

УДК 550.34.09

ОТРАЖЕНИЕ КРУПНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В ЛИТОСФЕРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2020 г. Д. Ю. Абрамова^{1, *}, Л. М. Абрамова^{2, **}, И. М. Варенцов^{2, ***}, С. В. Филиппов^{1, ****}

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

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

*e-mail: dasha.ryan@yandex.ru

**e-mail: labramova@mail.igemi.troitsk.ru

***e-mail: ivan_varentsov@mail.ru

****e-mail: filip@izmiran.ru

Поступила в редакцию 06.09.2019 г.

После доработки 22.02.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Рассмотрены построенные по наблюдениям спутника CHAMP карты поля литосферных магнитных аномалий, являющихся образами глубинных структур Северного Ледовитого океана. Выявлены литосферные магнитные аномалии, соответствующие наиболее значимым тектоническим структурам: хребту Ломоносова, поднятиям Менделеева и Альфа, котловинам Амундсена, Подводников и Макарова. Распределение поля региональных магнитных аномалий, представляющее собой сложный комплекс положительных и отрицательных сегментов различных форм и амплитуд, обсуждается в свете современных геолого-геофизических представлений о строении литосферы Северного Ледовитого океана. Построенная модель аномального магнитного поля свидетельствует о том, что в области сопряжения с Евразией подножие и склон хребта Ломоносова морфологически связаны с континентальной окраиной, а область центральных арктических поднятий Менделеева и Альфа представляется единой блоковой структурой с корой континентального типа.

DOI: 10.31857/S0016794020050028

1. ВВЕДЕНИЕ

Северный Ледовитый океан (СЛО) в настоящее время является исключительно важным и перспективным регионом для решения фундаментальных задач, касающихся глубинного строения и истории формирования Мирового океана и Земли в целом. Необходимость его геолого-геофизического изучения диктуется, кроме того, геополитическими вопросами разграничения особых экономических зон на шельфе, связанными с разведкой месторождений нефти и газа и их дальнейшим хозяйственным освоением. Получение экспериментальных данных геофизических наблюдений в труднодоступном приполярном регионе весьма сложно, это ограничивает возможности исследований и приводит к значительному удорожанию любых полевых работ. Несмотря на имеющиеся трудности, исследования экватории СЛО постоянно расширяются, появляются новые геофизические и геологические данные, пересматриваются и заново анализируются полу-

ченные ранее экспериментальные материалы [Поселов и др., 2002; Alvey et al., 2008; Артюшков, 2010; Добрецов и др., 2013; Верниковский и др., 2013; Глебовский и др., 2013; Gaina et al., 2014; Petrov et al., 2016; Lebedev, et al., 2017; Drachev et al., 2018; Seredkina, 2019].

Одним из наиболее информативных и доступных геофизических подходов изучения глубинного строения нашей планеты над труднодоступными пространствами Земли является спутниковая магнитная съемка. Существенным преимуществом использования экспериментальных наблюдений геомагнитного поля, полученных на спутниках Земли, является возможность анализа и интерпретации данных над территориями, где отсутствуют или имеются в недостаточном количестве приземные измерения. Сведения о пространственном распределении аномального магнитного поля необходимы при исследовании взаимодействия литосферных плит с мантией, поскольку процессам сжатия и растяжения зем-

ной коры, сопровождаемым крупномасштабным вулканизмом, свойственны различные особенности магнитных полей [Roest et al., 1995; Vokelmann and Wustefeld, 2009; Абрамова и др., 2018a]. Поскольку различные области земной коры характеризуются свойственным только им составом минералов и степенью намагниченности слоев, по геомагнитным данным можно зафиксировать тектонические структуры различного вида, например, области распространения континентальной и океанической коры или взаиморасположение океанических блоков с различной намагниченностью. Карты поля литосферных магнитных аномалий указывают на закономерности распределения магнитных неоднородностей регионального масштаба в глубинной зоне земной литосферы, как бы “высвечивая” древние структуры, в настоящее время перекрытые более молодыми осадочными отложениями [Hemant and Maus, 2005].

Измерение геомагнитного поля на спутниковых высотах аналогично процессу пересчета поля в верхнее полупространство, при котором подавляются локальные аномалии и сохраняются в мало искаженном виде региональные составляющие. На высотах над поверхностью Земли порядка 250–550 км фиксируются, в основном, низкочастотные литосферные магнитные аномалии интенсивностью порядка единиц – первых десятков нТл, вызванные крупномасштабными структурами, залегающими в низах земной коры [Hemant and Maus, 2005; Gao et al., 2017]. Для рассматриваемой территории крупномасштабные карты литосферного поля в основном строятся по глобальным моделям, например, MF6 [Maus et al., 2008] и др. Такие карты, как правило, привязаны к высоте полета спутника. В частности, в модели MF6 они построены для высоты – 350 км. Данная работа как раз посвящена определению и интерпретации таких крупномасштабных аномалий.

