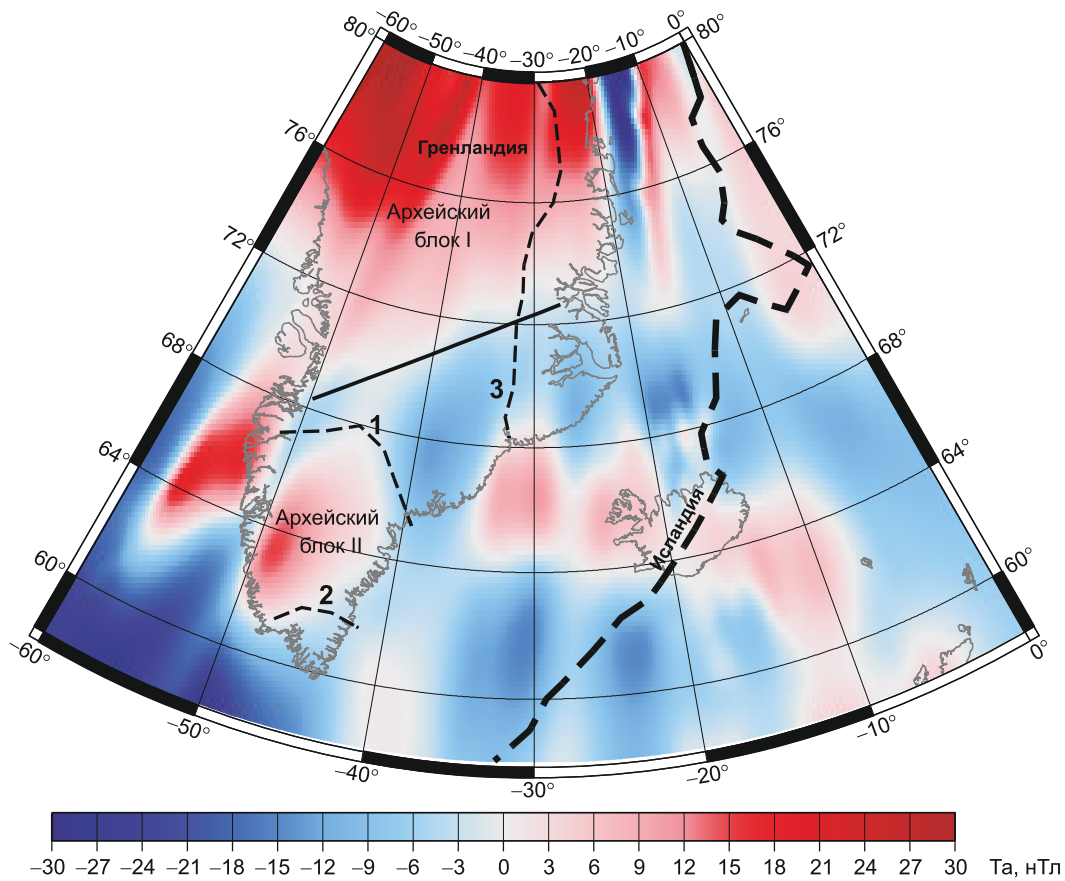


Рис. 1. Карта магнитных аномалий модуля полного вектора (T_a) на высоте ~ 280 км над территорией норвежско-гренландской части Арктики. При построении использовано медианное осреднение по площади $0.5 \times 0.5^\circ$. Толстая штриховая линия показывает положение Срединно-Атлантического хребта. Предполагаемые тектонические границы (складчатые пояса) обозначены тонкими штриховыми линиями: 1 – Нассуг-Токвидиске, 2 – Кетилидиан, 3 – Каледонский [Henriksen, 2008]. Сплошной линией обозначена южная граница магнитной аномалии северного архейского блока I.

