ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2020, № 6, с. 24–33

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА КАК ОБРАЗЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

© 2020 г. Д. Ю. Абрамова[a], *, С. В. Филиппов[a], Л. М. Абрамова[b]

[a] *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, г. Троицк, Россия*

[b] *Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, г. Троицк, Россия*

**E-mail: f.step2014@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.06.2020 г.

По измеренным на спутнике CHAMP геомагнитным данным построено пространственное распределение поля литосферных магнитных аномалий в районе расположения наиболее значимых тектонических структур восточной части Северного Ледовитого океана. Сформирована база данных параметров аномального литосферного магнитного поля на высоте наблюдения спутника CHAMP ~280 км за последние 6 месяцев его работы с учетом искажений магнитных полей, обусловленных влиянием полярного электроджета. Построены и приводятся карты модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a над рассматриваемой территорией различного масштаба и степени осреднения. Проанализировано пространственное распределение и возможная геологическая и физическая природа аномалий, являющихся образами наиболее значимых геолого-тектонических структур восточной части Северного Ледовитого океана. Оценки параметров магнитных аномалий, топографически приуроченных к поднятиям Менделеева и Альфа, а также Чукотскому куполу, указывают на единство и взаимосвязанность этих структур и подтверждают полученные по результатам предшествующих геолого-геофизических исследований доказательства наличия континентальной коры под хребтом Менделеева. Наблюденные над восточной частью территории Северного Ледовитого океана аномалии литосферного магнитного поля, отражающие современное положение тектонических структур и их физические свойства, вполне соответствуют современным представлениям о строении земной коры региона, и, таким образом, могут успешно анализироваться в комплексе с данными других геофизических методов для дальнейших исследований. Работа показывает перспективность использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля при изучении региональной тектоники и картирования глубинных неоднородностей литосферы труднодоступных территорий.

Ключевые слова: спутник CHAMP, литосферные магнитные аномалии, полярная Арктика, поднятие Менделеева-Альфа, котловина Подводников, Чукотский купол

DOI: 10.31857/S0205961420050024

ВВЕДЕНИЕ

Потребности в ресурсах в настоящее время, в том числе, связанные с поисками и разведкой месторождений нефти и газа и их дальнейшим освоением, делают изучение глубинного строения дна Северного Ледовитого океана (СЛО) и прилегающих территорий важным и весьма актуальным. И хотя очевидно, что проведение любого рода исследований в полярном регионе существенно ограничивается технической сложностью и высокими затратами, изучение Арктики геофизическими методами в последние десятилетия ведется достаточно активно (Филатова, Хаин, 2007; Alvey et al., 2008; Артюшков, 2010; Поселов и др., 2012; Добрецов и др., 2013; Верниковский и др., 2013; Миловский и др., 2013; Gaina et al., 2014).

Значительную роль в обновлении и уточнении глобальных и региональных карт таких труднодоступных территорий в дополнение к накоплению новых данных приповерхностных наблюдений играет и постоянное улучшение качества и увеличение количества спутниковых наблюдений. Совместные международные работы способствуют созданию расширенных баз данных для этого полярного региона. В частности, для изучения магнитных аномалий оказались чрезвычайно полезными такие международные проекты как WDMAM и CAMP-GM (Korhonen et al., 2007; Gaina et al., 2011). При этом поступающая информация указывает

на гораздо более сложную структуру арктической литосферы, чем предполагалось ранее (Hemant, Maus, 2005; Абрамова и др., 2020).

В последние десятилетия именно спутниковая магнитная съемка стала одним из наиболее доступных геофизических методов изучения глубинного строения полярной Арктики. Она позволяет получать качественные высокоточные данные там, где наземные и морские измерения отсутствуют, причем делать это возможно на различных по высоте уровнях наблюдений над земной поверхностью. Использование разновысотных магнитных данных , предоставляющих информацию о характере затухания поля с высотой, позволяет более точно провести оценку глубин залегания источников аномального магнитного поля (АМП) и положения изотермической поверхности Кюри (Gao et al., 2016). Необходимо отметить, что исследование магнитных аномалий на территории Арктики, базирующееся на спутниковых наблюдениях геомагнитного поля, серьезно осложнено в связи с тем, что измерения проводятся в высоких широтах, в зоне влияния сложных динамичных ионосферных токовых систем (полярного электроджета). Это приводит к необходимости существенной корректировки и усложнению технологии обработки экспериментального материала, полученного со спутника в полярном регионе.

Карты распределения магнитных аномалий используются и при исследовании корово-мантийного взаимодействия литосферных плит, поскольку разным типам тектонических процессов, происходящих в литосфере, соответствуют различные особенности магнитных аномалий (Nakanishi et al., 1992; Roest et al., 1995; Saltus, Hudson, 2007; Bokelmann, Wustefeld, 2009; Абрамова и др., 2011, 2018). Это дает возможность трассировать тектонические границы, такие как, например, разделы между зонами континентальной и океанической коры, между океаническими блоками с намагниченностью различной полярности, а также выделять иные тектонические структуры. Крупномасштабные аномалии литосферного магнитного поля (*lithospheric magnetic anomalies*) протяженностью в первые сотни километров наиболее качественно могут быть выделены именно из спутниковых геомагнитных данных, что позволяет исследовать закономерности распределения самых глубоко погруженных намагниченных объектов (Hemant, Maus., 2005; Абрамова Д., Абрамова Л., 2014; Абрамова и др., 2020). Тем не менее, несмотря на активный интерес к исследованиям региона, консенсус в объяснении всех наблюдаемых геологических и геофизических процессов в регионе СЛО пока еще не достигнут.