Известно, что чем ниже проводятся спутниковые измерения, тем сильнее сигнал литосферных региональных аномалий. Для увеличения достоверности и пространственного разрешения выделяемых аномалий нами были выбраны измерения геомагнитного поля на спутнике CHAMP при наименьшей высоте его полета. Эти измерения были получены на высотах 280–290 км на завершающей стадии миссии в 2010 г. Использовались измерения модуля геомагнитного поля. Полученные литосферные магнитные аномалии были проанализированы на наличие их обусловленности крупнейшими тектоническими структурами Северного Ледовитого океана: хребтом Ломоносова, поднятием Менделеева, котловинами Амундсена, Подводников и Макарова. Исследованы взаимосвязи этих структур с континентальной окраиной Евразии.

2. КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СПУТНИКЕ CHAMP

Искусственный спутник Земли CHAMP был запущен в 2000 г. и, постепенно снижаясь, завершил свою миссию 19 сентября 2010 г. [Reigber et al., 2002]. Рабочая высота спутника в разные годы изменялась в интервале 456–250 км, что дало возможность использовать огромные массивы высокоточных данных площадных наблюдений практически над всей поверхностью земного шара, полученных на разных по высоте уровнях орбиты. Кроме того, в отличие от спутниковых магнитных съемок, проводившихся ранее в основном на уровнях 450 и даже 700 км, низкая высота орбиты CHAMP в последний год существования миссии позволила получить повышенные (примерно в 2–3 раза) величины амплитуд поля магнитных аномалий. Успех CHAMP продемонстрировал высокий научный и экономический потенциал спутниковых наблюдений, а для российских геофизиков, получивших возможность бесплатно использовать уникальные данные, кроме того предоставил широкое поле для исследований внутреннего строения Земли. Специальным образом рассчитанная околополярная круговая орбита CHAMP с углом наклона 87.3° позволяла проводить измерения в одной и той же точке пространства в разное локальное время, практически для всего интервала долгот [Reigber et al., 2002]. Данные имели секундное разрешение по времени, что составляет в пространстве ~ 7 км.

На спутнике работали два магнитометра: скалярный OVM, регистрировавший амплитуды модуля полного вектора геомагнитного поля (T), и феррозондовый FGM, измерявший три ортогональных векторных компоненты (X , Y , Z). Точность измерений модуля составила ± 0.5 нТл, компонент – ± 3 нТл.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

Основная проблема при проведении анализа заключается в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля на составляющие, связанные с различными физическими источниками. Первая составляющая (главное или нормальное поле) генерируется в жидкой части ядра Земли. Вторая составляющая (переменное поле внешних источников) порождается токами в ионосфере и магнитосфере. Третья составляющая – это поле токов, индуцированных в проводящих слоях земной коры и верхней мантии внешними источниками. И, наконец, четвертая – поле магнитных аномалий, связанных с намагниченностью горных пород литосферы, наиболее

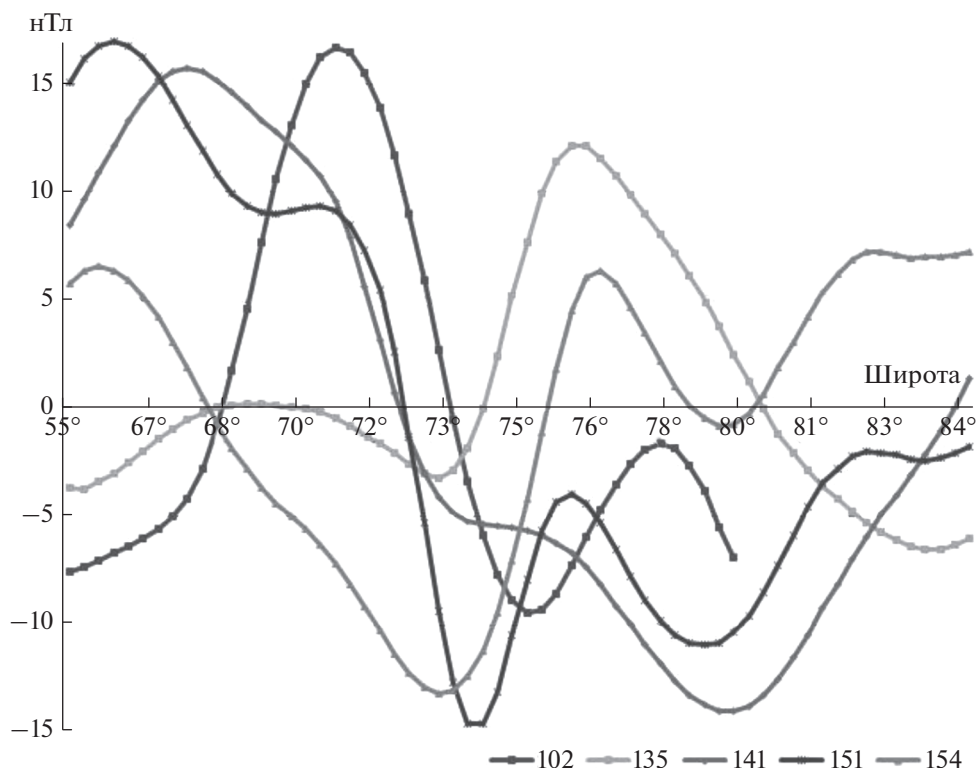


Рис. 1. Изменения аномального литосферного магнитного поля T_a вдоль витков спутника CHAMP над Северным Ледовитым океаном при различных значениях долготы (λ°).

информативное для изучения внутреннего строения земной коры.