Fig. 1. Map showing the magnetic anomalies of the total vector module (T_a) at the altitude of ~ 280 km above the Norwegian-Greenland part of the Arctic. Median averaging to the area of $0.5 \times 0.5^\circ$. Thick dashed line – the Mid-Atlantic ridge. Thin dashed lines – assumed tectonic boundaries (fold belts): 1 – Nassug-Tokvidiske, 2 – Ketilidian, 3 – Caledonian [Henriksen, 2008]. Solid line – the southern boundary of the magnetic anomaly of the Northern Archaean Block I.

известно, что высота съемки соответствует размерам выделяемых аномалий геомагнитного поля. Таким образом, в нашем случае горизонтальное разрешение карт составляет примерно 300 км, т.е. более мелкие аномалии на получаемых картах АМП не выделяются.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Построенная по данным спутника CHAMP карта аномалий модуля полного вектора литосферного магнитного поля (T_a) над норвежско-гренландской частью Арктики на высоте полета ~ 280 км приведена на рис. 1. На территории Норвежско-Гренландского бассейна, являющегося порождением спрединговых процессов [Hjartarson et al., 2017],

проходящих в северной части акватории Атлантического океана и в зоне перехода к Северному Ледовитому океану, региональное АМП имеет следующие особенности. Минимальными значениями АМП характеризуется океаническая часть области исследования, а также глубоководный бассейн Гренландского моря, в то время как над территорией Исландии с окружающими ее подводными поднятиями наблюдается локальный максимум АМП. Следует отметить, что с учетом горизонтального разрешения (около 300 км) срединно-океанический хребет, положение которого показано на рис. 1 толстой пунктирной линией, на полученной карте не выделяется. Выявленные закономерности хорошо согласуются с имеющимися данными о толщине коры рассматриваемого региона [Alvey et al., 2008; Artemieva, Thybo, 2013], согласно которым

под Исландией кора имеет мощность около 32 км и утоняется менее чем до 10 км под глубоководными бассейнами.

Аномальному магнитному полю над территорией Гренландии присущи в основном положительные значения, что указывает на наличие под ней мощной литосферы (до 250–280 км), выявленной ранее по результатам сейсмической томографии [Lebedev et al., 2009; Jakovlev et al., 2012]. У восточного побережья Гренландии видна изометрическая положительная магнитная аномалия с центральным «ядром» около 33/29° W и 65.5°/67.5° N. На западной стороне Южной Гренландии, также в океанической части, присутствует крупный сегмент положительных значений магнитного поля, непосредственно примыкающий к береговой границе. Эти две положительные аномалии свидетельствуют о наличии намагниченных структур в самых низах литосферы, которые, возможно, являются остатками древней континентальной коры.

Рассмотрим более подробно строение коры и литосферы Гренландии. Прежде всего, следует отметить, что ~80 % острова покрыто толстым, до 3400 м, ледяным щитом, и только прибрежная область шириной ~300 км свободна ото льда [Alley et

al., 2010]. Как было сказано выше, Гренландия представляет собой участок прочной континентальной литосферы, прежде всего докембрийского возраста. Он состоит из двух архейских блоков – I и II (рис. 1), разделенных подвижными поясами протерозойского возраста [Henriksen, 2008].

Мощность коры под Гренландией варьируется в широких пределах (рис. 2). Центральная часть имеет среднюю мощность земной коры порядка 40 км [Kumar et al., 2007], а к краям она уменьшается до 30–40 км. Самая тонкая кора находится на восточном краю Гренландии, что обусловлено наличием здесь в геологическом прошлом Исландского плюма [Lawver, Müller, 1994; Gaina et al., 2014].