Настоящая работа направлена на изучение пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий в восточной части СЛО, включающей крупнейшие структуры: поднятия Менделеева-Альфа, Чукотский купол, котловины Подводников и Макарова, и исследование генетической связи этих структур с континентальным обрамлением Евразии непосредственно по экспериментальным данным спутника CHAMP.

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СПУТНИКЕ CHAMP

Возможность анализа литосферных магнитных аномалий существенно расширилась благодаря запуску в 2000 г. на высоту 456 км специального германского искусственного спутника Земли CHAMP, поставлявшего высокоточные геомагнитные данные практически в масштабе реального времени (Reigber et al., 2002). Несмотря на периодически снижающуюся траекторию полета, миссия просуществовала в два раза дольше запланированного срока благодаря устойчивой и надежной конструкции. Последние данные поступили с высоты орбиты 250 км в сентябре 2010 г.

На борту аппарата проводились измерения параметров магнитного и гравитационного полей Земли, а также осуществлялось оптическое зондирование атмосферы. Околополярная круговая орбита CHAMPa с углом наклона 87.3° была специально рассчитана так, чтобы измерения поля в узлах равномерной широтно-долготной сетки при каждом пролете спутника проводились в разное локальное время, что, в частности, дает возможность выбирать для исследований временные интервалы, в которых влияние ионосферных токовых систем наименьшее. Также, поскольку рабочая высота спутника в разные годы изменялась в интервале 450–250 км, имеется возможность подобрать массивы площадных высокоточных данных, полученных на разных по высоте уровнях наблюдения, а низкая по сравнению с другими миссиями высота орбиты в последний год существования спутника увеличивает разрешение измеряемых параметров.

На спутнике CHAMP работали два магнитометра: скалярный OVM, регистрировавший амплитуды модуля полного вектора геомагнитного поля (T) и феррозондовый FGM, измерявший три ортогональных векторных компоненты (X, Y, Z). Данные имели секундное разрешение по времени, что составляет в пространстве ~7 км. Точность измерений модуля полного вектора геомагнитного поля составила ±0.5 нТл, компонент – ± 3 нТл.

СВЯЗЬ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ С ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ ЛИТОСФЕРЫ

Известно, что измерение геомагнитного поля на спутниковых высотах аналогично пересчету в

верхнее полупространство является “фильтром низких частот”, т.е. подавляет локальные аномалии и сохраняет в мало искаженном виде региональные и глобальные составляющие. Скорость затухания амплитуды магнитных аномалий с высотой, в первую очередь, определяется параметрами источников литосферных аномалий: чем больше глубина залегания намагниченного тела и его вертикальные и горизонтальные размеры, тем она меньше. Таким образом, в геомагнитных данных спутниковых наблюдений естественным образом проявляются аномалии, вызванные крупномасштабными структурами, которые залегают на больших глубинах.

Анализ построенных карт АМП подтвердил, что спутниковые наблюдения малочувствительны к поверхностным структурам. В диапазоне высот порядка 250–400 км над поверхностью Земли фиксируются, в основном, низкочастотные литосферные магнитные аномалии интенсивностью порядка единиц–первых десятков нТл, пространственные размеры которых составляют ~200–500 км (сравнимые с высотой измерений). (Hemant, Maus, 2005; Абрамова и др., 2011; Gao et al., 2016).

Источники аномалий магнитного поля континентальной литосферы сконцентрированы в так называемом магнитоактивном слое. Литосферные магнитные аномалии могут быть вызваны как изменением средней эффективной намагниченности блоков крупных участков литосферы, так и изменением мощности ее магнитоактивного слоя. При этом наибольшую роль играет степень намагниченности именно нижней части земной коры. Исследования показали, что такие крупные тектонические единицы, как щиты, кратоны и зоны субдукции, характеризуются положительными значениями аномалий магнитного поля, вызванными повышенной магнитной восприимчивостью пород, а бассейны и абиссальные равнины – отрицательными значениями аномалий, причиной возникновения которых считается утонение коры и поднятие поверхности изотермы Кюри (Hemant, Maus, 2005; Hemant et al., 2005).

Различие магнитного отклика обособленных областей земной коры, возникающее вследствие контраста минералогического состава и степени намагниченности составляющих их слоев, позволяет фиксировать тектонические границы различного вида, такие как разделы между континентальной и океанической зонами, между океаническими блоками различной полярности намагниченности, а также выделять иные тектонические особенности (зоны разломов, активные или спокойные границы плит и т.п.). На континентах доминирующим является эффект индуцированной намагниченности, причем незначительная остаточная намагниченность континентальной коры менее существенна в ее нижней части, по сравнению с верхней (Shive et al., 1992). Иная ситуация присутствует под океанами, где магнитные аномалии являются суперпозицией индуцированной и остаточной намагниченностей.

ОТБОР, ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Следует отметить, что обработка спутниковых наблюдений в высоких широтах, в частности, выделение из измеренных значений геомагнитного поля компонент, характеризующих магнитное поле литосферы, имеет серьезные ограничения в связи с тем, что измерения проводятся в зоне воздействия на магнитометры сложных, динамично меняющихся во времени ионосферных токовых систем. По этой причине почти 35% данных спутника CHAMP для исследуемой территории было отбраковано ввиду низкого соотношения сигнал/шум и присутствия помех от полярного электроджета (отбраковка базировалась на среднеквадратичных отклонениях значений поля на соседних витках).