Как отмечалось выше, обработка спутниковых наблюдений в высоких широтах, в частности, выделение из измеренных значений геомагнитного поля литосферной составляющей, в приполярных областях имеет серьезные ограничения. В процессе обработки большое количество экспериментальных данных пришлось отбраковать по той причине, что измерения были искажены магнитными возмущениями, это существенно ограничило объем использованного материала. Отбраковка базировалась на среднеквадратичных отклонениях значений поля от измеренных на соседних витках. Для территории СЛО приблизительно 35% данных CHAMP было отбраковано ввиду низкого соотношения сигнал/шум и присутствия помех от полярного электроджета.

Технология выделения параметров поля литосферных магнитных аномалий из суммарного геомагнитного поля, измеренного на спутнике, подробно описана в ряде наших публикаций, например [Абрамова и др., 2018а, б]. Основа технологии – среднесуточная сферическая гармоническая модель (ССГМ) главного геомагнитного поля [Головков и др., 2007]. ССГМ строится до степени и порядка $n = m = 14$ для одного дня, при этом для построения модели берутся все данные

за сутки, включая полученные в области высоких широт, что значительно увеличивает равномерность покрытия сферы исходными данными. Для получения литосферного поля используются измерения поля только для витков, совершаемых спутником в ночное время (LT от 22.00 до 06.00 часов) и только в спокойные в магнитном отношении дни (магнитные индексы $K_p \leq 1$ и $D_{st} \leq 20$). Такой подход позволяет уменьшить вторую и третью составляющие поля, указанные выше. Вычитая из измеренных значений модельные значения ССГМ, соответствующие главному полю, мы получаем литосферное поле на высоте спутника. Проведенные нами ранее оценки показали, что данный подход не приводит к понижению точности определения значений аномального поля, но существенно снижает время обработки. Пример изменения амплитуды полного вектора аномального литосферного магнитного поля T_a вдоль некоторых витков спутника CHAMP над акваторией СЛО при различных значениях долготы (λ°) показан на рис. 1.

Для анализа аномального магнитного поля региона СЛО были отобраны и обработаны геомагнитные спутниковые измерения, равномерно покрывающие сектор $120^\circ \text{ E} - 160^\circ \text{ W}$, $65^\circ - 85^\circ \text{ N}$. Таким образом создана база спутниковых данных поля магнитных аномалий над акваторией Север-

ного Ледовитого океана за 7 мес. работы СНАМРа в 2010 г. на высоте орбиты ~280 км. Количество использованных для анализа значений составило ~12000.

4. ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НАД АКВАТОРИЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Топография и батиметрия Северного Ледовитого океана отражает сложное блочное строение его коры и литосферы. Примерно половина площади дна акватории Северного Ледовитого океана представлена шельфовыми участками с предположительно континентальным типом коры. Глубинные участки дна разделяются на отдельные бассейны [Gaina et al., 2014].

В Российском секторе Арктического бассейна под слоем воды толщиной от 1 до 4 км расположены хребет Ломоносова и поднятие Менделеева, разделенные котловинами Макарова и Подводников. Природа земной коры этой территории (является ли она континентальной или океанической) составляет объект оживленных дискуссий среди геологов и геофизиков. Так как под хребтами СЛО земная кора значительно мощнее (20–30 км), чем принято для территорий Мирового океана (~7 км), и включает в себя гранитный слой мощностью до ~12 км, ее позволительно отнести к континентальному типу [Артюшков, 2010]. Проведенными геофизическими исследованиями подтверждается существование реликтов древней платформы в Северном Ледовитом океане, изменявшей форму под влиянием тектонических процессов. Полагают, что кора области хребта Ломоносова, поднятий Менделеева и Альфа представлена породами континентального типа [Филатова и Хаин, 2007; Поселов и др., 2002, 2012; Артюшков, 2010].

Карта распределения поля литосферных магнитных аномалий над Северным Ледовитым океаном на высоте наблюдения спутника СНАМР ~280 км приведена на рис. 2. При построении карты использовано медианное осреднение по блокам размером 80 × 80 км средствами GMT (blockmedian) [Wessel and Smith, 2007]. При выделении спутниковых региональных литосферных аномалий с помощью сферического гармонического анализа (СГА), как правило, ограничиваются гармониками 120-го порядка, например, так сделано в модели MF6 [Maus et al., 2008]. В таком случае, минимальный размер выделяемых аномалий примерно составляет 330 км. Так как для нашей процедуры построения карт невозможно рассчитать величину горизонтального разрешения – минимальный размер аномалий, то остается считать, сопоставляя свои результаты с данными глобальных моделей, что оно такое же, как для

карт, построенных на основе СГА, т.е. примерно составляет 300–330 км.

В изучаемом регионе выделяется несколько крупных положительных аномалий литосферного магнитного поля различной формы и интенсивности. Цифрами 1 и 1' обозначена положительная аномалия, вероятно, приуроченная к тектонической структуре хребта Ломоносова. Максимальные по амплитуде и размерам положительные магнитные аномалии выявлены над областью, топографически включающей в себя поднятия Менделеева (2) и Альфа (3). Южнее этого крупного сегмента положительных значений аномального поля наблюдается обширная область отрицательных значений, простирающаяся вплоть до континентальной области Евразии.