Этим представлениям, как можно видеть по рис. 1, хорошо отвечает геометрия региональных магнитных спутниковых аномалий. Так, вся северная часть Гренландии характеризуется положительными значениями АМП. На высоте ~280 км над геоидом его амплитуда достигает 30 нТл, что представляет собой очень значительную величину в ряду обычно наблюдаемых на такой высоте аномалий. Это типичная магнитная аномалия, соответствующая природе архейской континентальной коры [Hemant, Maus, 2005]. Южная окраина этой по-

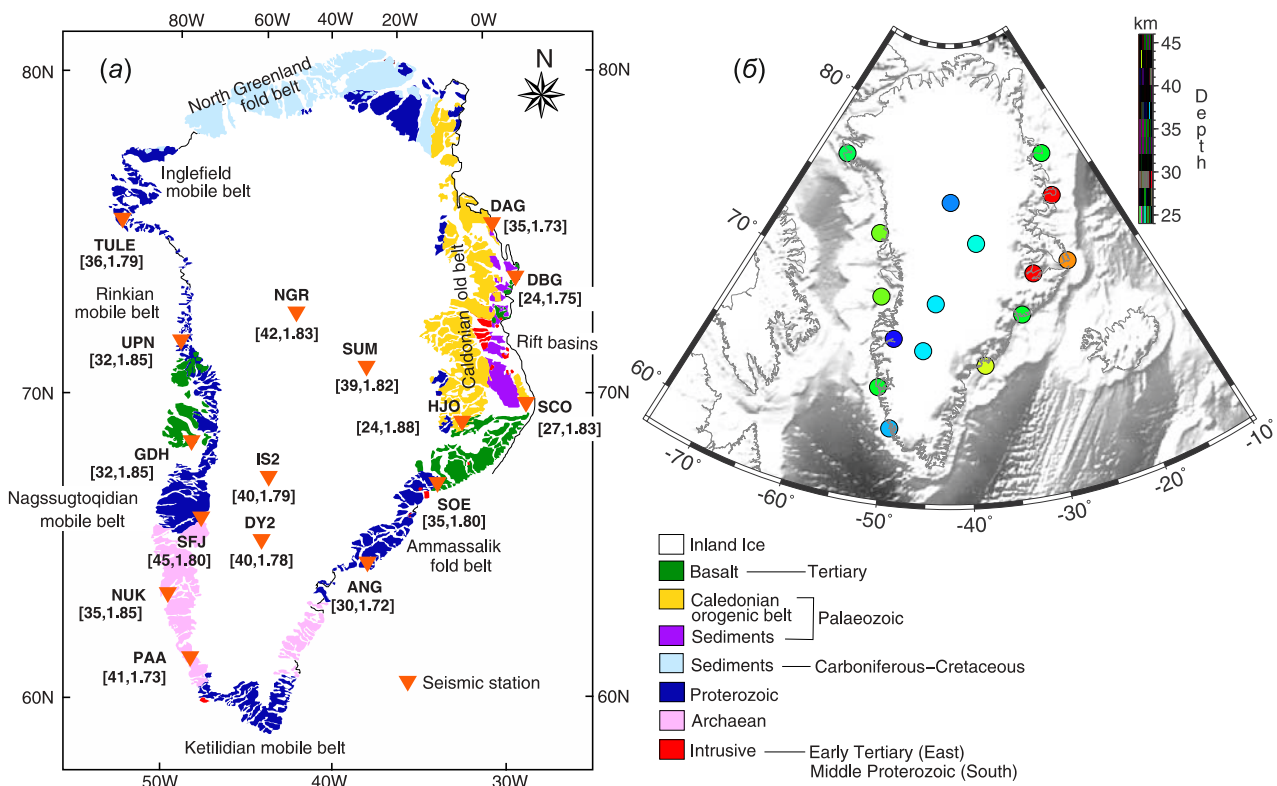


Рис. 2. Геологическая карта Гренландии с положением сейсмических станций и параметрами коры: глубинами Мохо и средними отношениями V_p/V_s (а) и карта мощности коры (б) по [Kumar et al., 2007].

Fig. 2. Geological map of Greenland. It shows the locations of seismic stations and the parameters of the crust (Moho depths and average ratios V_p/V_s) (a). Crust thickness map (after [Kumar et al., 2007]) (b).

ложительной аномалии четко выражена и проходит в ЮЗ–СВ направлении через территорию Центральной и Северной Гренландии. Положение южной границы магнитной аномалии северного архейского блока I (сплошная линия на рис. 1) практически точно совпадает с зоной предполагаемого раздела архейской и протерозойской части Гренландии [Lawver, Müller, 1994; Henriksen, 2008].