Основная трудность использования экспериментальных спутниковых данных для построения пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий заключается в корректном его выделении из суммарного, измеренного на спутнике геомагнитного поля, представляющего собой сумму полей различных физических источников:

– главного поля, генерируемого в жидкой части земного ядра;

–полей от токов в проводящих слоях земной коры и верхней мантии;

– внешних полей магнитосферно-ионосферных токовых систем;

и, наконец, искомого аномального магнитного поля, связанного с намагниченностью горных пород земной литосферы.

Технология и особенности выделения параметров поля литосферных магнитных аномалий из суммарно измеренного подробно описана в наших публикациях, например, (Абрамова и др., 2018). Вкратце, для аппроксимации главного поля мы используем среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ) (Головков и др., 2007) 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. Уменьшить искажающее влияние второй и третьей составляющих суммарного поля помогает использование экспериментальных данных толь-

ко для витков, совершаемых спутником в ночное время (*LT* от 22.00 до 6.00 ч) и только в спокойные в магнитном отношении дни (магнитные индексы $k_p \le 1$ и $D_{st} \le 20$). Проведенные нами ранее оценки показали, что данный подход не приводит к понижению точности определения значений аномального поля, но существенно снижает время обработки.

При анализе аномального магнитного поля над восточной частью СЛО были отобраны и обработаны геомагнитные данные, равномерно покрывающие сектора 140–180° E/60–88° N и 140–180° W/60–88° N. В результате создана база данных параметров магнитного поля за 6 месяцев работы CHAMP в 2010 г., когда снизившаяся до 280–290 км альтитуда орбиты позволяла получать значимые (повышенные примерно в 2–3 раза по сравнению со стандартной высотой полета) величины амплитуд. Количество использованных для анализа значений составило ~9000.

Для проверки надежности получаемых данных расчет традиционно производился для нескольких независимых наборов спутниковых данных. Сравнение подтвердило достаточно надежное воспроизводство морфологии и амплитуд полученных магнитных аномалий. Детальность построения пространственного распределения поля литосферных магнитных аномалий соответствует масштабу основных тектонических структур региона.

ОБЩИЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

В обзоре (Gaina et al., 2014) приведена подробная информация о геолого-тектонических исследованиях Северного Ледовитого океана и сделано заключение, что регион “представляет собой “коллаж, состоящий из молодых и более старых океанических бассейнов”. Примерно половина площади дна акватории представлена шельфовыми участками с предположительно континентальным типом коры. Сложное блочное строение коры и литосферы СЛО иллюстрирует и представленная на рис. 1 карта (Amante, Eakins, 2009).

В настоящее время нет единого мнения о происхождении бассейна и природе земной коры Северного Ледовитого океана (принадлежит ли она континентальному или океаническому типу). Ряд исследователей считает, что, поскольку на основной части СЛО земная кора значительно мощнее (~20–30 км), чем это принято для территорий Мирового океана (~7 км), и включает в себя гранитный слой мощностью до ~12 км, ее необходимо относить к континентальному типу (Филатова, Хаин, 2007; Поселов и др., 2002, 2012; Артюшков, 2010).

При проведении геолого-геофизических исследований обнаружены реликты древней платформы, изменившей форму под влиянием тектонических процессов, одним из останцов которой считается регион Центрально-Арктических поднятий с сохранившимися палеозойскими и мезозойскими толщами. Так в восточной части Арктического бассейна под слоем воды толщиной от 1 до 4 км расположены крупные поднятия Менделеева и Альфа, отделенные от хребта Ломоносова котловинами Макарова и Подводников, и Чукотское плато. Принято считать, что кора этих областей представлена породами континентального типа с характеристиками, подобными наблюдаемым в пределах Северо-Американского, Восточно-Европейского и Сибирского кратонов, и является, по-видимому, осколками суперконтинента Родиния, распавшегося в позднем протерозое 950–830 млн лет тому назад (Metelkin et al., 2011). Расположенные к северу от Чукотского моря Хребет Нортвинд и Чукотское плато, затонувшие рифтовые плато, также идентифицированы как структуры с континентальной корой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a над восточной частью Северного Ледовитого океана на высоте наблюдения спутника CHAMP ~280 км приведено на рис. 2. При построении карты использовано медианное осреднение по блокам размером 80 × 80 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Обозначенные буквами на рис. 2 аномальные магнитные сегменты являются образами геолого-тектонических структур, лежащих в нижних слоях земной коры. Необходимо заметить, что условное понятие “над структурой” далее подразумевает только топографическую приуроченность, поскольку размеры видимых на поверхности структур (например, хребта Ломоносова) могут в значительной мере отличаться от параметров намагниченных объектов, залегающих в нижней части коры, отражением которых является литосферное магнитное поле.

В рассматриваемом секторе СЛО области положительных и отрицательных значений литосферного магнитного поля занимают примерно равные площади, наблюдаемые положительные аномалии различны по форме и интенсивности. К югу от крупного конгломерата положительных аномалий наблюдается обширная область отрицательных значений, простирающаяся до береговой линии Евразии.