Над котловиной Амундсена (4) аномальное магнитное поле неоднородно: ближе к хребту Ломоносова оно сильно понижено, а по направлению к западу постепенно образует ареал слабopоложительных аномалий. Эта область имеет субмеридиональное простираение практически параллельно хребту Ломоносова. Акваториям котловин Подводников (5) и Макарова (6) соответствуют области отрицательного литосферного аномального магнитного поля.

Показанные на рис. 2 магнитные сегменты являются образами структур, лежащих в нижних слоях земной коры, и топографически могут быть отнесены к соответствующим геолого-тектоническим единицам. Ниже эти аномальные области рассматриваются более подробно. Следует отметить, что понятие “над структурой” достаточно условно, оно подразумевает только топографическую приуроченность, поскольку размеры видимых на поверхности структур (например, хребет Ломоносова) могут в значительной мере отличаться от параметров намагниченных структур в нижней части коры, отражением которых является литосферное магнитное поле.

5.1. Хребет Ломоносова

В рельефе дна Северного Ледовитого океана хребет Ломоносова прослеживается от континентальной окраины Евразии до Канадского архипелага. Он представляет собой погружившийся блок континентальной коры древней платформы, переработанной в процессе тектономагматической активизации. При движении к северу мощность коры под хребтом уменьшается с 35–30 до 25 км, ее строение имеет определенные сходства с континентальными складчатыми системами. Континентальная природа коры хребта Ломоносова признается практически всеми исследователями [Vogt et al., 1979; Grantz et al., 2001; Артюшков, 2010], а также подтверждается данными глубоководного бурения [Backman et al., 2008].

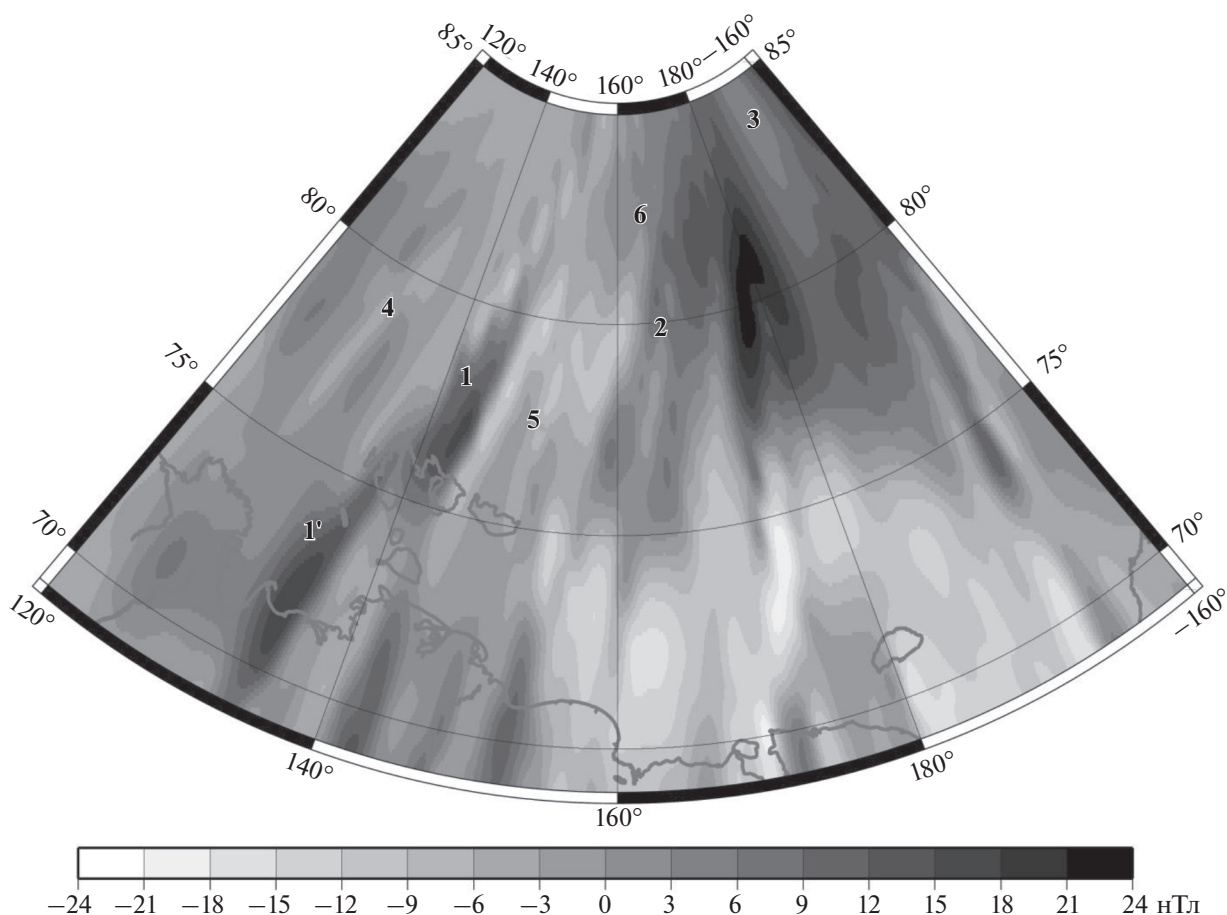


Рис. 2. Распределение модуля полного вектора T_a поля литосферных магнитных аномалий на высоте спутника CHAMP ~280 км над акваторией СЛО. Цифры соответствуют положению магнитных аномалий над структурами: 1 – хребет Ломоносова; 1' – продолжение аномалии хребта Ломоносова над континентальной областью Евразии; 2 – поднятие Менделеева; 3 – поднятие Альфа; 4 – котловина Амундсена; 5 – котловина Подводников; 6 – котловина Макарова.