Обширная область отрицательных значений T_a в центральной части Гренландии продолжается далее на восток в зону спрединга Срединно-Атлантического хребта. На востоке Центральной Гренландии и в центральной части западного побережья преобладает третичный вулканизм, что, как правило, связывается с процессами субдукции, протекавшими в Северной Атлантике в позднем палеоцене, а также, возможно, обусловлено существовавшим здесь Исландским плюмом ~50–60 млн лет назад [Allen et al., 2002]. Томографическими исследованиями [Jakovlev et al., 2012] как раз в этой области выделена низкоскоростная аномалия, которая, возможно, отражает свойства литосферы, частично разрушенной Исландским плюмом. Эта область пониженных значений аномального магнитного поля и сейсмических скоростей совпадает также с положением зоны аномального увеличения теплового потока и повышенной скоростью таяния льдов [Fahnestock et al., 2001]. Повышенный тепловой поток, в свою очередь, вызывает поднятие изотермической поверхности Кюри магнетита, приводя к уменьшению мощности магнитоактивного слоя и понижению значений аномального магнитного поля.

Над территорией южной оконечности Гренландии прослеживается менее значительная, чем на севере, с уровнем порядка 10–16 нТл, положительная магнитная аномалия, являющаяся отражением свойств архейского блока II в магнитном поле (см. рис. 1). Разница амплитуд северной и южной аномалии, по-видимому, обусловлена различными температурными режимами северной и южной части острова. Как упомянуто выше, радиолокационные зондирования в Центральной Гренландии выявили обширную область быстрого базального таяния льда [Fahnestock et al., 2001]. Высокие локальные скорости плавления льда косвенно указывают

на наличие теплового потока, превышающего, по мнению этих авторов, континентальный фон от 15 до 30 раз. При этом южная оконечность области повышенной скорости плавления является наиболее горячей и, по предположениям [Fahnestock et al., 2001], имеет вулканическое происхождение. Таким образом, температурное состояние литосферы в южной части Гренландии, возможно, обусловлено повышением температурного режима, что вызвало подъем поверхности изотермы Кюри и уменьшило мощность магнитоактивного слоя.

Выше сказано, что кора южной части Гренландии сложена породами архея, за исключением самой южной «верхушки» острова, которая сложена протерозойскими породами. Предполагаемые тектонические границы этих блоков, складчатые пояса, показаны на рис. 1 штриховыми линиями под номерами 1 (Нассуг-Токвидиске) и 2 (Кетилидиан) [Henriksen, 2008]. Это также находит свое отражение в положении южной магнитной аномалии, как в форме границ, так и в пониженных значениях аномального магнитного поля.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе измерений магнитного поля спутником CHAMP определено положение крупномасштабных литосферных аномалий модуля полного вектора магнитного поля T_a на высоте ~280 км над территорией норвежско-гренландской части Арктики. Аномальное поле отражает положение архейских блоков на севере и юге Гренландии. Также на уровень магнитного поля оказало влияние прохождение под центральной частью острова Исландского мантийного плюма ~50–60 млн лет назад.

Изучение литосферы с использованием спутниковых наблюдений способствует лучшему пониманию тектонической структуры и эволюции литосферы. Выделение аномалий магнитного поля, связанных с корово-мантийными зонами термического разуплотнения и флюидизации, чрезвычайно важно для понимания строения и геодинамических режимов активных регионов и прогноза в них опасных природных рисков.

5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Abramova D.Yu., Abramova L.M., 2014. Lithospheric magnetic anomalies in the territory of Siberia (from measurements by the CHAMP satellite). *Russian Geology and Geophysics* 55 (7), 854–863. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.06.005>.
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Filippov S.V., Frunze A.Kh., 2011. On the prospects of using satellite measurements for the analysis of regional magnetic anomalies. *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa* (6), 53–63 (in Russian) [Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В., Фрунзе А.Х. О перспективах использования спутниковых измерений для анализа региональных магнитных аномалий // *Исследование Земли из космоса*. 2011. № 6. С. 53–63].