Наиболее внушительным по площади, практически единым положительным сегментом, является аномальная область над поднятием Мен-

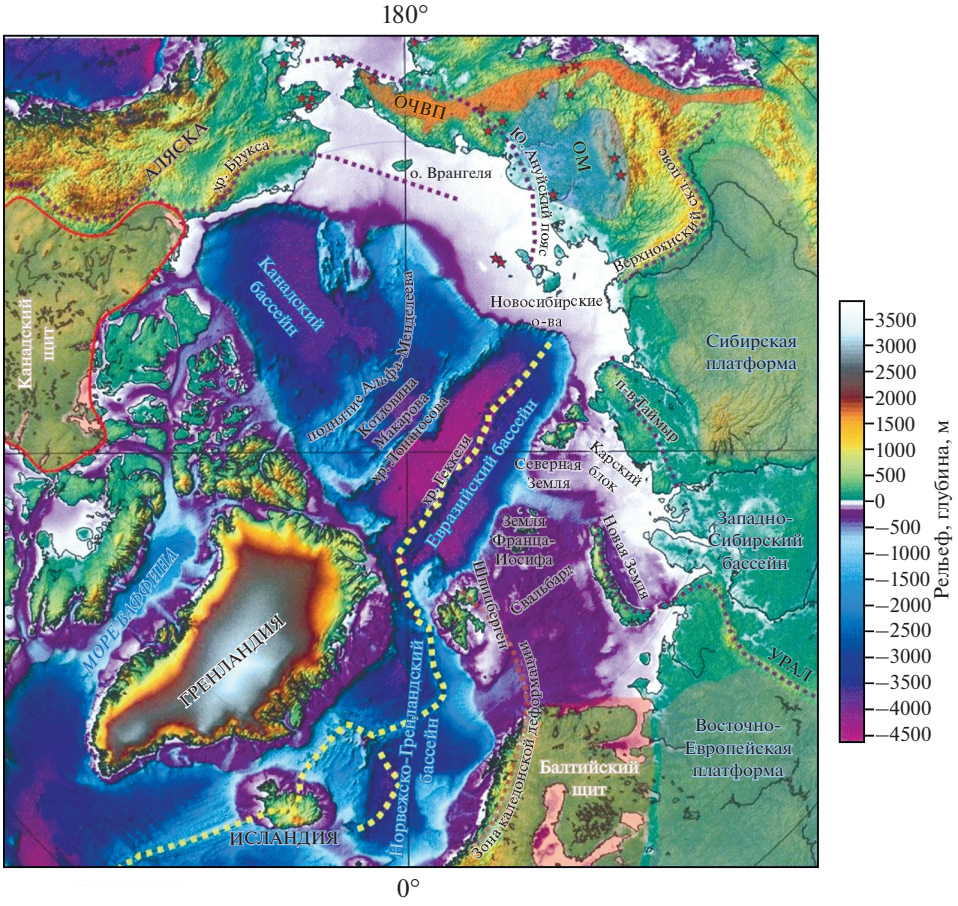

Рис. 1. Топография/батиметрия и основные тектонические/географические элементы изучаемого региона. Желтый пунктир – положение океанических хребтов; синий пунктир – границы основных складчатых поясов. Красными звездочками обозначены проявления современного кайнозойского вулканизма на Чукотке, Якутии и Аляске. ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканический пояс; ОМ – Омолонский массив (Amante, Eakins, 2009).

делеева (ПМ) и примыкающим к нему поднятием Альфа (ПА), что хорошо согласуется с результатами трехмерного гравитационного моделирования, где область центральных арктических поднятий Менделеева и Альфа также выглядит единой блоковой структурой с утолщенной корой (Глебовский и др., 2013).

Области арктических поднятий Менделеева и Альфа характеризуются достаточно высокой (принимая во внимание высоту наблюдений) амплитудой аномального поля с положительными значениями порядка 20 нТл, что указывает на существование в нижней части земной коры магнитоактивного слоя большой мощности и глубокого положения изотермической поверхности Кюри магнетита, свидетельствуя в пользу наличия континентального типа коры.

Предшествующими исследованиями установлено, что поднятие Альфа подстилается мощной корой от 20–25 до 40 км (Asudeh et al., 1988). Это связано, по-видимому, с выплавлением базальтовых магм из мощных мантийных плюмов, поднимавшихся в зонах спрединга из мантийных глубин к океанической литосфере (Maclennan et al., 2001; Sobolev et al., 2007). При этом данные аэромагнитной съемки свидетельствуют о том, что южная часть хребта Альфа и большая часть котловины (КМ) между ней и хребтом Ломоносова представляют собой сильно ослабленную континентальную кору, сформированную полифазным вулканическим распадом в мезозое (Dossing et al., 2013; Gaina et al., 2014). На карте распределения аномального магнитного поля (рис. 2) эти области характеризуются постепенным понижением значений амплитуд T_a практически до нулевых значений, что вполне согласуется с данным утверждением.

Относительно региона поднятия Менделеева также имеются доказательства существования континентальной коры мощностью, по меньшей мере, порядка 32 км, полученные методом сейсмического профилирования, проведенного вкрест хребта на широте 82° N (Lebedeva-Ivanova et al., 2006).