Магнитная аномалия, топографически приуроченная к этой области, состоит из двух сегментов (рис. 2 и 3). Северная часть (обозначена цифрой 1 на рис. 2), максимальные амплитуды которой составляют ~12–14 нТл, продолжается к северу от Новосибирских островов. Восточная граница данной аномалии четко прослеживается на всем протяжении, причем характеризуется значительным градиентом амплитуды, в то время как с западной стороны границы размыты, особенно в южной части. К югу от Новосибирских островов на рис. 3 прослеживается вторая часть протяженной магнитной аномалии (обозначена цифрой 1' на рис. 2), имеющая продолжение над континентальной Евразией. Аномалии несколько смещены друг относительно друга в зоне сочленения, но имеют сопоставленное простираание. Границы аномалии 1, как и в предыдущем сегменте 1', менее четкие с левой стороны и предельно четкие с правой, что свидетельствует о высоком градиенте амплитуды магнитного поля с восточной стороны. Обе части рассматриваемой

положительной аномалии достигают значительных для такой высоты наблюдения амплитуд – около 16–17 нТл. Данный факт свидетельствует о том, что участок земной коры, магнитным образом которой они являются, обладает большой мощностью магнитоактивного слоя, и изотермическая поверхность Кюри магнетита залегает здесь на значительной глубине, что характерно для свойств коры континентального типа. Рельеф дна в направлении движения от хребта Ломоносова к матерiku также подтверждает, что хребет вполне может рассматриваться как естественное продолжение континентальной окраины.

Обнаружение южного сегмента литосферной магнитной аномалии является дополнительным подтверждением существующих в настоящее время представлений о том, что в области сопряжения с Евразией подножие и склон хребта Ломоносова морфологически связаны с континентальной окраиной и являются ее продолжением.

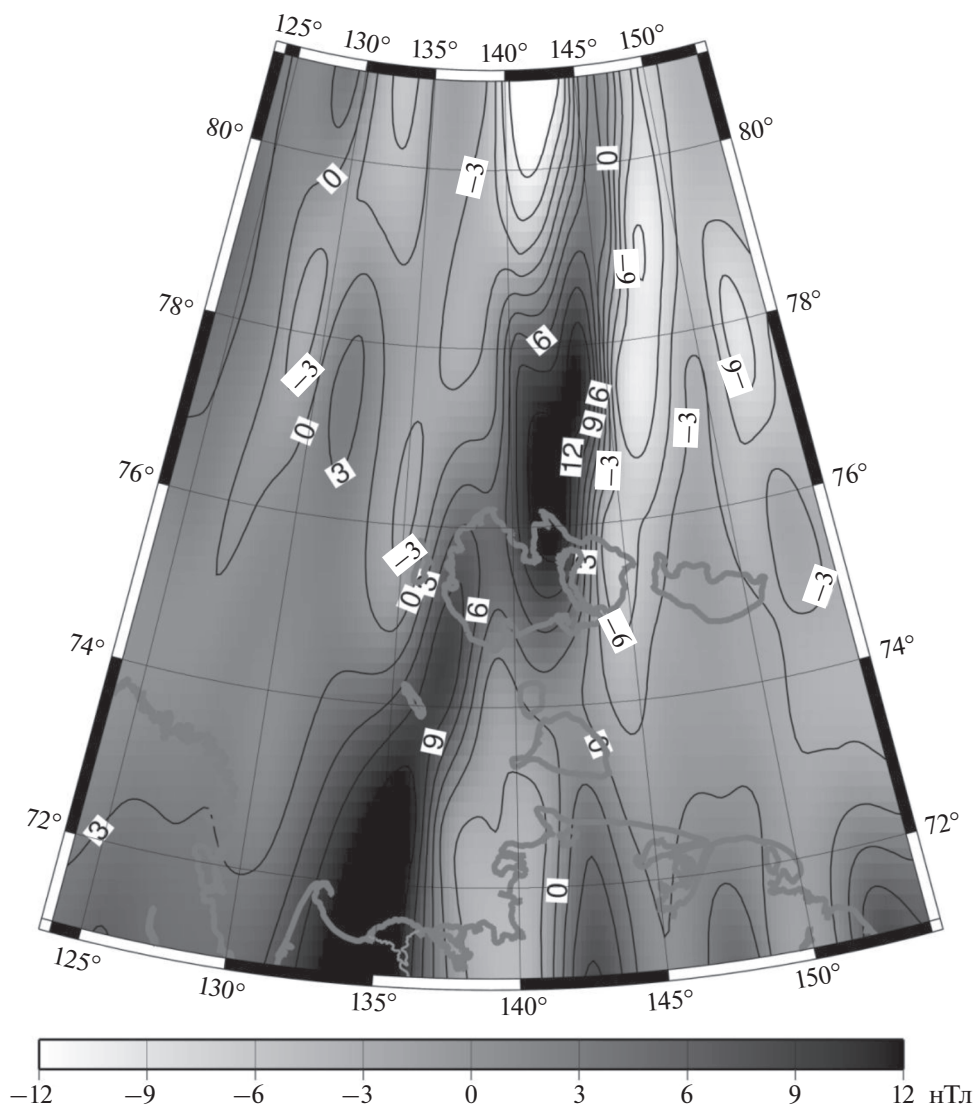


Рис. 3. Карта модуля полного вектора T_a аномального магнитного поля на высоте орбиты CHAMP ~280 км над территорией хребта Ломоносова. Медианное осреднение по блокам размером 20×20 км средствами GMT (Wessel, Smith, 2007).