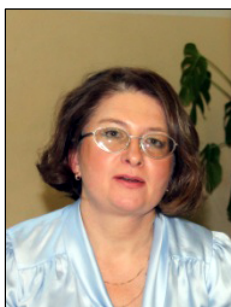
- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov I.M., Filippov S.V., 2017. Analysis of anomalies in the lithospheric magnetic field in the framework of the geological-geophysical study of the crust-mantle structures in the Carpathian-Balkan region. *Geofizika (Geophysics)* (2), 71–78 (in Russian) [Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов И.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].
- Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M., Varentsov I.M., 2014. Lithospheric magnetic anomalies in the Balkan region. *Bulgarian Geophysical Journal* 40, 50–64.
- Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M., Varentsov I.M., Lozovskii I.N., 2016. Changes of lithospheric magnetic anomalies with altitude (according to the CHAMP satellite). *Geomagnetism and Aeronomy* 56 (2), 239–248. <https://doi.org/10.1134/S001679321602002X>.
- Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M., 2009. The long wavelength magnetic anomalies over the territory of Russia from CHAMP satellite measurements. *Geofizicheskiye Issledovaniya (Geophysical Research)* 10 (4), 48–63 (in Russian) [Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. Длинноволновые магнитные аномалии на территории России по измерениям спутника CHAMP // *Геофизические исследования*. 2009. Т. 10. № 4. С. 48–63].
- Allen R., Nolet G., Morgan W., Vogffjord K., Nettles M., Ekstrom G., Bergsson B., Erlendsson P., Foulger G., Jakobsdottir S., Julian B., Pritchard M., Ragnarsson S., Stefansson R., 2002. Plume-driven plumbing and crustal formation in Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107 (B8), 2163. <https://doi.org/10.1029/2001JB000584>.
- Alley R.B., Andrews J.T., Brigham-Grette J., Clarke G.K.C., Cuffey K.M., Fitzpatrick J.J., Funder S., Marshall S.J., Miller G.H., Mitrovica J.X., Muhs D.R., Otto-Bliesner B.L., Polyak L., White J.W.C., 2010. History of the Greenland ice sheet: paleoclimatic insights. *Quaternary Science Reviews* 29 (15–16), 1728–1756. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.02.007>.
- Alvey A., Gaina C., Kuszniir N.J., Torsvik T.H., 2008. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic. *Earth and Planetary Science Letters* 27 (3–4), 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.036>.
- Arkani-Hamed J., Strangway D.W., 1986. Effective magnetic susceptibility anomalies of the oceanic upper mantle derived from Magsat data. *Geophysical Research Letters* 13 (10), 999–1002. <https://doi.org/10.1029/GL013i010p00999>.
- Artemieva I.M., Mooney W.D., 2001. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 106 (B8), 16387–16414. <https://doi.org/10.1029/2000JB900439>.
- Artemieva I.M., Thybo H., 2013. EUNaseis: A seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region. *Tectonophysics* 609, 97–153. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.004>.
- Bijwaard H., Spakman W., 1999. Tomographic evidence for a whole-mantle plume below Iceland. *Earth and Planetary Science Letters* 166 (3–4), 121–126. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00004-7).
- Blokh Yu.I., 2009. Interpretation of Gravitational and Magnetic Anomalies. Manual. Moscow State Geological Prospecting Academy, Moscow, 232 p. (in Russian) [Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие. Москва: МГГА, 2009. 232 с.].
- Buryanov V.B., Gordienko V.V., Kulik S.N., Logvinov I.M., 1983. Comprehensive Geophysical Study of the Continental Tectonosphere. Naukova Dumka, Kiev, 176 p. (in Russian) [Бурьянов В.Б., Гордиенко В.В., Кулик С.Н., Логвинов И.М. Комплексное геофизическое изучение тектоносферы континентов. Киев: Наукова думка, 1983. 176 с.].
- Dahl-Jensen T., Larsen T.B., Woelbern I., Bach T., Hanka W., Kind R., Gregersen S., Mosegaard K., Voss P., Gudmundsson O., 2003. Depth to Moho in Greenland: Receiver-function analysis suggests two Proterozoic blocks in Greenland. *Earth and Planetary Science Letters* 205 (3–4), 379–393. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01080-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01080-4).
- Enhanced Magnetic Model 2017, 2017. Available from: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/>.
- Fahnestock M., Abdalati W., Joughin I., Brozena J., Gogineni P., 2001. High geothermal heat flow, basal melt, and origin of rapid ice flow in Central Greenland. *Science* 294 (5550), 2338–2342. <https://doi.org/10.1126/science.1065370>.
- Finlay C.C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Tøffner-Clausen L., 2016. Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth, Planets and Space* 68 (1), 112. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0486-1>.
- Gaina C., Medvedev S., Torsvik T.H., Koulakov I., Werner S.C., 2014. 4D Arctic: A glimpse into the structure and evolution of the Arctic in the light of new geophysical maps, plate tectonics and tomographic models. *Surveys in Geophysics* 35 (5), 1095–1122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9254-y>.
- Gao G., Kang G., Li G., Bai C., Wu Y., 2017. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area. *Acta Geodaetica et Geophysica* 52 (3), 407–420. <https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z>.
- Golovkov V.P., Zvereva T.I., Chernova T.A., 2007. Space-time modeling of the main magnetic field by combined methods of spherical harmonic analysis and natural orthogonal components. *Geomagnetism and Aeronomy* 47 (2), 256–262. <https://doi.org/10.1134/S0016793207020156>.
- Golovkov V.P., Zvereva T.I., Chernova T.A., 2009. Construction of the spatial-temporal model of the main geomagnetic field using satellite data. *Geomagnetism and Aeronomy* 49 (1), 124–132. <https://doi.org/10.1134/S0016793209010174>.