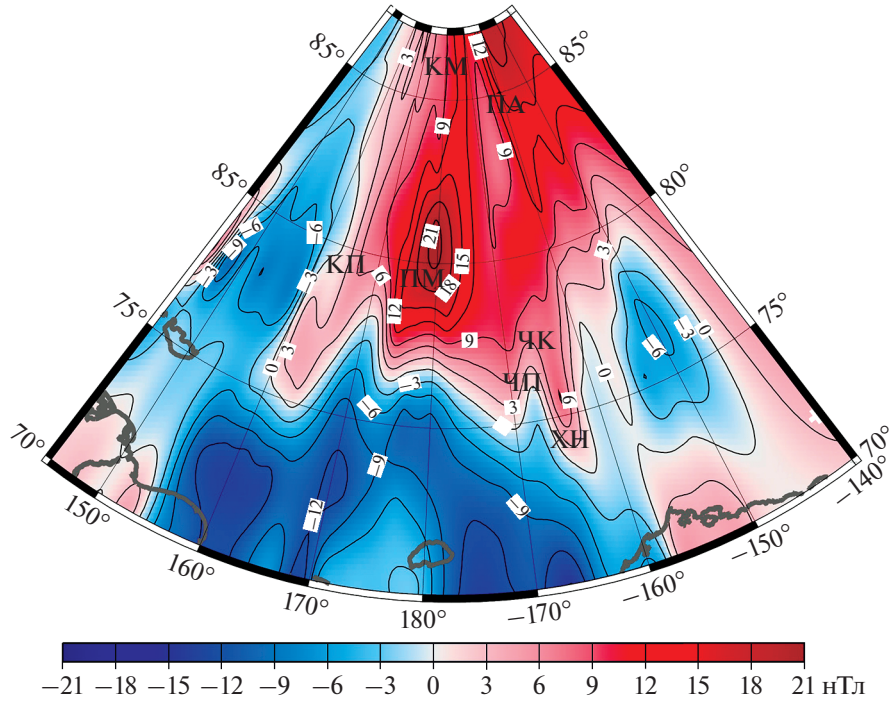

Рис. 2. Карта модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a на высоте спутника CHAMP ~280 км над восточной частью СЛО, КП – котловина Подводников, КМ – котловина Макарова, ПМ – поднятие Менделеева, ПА – поднятие Альфа, ЧК – Чукотский купол, ЧП – Чукотское плато, ХН – хребет Нордвинд.

Наиболее мощная земная кора наблюдается на поднятиях Чукотского купола: хребте Нордвинд и Чукотском плато: ее суммарная мощность достигает 34 км, а мощность консолидированной части превышает 32 км. В этом сегменте полученные нами параметры аномального литосферного поля и имеющиеся данные о значительной мощности коры, казалось бы, вступают в противоречие: аномальное поле здесь расчлененное, достаточно слабое по амплитуде, переходит в южном направлении к отрицательным значениям.

Объяснение этого факта заключается в следующем. Данными сейсмической томографии (Яковлев и др., 2012) выявлено, что наблюдаемые под Чукоткой, Якутией и Аляской низкоскоростные аномалии отражают присутствие относительно тонкой сильно деформированной пластичной литосферы, что вызвано, по-видимому, умеренно протекающими коллизионными процессами. Также с низкоскоростными аномалиями скоростной модели хорошо совпадают очаги современного вулканизма Якутии и прилегающих шельфов (Акинин и др., 2008), что, вероятно, указывает на мантийную природу этих вулканов (перегретая мантия, проявления мантийного плюма и т.п.). Данные низкоскоростные аномалии связаны с дополнительным прогревом литосферы в регионе, что вызывает, в том числе, изменение положения изотермической поверхности Кюри магнетита и потерю магнитных свойств коры. Уменьшение значений амплитуды магнитных аномалий в южном направлении и изменение их знака на отрицательный обусловлены именно этими процессами.

Котловина Подводников (КП) расположена между хребтом Менделеева, Восточно-Сибирским Шельфом и хребтом Ломоносова, котловина Макарова (КМ) – практически в полярной области, с ее северным продолжением граничат хребет Ломоносова и поднятие Альфа.

Результаты сейсмических исследований свидетельствуют о мощности земной коры в котловине Макарова, достигающей значений 16–22 км, и части котловины Подводников: от 16 до 20 км (Sorokin et al., 1999; Lebedeva-Ivanova et al., 2006). Полученные положительные значения амплитуд аномального магнитного поля для этих территорий (рис. 2) вполне согласуются с приведенными цифрами.

В силу специфики измерений в полярной шапке (траектории спутниковых витков), оказалось возможным зафиксировать лишь южную часть литосферной аномалии, отражающей магнитное поле котловины Макарова: здесь оно имеет положительные значения, возрастающие до 9–12 нТл в восточном направлении. В области, располо-

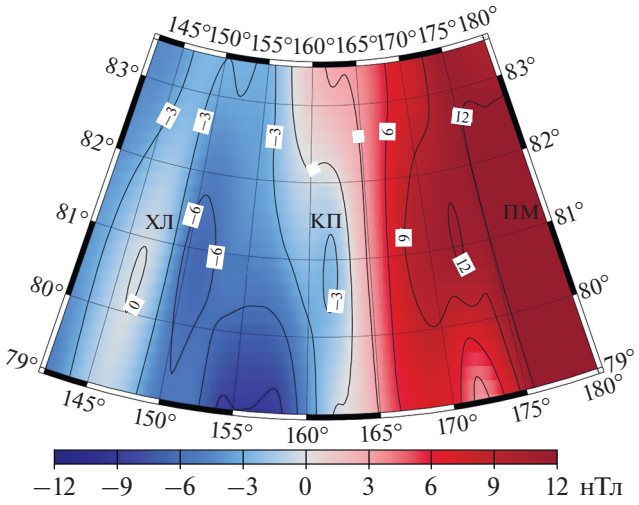

Рис. 3. Карта модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a на высоте спутника CHAMP ~280 км над котловиной Подводников, ХЛ – хребет Ломоносова, КП – котловина Подводников, ПМ – поднятие Менделеева.