5.2. Восточная часть Северного Ледовитого океана

На рисунке 4 более подробно показан сегмент карты модуля полного вектора T_a аномального магнитного поля для сектора $160^\circ \text{ E} - 170^\circ \text{ W}$ по широте и $76^\circ - 84^\circ \text{ N}$ по долготе на высоте спутника CHAMP ~280 км над восточной частью территории СЛО.

Значительная по площади и достаточно существенная для такой высоты наблюдений по амплитуде (~20 нТл) аномальная область положительных значений магнитного поля над поднятием Менделеева и примыкающим к нему поднятием Альфа выглядит здесь практически единым блоком. Такая значительная по амплитуде магнитная

аномалия свидетельствует о наличии в литосфере магнитоактивного слоя большой мощности и глубоком положении изотермической поверхности Кюри магнетита, как правило, характерным для природы континентальной коры.

Поднятие Альфа достаточно хорошо исследовано геофизическими методами. Гравиметрические данные указывают на проблематичность определения типа коры в этой области [Alvey et al., 2008]. Установлено, что мощность коры здесь изменяется в диапазоне от 20–25 км до 40 км [Asudeh et al., 1988]. Формирование таких структур чаще всего связывается с выплавлением базальтовых магм из крупных мантийных плюмов, поступивших из глубины к океанической литосфере вблизи осей спрединга [MacLennan

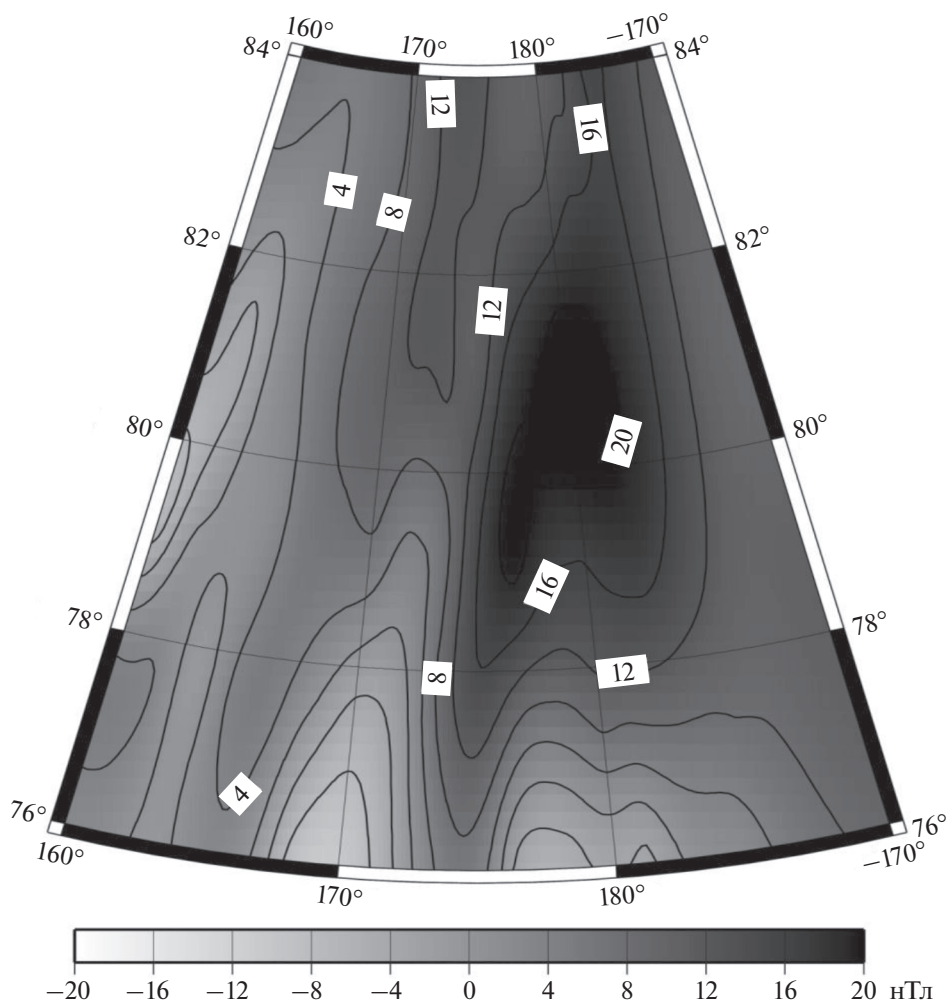


Рис. 4. Карта модуля полного вектора T_a аномального магнитного поля на высоте орбиты CHAMP ~280 км над территорией поднятий Менделеева-Альфы. Медианное осреднение такое же, как на рис. 3.

et al., 2001; Sobolev et al., 2007]. Однако результаты анализа данных аэромагнитной съемки свидетельствуют о том, что, по крайней мере, южная часть хребта Альфа и большая часть области между ней и хр. Ломоносова представляют собой сильно ослабленную континентальную кору, сформированную полифазным вулканическим распадом в мезозое [Døssing et al., 2013; Gaina et al., 2014].