- Hemant K., Maus S., 2005. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110 (B12), B12103. <https://doi.org/10.1029/2005JB003837>.
- Henriksen N., 2008. Geological history of Greenland: Four Billion Years of Earth Evolution. Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), Copenhagen, 272 p.
- Hjartarson Á., Erlendsson Ö., Blischke A., 2017. The Greenland–Iceland–Faroe Ridge Complex. In: G. Péron-Pinvidic, J.R. Hopper, T. Funck, M.S. Stoker, C. Gaina, J.C. Doornenbal, U.E. Ártung (Eds.), *The NE Atlantic Region: a reappraisal of crustal structure, tectonostratigraphy and magmatic evolution*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 447, p. 127–148. <https://doi.org/10.1144/SP447.14>.
- Jakovlev A.V., Bushenkova N.A., Koulakov I.Yu., Dobretsov N.L., 2012. Structure of the upper mantle in the Circum-Arctic region from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics* 53 (10), 963–971. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.08.001>.
- 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.I., 2010. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development. *Russian Geology and Geophysics* 51 (1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.003>.
- Korotaev S.M., Zhdanov M.S., Orekhova D.A., Kruglyakov M.S., Trofimov I.L., Schors Y.G., Shneyer V.S., 2010. Study of the possibility of the use of the magnetotelluric sounding method in the Arctic ocean with quantitative modeling. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46 (9), 759–771. <https://doi.org/10.1134/S1069351310090053>.
- Kother L., Hammer M.D., Finlay C.C., Olsen N., 2015. An equivalent source method for modelling the global lithospheric magnetic field. *Geophysical Journal International* 203 (1), 553–566. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv317>.
- Kumar P., Kind R., Priestley K., Dahl-Jensen T., 2007. Crustal structure of Iceland and Greenland from receiver function studies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112 (B3), B03301. <https://doi.org/10.1029/2005JB003991>.
- Lawver L.A., Müller R.D., 1994. Iceland hotspot track. *Geology* 22 (4), 311–314. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0311:IHT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0311:IHT>2.3.CO;2).
- Lebedev S., Boonen J., Trampert J., 2009. Seismic structure of Precambrian lithosphere: new constraints from broadband surface-wave dispersion. *Lithos* 109 (1–2), 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.06.010>.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J. D., Finn C., von Frese R. R. B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Müller R. D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thébaud E., Caratori Tontini F., 2009. EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10 (8), Q08005. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>.
- Maus S., Rother M., Holme R., Lühr H., Olsen N., Haak V., 2002. First scalar magnetic anomaly map from CHAMP satellite data indicates weak lithospheric field. *Geophysical Research Letters* 29 (14), 1702. <https://doi.org/10.1029/2001GL013685>.
- Maus S., Yin F., Lühr H., Manoi C., Rother M., Rauberg J., Michaelis I., Stolle C., Müller R.D., 2008. Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9 (7), Q07021. <https://doi.org/10.1029/2008GC001949>.