женной южнее котловины Подводников, спутниковые данные позволяют рассмотреть поле литосферных магнитных аномалий более детально. На приведенной карте модуля полного вектора поля T_a, построенной на высоте спутника CHAMP ~280 км над котловиной Подводников (рис. 3), видно, что в рассматриваемом секторе значения литосферного поля плавно меняются с запада на восток в направлении от хребта Ломоносова к поднятию Менделеева с отрицательных к положительным.

Нулевые значения магнитного поля приходятся примерно на меридианы 165°–160° E. Литосферное магнитное поле над восточной частью котловины, примыкающей к сегменту Альфа–Менделеева, положительное, его значения достигают 10–12 нТл. Такое пространственное распределение литосферного магнитного поля, особенно в части котловины, прилегающей к поднятию Менделеева–Альфа, свидетельствует в пользу континентального типа коры рассмотренных структур. По мнению Е.В. Артюшкова (Артюшков, 2010), “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”.

Таким образом, хотя единого взгляда на строение литосферы рассматриваемого региона на данный момент не существует, полученная нами по экспериментальным геомагнитным данным спутника CHAMP модель распределения поля литосферных магнитных аномалий восточной части СЛО вполне согласуется с современными представлениями о строении литосферы данной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карты поля литосферных магнитных аномалий над восточной частью Северного Ледовитого океана, построенные по данным измерений на спутнике Земли CHAMP, адекватно отражают сложную тектонику СЛО, состоящую из молодых и древних океанических бассейнов и разбросанных среди них континентальных блоков, которые являются, как полагают, осколками суперконтинента Родиния, распавшегося в позднем протерозое.

Анализ полученного пространственного распределения аномального магнитного поля территории СЛО демонстрирует его соответствие современным геолого-геофизическим представлениям о строении земной коры региона. Параметры литосферных магнитных аномалий, топографически приуроченных к поднятиям Менделеева и Альфа, а также Чукотскому куполу, указывают на то, что данные структуры представляют собой единый ансамбль. Особенности поля литосферных магнитных аномалий над котловиной Подводников подтверждают существующий в настоящее время взгляд на типизацию земной коры данной области СЛО.

Использование измеренных на спутнике геомагнитных данных создает основу для более обширного и детального изучения магнитных аномалий Арктики. Наблюденные параметры литосферного магнитного поля, отражающие современное положение тектонических структур и их физические свойства, могут быть успешно использованы в комплексе с другими методами для геолого-геофизического исследования региона. Работа показывает перспективность использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля для изучения региональной тектоники, глубинного картирования неоднородностей литосферы труднодоступных территорий.

Карты аномального магнитного поля построены с использованием программ GMT (Wessel, Smith, 2007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Филиппов С.В., Фрунзе А.Х. О перспективах использования спутниковых измерений для анализа региональных магнитных аномалий // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 1–11.

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 И.М., Филиппов С.В. Морфология региональных магнитных аномалий Байкальской рифтовой зоны и окружающих ее

территорий // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 31–45.

Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. О возможностях использования спутниковых геомагнитных наблюдений в исследовании геолого-тектонического строения литосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 2. С. 69–81.

Акинин В.В., Евдокимов А.Н., Кораго Е.А., Ступак Ф.М. Новейший вулканизм арктической окраины Северной Евразии // Изменение окружающей среды и климата; природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. II. Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М., ИГЕМ РАН, 2008. С. 41–80.

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.

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

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. 2013. Т. 54. № 3. С. 327–344.

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.

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. 2013. Т. 54. № 8. С. 1145–1161.

Миловский Г.А., Орлянкин В.Н., Ишмухаметова В.Т., Ненадов Я.В. Перспективы нефтегазоносности Лено-Анабарского прогиба и Оленекской зоны дислокаций по космическим и магнито-гравиметрическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 28–34.

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

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. 2012. Т. 53. № 12. С. 1662–1680.

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

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. № 10. С. 1261–1272.

Alvey A., Gaina C., Kusznir 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.

Amante Ch., Eakins B.W. ETOPO1. 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. 2009.

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

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. 2009. 277 [3–4]. P. 355–364.

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 and Planetary Science Letters. 2013. V. 363. P. 219–230.

Gaina C., Werner S.C., Saltus R., Maus S. Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic // Geol Soc. 2011. V. 35. P. 39–48.

Gaina C., Medvedev S., Torsvik T., Koulakov I., Werner S. 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. 2014. V. 35. P. 1095–1122.
https://doi.org/10.1007/s10712-013-9254-y

Gao Guoming, Guofa Kang, Guangquan Li, Chunhua Bai, Yingyan Wu. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // Acta Geod. et. Geoph. 2016.
https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z

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.

Korhonen J.V., Fairhead D., Hamoudi M., Hemant K., Lesur V., Mandea M., Maus S., Purucker M., Ravat D., Sazonova T., Thebault E. Magnetic anomaly map of the world. 2007 / CCGM-CGMW Comission for geological maps of the world. Paris.

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. 2006. V. 165. P. 527–544.

Maclennan J., McKenzie D., Gronvold K. Crustal accretion under northern Iceland // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. V. 191. P. 295–310.

Metelkin D.V., Vernikovsky V.A., Kazansky A.Y. Siberia – from Rodinia to Eurasia // Tectonics. 2011. P. 103–136.

Nakanishi M., Tamaki K., Kobayashi K. A new Mesozoic isochron chart of the northwestern Pacific Ocean: Paleomagnetic and tectonic implications // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19.
https://doi.org/10.1029/92GL00022

Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status. Advances in Space Research. 2002. V. 30 (2). P. 129–134.
https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4

Roest W.R., Verhoef J., Macnab R. Magnetic anomalies and tectonic elements of northeast Eurasia // GSC Open File. 1995. 2574. Geol. Surv. of Can, Dartmouth N. S.