Регион поднятия Менделеева изучен значительно слабее. Часть исследователей [Lawver et al., 2002] полагает, что эта структура с сильно повышенной мощностью коры представляет собой след на океанической коре горячего пятна, с которым были связаны мощные излияния траппов на Сибирской платформе. В то же время сейсмическое профилирование, проведенное вкост хребта Менделеева на широте 82° N, предоставило доказательства существования континентальной коры мощностью, по меньшей мере, порядка

32 км на части хребта Менделеева [Lebedeva–Ivanova et al., 2006].

Таким образом, единого взгляда на строение литосферы рассматриваемого региона на данный момент нет. Полученная нами по экспериментальным геомагнитным данным спутника CHAMP модель распределения поля литосферных магнитных аномалий восточной части СЛО свидетельствует в пользу континентального типа коры рассмотренных структур данного региона. По-видимому, “поднятие Менделеева и котловина Макарова принадлежат к тому же классу структур на континентальной коре” и подстилаются корой континентального типа, ввиду того, что “история развития погружения этих областей была типична для континентальной коры и не характерна для коры океанического типа” [Артюшков, 2010].

Эта гипотеза согласуется также с моделью земной коры в глубоководной части СЛО по результатам 3-D гравитационного моделирования, со-

гласно которой область центральных арктических поднятий Менделеева и Альфа выглядит единой блоковой структурой с утолщенной корой. Ее суммарная мощность здесь меняется от 24 до 30 км и достигает максимальных значений более 30–32 км, соответственно, при приближении к континентальным шельфам России и Канады [Глебовский и др., 2013].

6. ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что поле длиннопериодных литосферных магнитных аномалий Северного Ледовитого океана (СЛО) представляет собой сложный комплекс положительных и отрицательных сегментов различной формы и амплитуды. Такое распределение отображает сложное тектоническое строение дна СЛО, состоящего из молодых и древних океанических бассейнов и разбросанных среди них континентальных блоков, которые являются, как полагают, осколками суперконтинента Родиния, распавшегося в позднем протерозое [Metelkin et al., 2011].

Анализ полученного по экспериментальным данным спутника CHAMP распределения поля региональных магнитных аномалий не противоречит современным геолого-геофизическим представлениям о строении литосферы Северного Ледовитого океана. Построенная нами модель аномального магнитного поля восточной части СЛО свидетельствует в пользу континентального типа коры рассмотренных структур данного региона. В предположении, что магнитные сегменты являются образами структур, лежащих в нижних слоях земной коры, значительная по площади и амплитуде положительная магнитная аномалия над поднятием Менделеева и примыкающим к нему поднятием Альфа позволяет считать эти структуры генетически связанным единым блоком.

Продолжение литосферной магнитной аномалии хребта Ломоносова к югу на территорию Евразии является подтверждением существующих представлений о том, что в области сопряжения с Евразией подножие и склон хребта Ломоносова морфологически связаны с континентальной окраиной.

Использование данных спутниковой геомагнитной съемки представляется одним из наиболее информативных и доступных геофизических подходов изучения глубинного строения Земли над труднодоступными регионами, одним из которых является Арктика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– *Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В.* Корреляция литосферных магнитных аномалий и тектонических структур в норвежско-гренландской части

Арктики // *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 9. № 4. С. 1163–1172. 2018а.

– *Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В.* Морфология региональных магнитных аномалий Байкальской рифтовой зоны и окружающих ее территорий // *Геофиз. исслед.* Т. 19. № 4. С. 31–45. 2018б.

– *Артюшков Е.В.* Континентальная кора на хребте Ломоносова, поднятии Менделеева и в котловине Макарова. Образование глубоководных впадин в неогене // *Геология и геофизика*. Т. 51. № 11. С. 1515–1530. 2010.

– *Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю.* Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // *Геология и геофизика*. Т. 54. № 8. С. 1083–1107. 2013.

– *Глебовский В.Ю., Астафурова Е.Г., Черных А.А., Корнева М.С., Каминский В.Д., Поселов В.А.* Мощность земной коры в глубоководной части Северного Ледовитого океана: результаты 3-D гравитационного моделирования // *Геология и геофизика*. Т. 54. № 3. С. 327–344. 2013.

– *Добрецов Н.Л., Полянский О.П., Ревердатто В.В., Бабичев А.В.* Динамика нефтегазоносных бассейнов в Арктике и сопредельных территориях как отражение мантийных плюмов и рифтогенеза // *Геология и геофизика*. Т. 54. № 8. С. 1145–1161. 2013.

– *Поселов В.А., Грамберг И.С., Мурзин Р.Р., Буценко В.В., Каминский В.Д., Сорокин М.Ю., Погребницкий Ю.Е.* Структура и границы континентальной и океанической литосферы Арктического бассейна. Под ред. И.С. Грамберга, В.С. Суркова // *Российская Арктика*. СПб. ВНИИОкеаногеоология. С. 49–62. 2002.