- Olsen N., Lühr H., Finlay C.C., Sabaka T.J., Michaelis I., Rauberg J., Tøffner-Clausen L., 2014. The CHAOS-4 geomagnetic field model. *Geophysical Journal International* 197 (2), 815–827. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu033>.
- Olsen N., Ravat D., Finlay C., Kother L.K., 2017. LCS-1: A high-resolution global model of the lithospheric magnetic field derived from CHAMP and Swarm satellite observations. *Geophysical Journal International* 211 (3), 1461–1477. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx381>.
- Pechersky D.M. (Ed.), 1994. *Petromagnetic Model of the Lithosphere*. Naukova Dumka, Kiev, 175 p. (in Russian) [Петромагнитная модель литосферы / Ред. Д.М. Печерский. Киев: Наукова думка, 1994. 175 с.].
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P., 2002. CHAMP mission status. *Advances in Space Research* 30 (2), 129–134. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4).
- Rickers F., Fichner A., Trampert J., 2013. The Iceland – Jan Mayen plume system and its impact on mantle dynamics in the North Atlantic region: evidence from full-waveform inversion. *Earth and Planetary Science Letters* 367, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.02.022>.
- Steffen R., Strykowski G., Lunda B., 2017. High-resolution Moho model for Greenland from EIGEN-6C4 gravity data. *Tectonophysics* 706–707, 206–220. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.014>.
- Stockmann R., Finlay C., Jackson A., 2009. Imaging Earth's crustal magnetic field with satellite data: a regularized spherical triangle tessellation approach. *Geophysical Journal International* 179 (2), 929–944. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04345.x>.
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O., 1999. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia. *Tectonophysics* 306 (3–4), 461–470. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00072-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00072-4).

Thébault E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G.A., 2016. Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80. Earth, Planets and Space 68, 126. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0510-5>.

Wessel P., Smith W.H.F., 2007. The Generic Mapping Tools. Technical Reference and Cookbook Version 4.2. Available from: <http://gmt.soest.hawaii.edu>.

Yanovsky B.M., 1978. Terrestrial Magnetism. Publishing House of the Leningrad State University, Leningrad, 592 p. (in Russian) [Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Издательство ЛГУ, 1978. 592 с.]



Дарья Юрьевна Абрамова, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, Россия

✉ e-mail: abramova@izmiran.ru

Daria Yu. Abramova, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher
N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
4 Kaluzhskoe Highway, Moscow, Troitsk 108840, Russia



Людмила Мамиконовна Абрамова, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.
Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, Россия

e-mail: ludabr50@mail.ru

Ludmila M. Abramova, Candidate of Physics and Mathematics, Lead Researcher
Goelectromagnetic Research Center of O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
4 Kaluzhskoe Highway, Moscow, Troitsk 108840, Russia



Сергей Витальевич Филиппов, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, Россия

e-mail: sfilip@izmiran.ru

Sergei V. Filippov, Candidate of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
4 Kaluzhskoe Highway, Moscow, Troitsk 108840, Russia