Shive P.N., Blakely R.J., Frost B.R., Fountain D.M. Magnetic properties of the lower continental crust, in Continental Lower Crust / Founatin D.M., Arculus R., Kay R.W. Eds., Elsevier, New York. 1992. P. 145–177.

Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Arndt N.T., Chung S.L., Danyushevsky L.V., Elliott T., Frey F.A., Garcia M.O., Gurenko A.A., Kamenetsky V.S., Kerr A.C., Krivolutskaya N. A., Matvienkov V.V., Nikogosian I.K., Rocholl A., Sigurdsson I.A., Sushchevskaya N.M., Teklay M. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // Science. 2007. V. 316(5823). P. 412–417.

Sorokin M.Y., Zamansky Y.Y., Langinen A.Y., Jackson H.R., Macnab R. Crustal structure of the Makarov Basin, Arctic Ocean determined by seismic refraction // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 168. P. 187–199.

Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. http://gmt.soest.hawaii.edu.

Lithospheric Magnetic Anomalies of the Eastern Part of the Arctic Ocean as Image of Tectonic Structures

D. Yu. Abramova[1], S. V. Philippov[1], and L. M. Abramova[2]

[1]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,Moscow, Troitsk, Russia

[2]Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Troitsk, Russia

Geomagnetic data measured on the CHAMP satellite have been used to construct the spatial distribution of the lithospheric magnetic anomalies field in the region where the most significant tectonic structures of the eastern part of the Arctic Ocean are located. A database of the lithospheric magnetic anomalies field parameters at the height of the CHAMP observation ~280 km was compiled for the last 6 months of its operation taking into account the distortions of the magnetic fields due to the influence of the polar electrojet. The maps of the full vector module of the anomalous magnetic field T_a of various scales and degrees of averaging are constructed and presented for studied territory. The spatial distribution and the possible geological and physical interpretation of the images of the most significant geological and tectonic structures of the Eastern Arctic Ocean are analyzed. The structure of the magnetic anomalies field over the Mendeleev and Alpha ridges, the Chukchi plateau indicate the correlation and relationship of these structures and confirm the evidence of the continental crust existence under the Mendeleev ridge obtained from previous geological and geophysical studies. Anomalies of the lithospheric magnetic field observed over the eastern part of the Arctic Ocean reflect the current position and physical properties of tectonic structures and are in accordance with modern ideas about the structure of the earth's crust in this region. So they can be successfully analyzed in conjunction with data from other geophysical methods for further research. The availability of the satellite geomagnetic field observations in the study of regional tectonics and mapping of deep lithosphere heterogeneities over the hard-to-reach territories is shown.

Keywords: CHAMP satellite, lithospheric magnetic anomalies, polar Arctic, Mendeleev-Alpha Ridge, Podvodnikov basin, Chukchi Plateau

REFERENCES

Abramova D., Abramova L., Filippov S., Frunze A. O perspektivah ispolzovaniya sputnikovyh izmereniy dlya analiza regionalnyh magnitnyh anomaliy [On the prospects of the satellite data use for the analysis of regional magnetic anomalies] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2011. № 6. P. 1–11 (in Russian).

Abramova D., Abramova L. Litosfernye magnitnye anomalii na territorii Sibiri (po izmereniyam sputnika CHAMP [Lithospheric magnetic anomalies in the territory of Siberia (from measurements by the CHAMP satellite] // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55. P. 854–863.

Abramova D., Abramova L., Varentsov I., Filippov S. Morfologiya regional'nykh magnitnykh anomalii Baikal'skoi riftovoi zony i okruzhayushchikh ee territorii [Morphology of regional magnetic anomalies of the Baikal rift zone and its surrounding territories] // Geophysical research. 2018. V. 19. № 4. P. 31–45 (in Russian). DOI: 10.21455/gr2018.4-3

Abramova D., Filippov S., Abramova L. O vozmozhnostyakh ispol'zovaniya sputnikovykh geomagnitnykh nablyudenii v issledovanii geologo-tektonicheskogo stroeniya litosfery [About Possibilities of Satellite Observations Application to the Earth Geological-Tectonic Structure Study] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2020. № 2. P. 69–81 (in Russian).

Akinin V., Evdokimov A., Korago E., Stupak F. Noveishii vulkanizm arkticheskoi okrainy Severnoi Evrazii [The latest volcanism of the Arctic outskirts of Northern Eurasia] // Changes in the environment and climate; natural and related technological disasters. V. II. The latest volcanism of Northern Eurasia: patterns of development, volcanic danger, connection with deep processes and changes in the natural environment and climate. M. IGEM RAN. 2008. P. 41–80 (in Russian).

Alvey A., Gaina C., Kusznir 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.

Amante Ch., Eakins B. W. ETOPO1. 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. 2009.

Artyushkov E. Kontinental'naya kora na khrebte Lomonosova, podnyatii Mendeleeva i v kotlovine Makarova. Obrazovanie glubokovodnykh vpadin v neogene [Continental crust in the Lomonosov ridge, Mendeleev ridge, and Makarov basin. The formation of deep water basins in the

Neogene]. Russian Geology and Geophysics. 2010. V. 51. № 11. P. 1515–1530 (in Russian).