– *Поселов В.А., Аветисов Г.П., Буценко В.В., Жолондз С.М., Каминский В.Д., Павлов С.П.* Хребет Ломоносова как естественное продолжение материковой окраины Евразии в Арктический бассейн // *Геология и геофизика*. Т. 53. № 12. С. 1662–1680. 2012.

– *Филатова Н.И., Хаин В.Е.* Тектоника Восточной Арктики // *Геотектоника*. № 3. С. 3–29. 2007.

– *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.* V. 27. P. 310–321. 2008.

– *Asudeh, Green A.G., Forsyth D.A.* Canadian expedition to study the Alpha Ridge complex: results of the seismic refraction study // *Geophys. J. Intern.* V. 92. P. 283–302. 1988.

– *Backman J., Jakobsson M., Frank M. et al.* Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge // *Paleoceanography*. V. 23, PA1S03. 15 p. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007PA001476>

– *Bokelmann G.H.R., Wustefeld A.* Comparing crustal and mantle fabric from the North American craton using magnetics and seismic anisotropy // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 277[3–4]. P. 355–364. 2009.

– *Døssing A., Jackson H.R., Matzka J., Einarsson I., Rasmussen T.M., Olesen A.V., Brozena J.M.* On the origin of the Amerasia Basin and the High Arctic Large Igneous Province—Results of new aeromagnetic data // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 363. P. 219–230. 2013

- *Drachev S.S., Shkarubo S.I.* Tectonics of the Laptev Shelf, Siberian Arctic. In: Pease, V., Coakley, B. (Eds.), *Circum-Arctic lithosphere evolution*. Geological Society, London, Special Publications. V. 460. 2018. <https://doi.org/10.1144/SP460.15>
- *Gaina C., Medvedev S., Torsvik T.H., Koulakov I., Werner S.C.* 4D Arctic: A Glimpse into the Structure and Evolution of the Arctic in the Light of New Geophysical Maps, Plate Tectonics and Tomographic Models // *Surv Geophys.* V. 35. P. 1095–1122. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9254-y>
- *Gao G., Kang G., Li G., Bai C., Wu Y.* An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // *Acta Geodaetica et Geophysica.* V. 52[3]. P. 407–420. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z>
- *Grantz A., Pease V.L., Willard D.A., Phillips R., Clark D.* Bedrock cores from 89° North: implication of the geologic framework and Neogene paleoceanography of Lomonosov Ridge and a tie to the Barents shelf // *Geol. Soc. Amer. Bull.* V. 113. № 10. P. 1272–1281. 2001.
- *Hemant K., Maus S.* Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // *J. Geophys. Res.* V. 110. P. 1–23. 2005.
- *Lawver L.A., Grantz A., Gahagan L.M.* Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician // *Geol. Soc. Amer. Special Paper.* V. 360. P. 336–362. 2002.
- *Lebedev S., Schaeffer A.J., Fullea J., Pease V.* Seismic tomography of the Arctic region: inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere // Pease V., Coakley B. (Eds.), *Circum-Arctic lithosphere evolution*. Geological Society, London, Special Publications. V. 460. P. 419–440. 2017.
- *Lebedeva–Ivanova N.N., Zamansky Y.Y., Langinen A.E., Sorokin M.Y.* Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82 degrees N: evidence of continental crust // *Geophys. J. Int.* V. 165. P. 527–544. 2006.
- *Maclennan J., McKenzie D., Gronvold K.* Crustal accretion under northern Iceland // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 191. P. 295–310. 2001.
- *Maus S., Yin F., Lühr H., Manoj C., Rother M., Rauberg J., Michaelis I., Stolle C., Müller R.D.* Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* V. 9. Q07021. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008GC001949>
- *Metelkin D.V., Vernikovsky V.A., Kazansky A.Y.* Siberia – from Rodinia to Eurasia // *Tectonics.* P. 103–136. 2011.
- *Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S., Artemieva I.M., Sobolev N., Petrov E., Ernst R.E., Sergeev S., Smelror M.* Crustal structure and tectonic model of the Arctic Region. *Earth Sci. Rev.* V. 154. P. 29–71. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>
- *Reigber C., Lühr H., Schwintze P.* CHAMP mission status // *Adv. Space Res.* V. 30[2]. P. 129–134. 2002.
- *Roest W.R., Verhoef J., Macnab R.* Magnetic anomalies and tectonic elements of northeast Eurasia // *GSC Open File.* 2574. *Geol. Surv. of Can., Dartmouth N. S.*, 1995.
- *Seredkina A.* S-wave velocity structure of the upper mantle beneath the Arctic region from Rayleigh wave dispersion data // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 290. P. 76–86. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.03.007>
- *Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V. et al.* The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // *Science.* V. 316(5823). P. 412–417. 2007.
- *Vogt P.R., Taylor P.T., Kovacs L.C., Johnson G.L.* Detailed aeromagnetic investigation of the Arctic basin // *J. Geophys. Res.* V. 84. P. 1071–1089. 1979.
- *Wessel P., Smith W.H.F.* The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. <http://gmt.soest.hawaii.edu>