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

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

Dobretsov N., Polyanskii O., Reverdatto V., Babichev A. Dinamika neftegazonosnykh basseinov v Arktike i sopredel'nykh territoriyakh kak otrazhenie mantiinykh plyumov i riftogeneza [Dynamics of the Arctic and adjacent petroleum basins: a record of plume and rifting activity] // Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. № 8. P. 1145–1161 (in Russian).

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

Filatova N., Khain V. Tektonika Vostochnoi Arktiki [Eastern Arctic tectonics] // Tectonics. 2007. № 3. P. 3–29 (in Russian).

Gaina C., Werner S., Saltus R., Maus S. Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic // Geol. Soc. 2011. V. 35. P. 39–48.

Gaina C., Medvedev S., Torsvik T., Koulakov I., Werner S. 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. 2014. V. 35. P. 1095–1122. DOI: 10.1007/s10712-013-9254-y

Gao Guoming, Guofa Kang, Guangquan Li, Chunhua Bai, Yingyan Wu. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // Acta Geodaetica et Geophysica. 2016. DOI: 10.1007/s40328-016-0179-z

Glebovsky V., Astafurova E., Chernykh A., Korneva M., Kaminsky V., Poselov V. Moshchnost' zemnoi kory v glubokovodnoi chasti Severnogo Ledovitogo okeana: rezul'taty 3-D gravitatsionnogo modelirovaniya [Thickness of the Earth's crust in the deep Arctic Ocean: results of the 3D gravity modeling] // Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. №. 3. P. 327–344 (in Russian).

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.

Jakovlev A., Bushenkova N., Koulakov I., Dobretsov N. Struktura verkhnei mantii Arkticheskogo regiona po dannym regional'noi seismotomografii [Structure of the upper mantle in the Circum – Arctic region from regional seismic tomography] // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53. P. 1261–1272 (in Russian).

Korhonen J., Fairhead D., Hamoudi M., Hemant K., Lesur V., Mandea M., Maus S., Purucker M., Ravat D., Sazonova T., Thebault E. Magnetic anomaly map of the world. 2007. In: CCGM-CGMW (ed.) Comission for geological maps of the world. Paris.

Lebedeva-Ivanova N., Zamansky Y., Langinen A., Sorokin M. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82 degrees N: evidence of continental crust // Geophys. J. Int. 2006. V. 165. P. 527–544.

Maclennan J., McKenzie D., Gronvold K. Crustal accretion under Northern Iceland // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. V. 191. P. 295–310.

Metelkin D., Vernikovsky V., Kazansky A. Siberia – from Rodinia to Eurasia // Tectonics. 2011. P. 103–136.

Milovskiy G., Orlyankin V., Ishmuhametova V., Nenadov Ya. Perspektivy neftegazonosnosti Leno-Anabarskogo progiba i Olenyokskoy zonyi dislokatsiy po kosmicheskim i magnitogravimetricheskim dannyim [Prospects of oil and gas potential of the Lena-Anabar deflection and Olenek dislocation zone according to space and magnetogravimetric data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2013. № 1. P. 28–34 (in Russian).

Nakanishi M., Tamaki K., Kobayashi K. A new Mesozoic isochron chart of the Northwestern Pacific Ocean: Paleomagnetic and tectonic implications // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. DOI: 10.1029/92GL00022

Poselov V., Avetisov G., Bucenko V., Zholondz S., Kaminskij V., Pavlov S. Khrebet Lomonosova kak estestvennoe prodolzhenie materikovoi okrainy Evrazii v Arkticheskii bassein [The Lomonosov ridge as a natural extension of the Eurasian continental margin into the Arctic basin] // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53. № 12. P. 1662–1680 (in Russian).

Poselov V., Gramberg I., Mursin R., Bucenko V., Kaminskij V., Sorokin M., Pogrebickij Ju. Struktura i granitsy kontinental'noi i okeanicheskoi litosfery Arkticheskogo basseina [The structure and boundaries of the continental and oceanic lithosphere of the Arctic basin]. Ed. Gramberg I., Surkov V. Russian Arctic. SPb. VNIIOkeanologiya. 2002. P. 49–62 (in Russian).

Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status. Advances in Space Research. 2002. V. 30 (2). P. 129–134. DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00276-4

Roest W., Verhoef J., Macnab R. Magnetic anomalies and tectonic elements of Northeast Eurasia // GSC Open File. 1995. 2574. Geol. Surv. of Canada. Dartmouth N. S.

Shive P., Blakely R., Frost B., Fountain D. Magnetic properties of the lower continental crust, in Continental Lower Crust / Founatin D., Arculus R., Kay R. Eds. Elsevier. New York. 1992. P. 145–177.

Sobolev A., Hofmann A., Kuzmin D., Yaxley G., Arndt N., Chung S., Danyushevsky L., Elliott T., Frey F., Garcia M., Gurenko A., Kamenetsky V., Kerr A., Krivolutskaya N., Matvienkov V., Nikogosian I., Rocholl A., Sigurdsson I., Sushchevskaya N., Teklay M. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // Science. 2007. V. 316. (5823). P. 412–417.

Sorokin M., Zamansky Y., Langinen A., Jackson H., Macnab R. Crustal structure of the Makarov Basin, Arctic Ocean determined by seismic refraction // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 168. P. 187–199.

Vernikovsky V., Dobretsov N., Metelkin D., Matushkin N., Koulakov I. Problemy tektoniki i tektonicheskoi evolyutsii Arktiki [Concerning tectonics and the tectonic evolution of the Arctic] // Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. P. 1083–1107 (in Russian).

Wessel P., Smith W. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. http://gmt.soest.hawaii.edu.