

УДК 550.38

СПУТНИКОВЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТОСФЕРЫ (ПО ДАННЫМ CHAMP)

© 2019 г. Д. Ю. Абрамова¹, *, С. В. Филиппов¹, **

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

*e-mail: abramova@izmiran.ru

**e-mail: sfilip@izmiran.ru

Поступила в редакцию 19.09.2018 г.

После доработки 17.12.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Анализируются возможности использования спутниковых данных для изучения литосферных магнитных аномалий в труднодоступных и малоизученных регионах. В качестве экспериментальных данных используются измерения геомагнитного поля спутником CHAMP на высотах ~280–320 км. Приведены карты магнитного поля над территориями Северо-Атлантической провинции, Центрально-Азиатского складчатого пояса и Родопского горного массива (Болгария). Рассмотрена возможная природа литосферных магнитных аномалий, их связь с глубинными структурами и с активными тектоническими процессами, протекающими в литосфере изучаемых провинций. Интерпретация полученных карт показывает, что литосферные аномалии геомагнитного поля связаны с современными крупномасштабными геолого-тектоническими структурами исследуемых областей. Полученные результаты представляют интерес для дальнейших комплексных геолого-геофизических исследований и построения обоснованных моделей эволюции литосферы.

DOI: 10.1134/S0016794019040023

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитная съемка с использованием искусственных спутников Земли является одним из наиболее дешевых и доступных геофизических методов изучения глубинного строения нашей планеты. Пространственное покрытие данными даже одного дня наблюдений спутника больше, чем у всей сети ~150 обсерваторий мира. Спутниковые данные, измеренные 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 фундаментальных и прикладных исследованиях [Maus et al., 2002].

В последние десятилетия большой интерес вызывает изучение с применением данных спутниковых наблюдений крупномасштабных, так называемых литосферных магнитных аномалий (*lithospheric magnetic anomalies*) протяженностью в сотни километров.

Магнитное поле индуцируется в коре и верхней мантии, в так называемом магнитоактивном слое, т.е. части литосферы, в которой сосредоточены источники магнитных аномалий (МА), что

может быть использовано в качестве маркера для определения структуры и состава коры [Печерский и Геншафт, 2001; Nemant and Maus, 2005]. Аномальное магнитное поле (АМП), отражающее современное положение тектонических структур и их физические свойства, используется при расчетах физических параметров земной коры, таких как положение поверхности изотермы Кюри [Gao et al., 2017]. Опираясь на данные об АМП, можно, оценивать наличие и площадное расположение погруженных проводящих коровых слоев, выявлять зоны платформенной активизации, а также изучать геодинамические процессы в активных регионах – выделять глубинные разломные зоны и “корневые” области частичного плавления в верхней мантии [Nemant and Maus, 2005; Абрамова и др., 2017].

В последние два десятилетия базовым инструментом изучения литосферного поля Земли стали спутниковые измерения миссий CHAMP и SWARM. В течение продолжительной “жизни” CHAMP (2000–2010 гг.) положение его орбиты в разные годы менялось от 480 до 250 км, что дает возможность использовать разновысотные данные для исследования затухания магнитного поля

с высотой и позволяет строить карты АМП на разных уровнях, в частности, на минимальной высоте регистрации геомагнитного поля спутником, где, соответственно, поле внутренних источников проявляется интенсивнее. Спутники миссии SWARM, стартовавшие в 2013 г., в настоящее время находятся на орбитах ~520 и ~450 км над поверхностью Земли, что значительно выше орбиты CHAMP в последний год его работы. По этой причине мы использовали данные миссии CHAMP за 2010 г., как наиболее информативные для данной задачи.

Интерес к освоению природных ресурсов в сложно построенном Арктическом регионе и связанные с этим геополитические проблемы разграничения особых экономических зон на арктическом шельфе, требуют разномасштабного и междисциплинарного изучения геолого-тектонических процессов, протекающих в этой области [Конторович и др., 2010]. Таким образом, возможность получения данных о параметрах глубинного строения литосферы, в том числе с помощью спутника, в таких труднодоступных областях как Арктика, а также высокогорные системы, морские акватории, становится особенно актуальной.

В наблюдаемое на спутниковых высотах геомагнитное поле вносят вклад различные составляющие: поле, генерируемое источниками магнитогидродинамической природы в жидкой части земного ядра; поля магнитосферно-ионосферных токовых систем; поля магнитных аномалий, обусловленные намагниченностью горных пород, слагающих земную литосферу. В связи с этим, основная трудность при расчете параметров АМП заключается в отделении его от других составляющих наблюдаемого геомагнитного поля. Развиваемые нами технологии выделения “литосферной” части из измеренного суммарного магнитного поля, уже в течение нескольких лет с успехом используются для построения карт литосферных магнитных аномалий [Абрамова и др., 2011, 2014, 2017].

2. МАГНИТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКА ЗЕМЛИ CHAMP

Более 10 лет, в два раза дольше запланированного срока просуществовала миссия CHAMP благодаря устойчивой и надежной конструкции. На борту измерялись параметры гравиметрического поля Земли, магнитного поля Земли, а также проводилось оптическое зондирование атмосферы. Успех миссии CHAMP продемонстрировал научный и экономический потенциал спутниковых наблюдений за физическими полями Земли, что стало важным для российских ученых, имеющих возможность бесплатно использовать его уникальные данные для своих исследований.

По сравнению с предыдущими спутниками Земли (POGO, MAGSAT, ØERSTED и др.) CHAMP имел значительные преимущества: большая продолжительность съемки, удачная конфигурация орбиты, лучшая точность измерений. Околополярная круговая орбита CHAMP с углом наклона 87.3° позволяла проводить измерения в каждой точке пространства в разное локальное время [Reigber et al., 2002], а низкая альтитуда наблюдений обеспечивала более высокое разрешение измеряемых параметров. За одни сутки спутник делал 14 витков, равномерно охватывая весь интервал долгот. Данные имели секундное разрешение по времени, что составляет в пространстве ~7 км.

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). Точность измерений модуля полного вектора геомагнитного поля составила ± 0.5 нТл, компонент — ± 3 нТл. Благодаря естественному снижению орбиты с 480 км при запуске до 250 км в последний период работы, стало возможным получить площадную картину распределения АМП на разных уровнях наблюдения. Изменение высоты CHAMP за все время его существования иллюстрирует рис. 1.

Применяя имеющиеся у нас технологии обработки и анализа массивов спутниковых данных, мы построили семейства карт пространственного распределения модуля и компонент АМП над отдельными территориями. Для повышения надежности и изучения воспроизводимости результатов, аномальное поле рассчитывалось по нескольким независимым наборам спутниковых данных. Сравнение карт, построенных на основе различных версий входных данных, показало, что пространственная структура литосферных магнитных аномалий воспроизводится достаточно надежно.

Известно, что измерение геомагнитного поля на спутниковых высотах, так же как процесс пересчета в верхнее полупространство, является аналогом “фильтра низких частот”, т.е. подавляет локальные аномалии и сохраняет в мало искаженном виде региональные составляющие. Затухание амплитуды аномалий с высотой определяется параметрами источников литосферных аномалий: чем больше глубина залегания намагниченного тела и его горизонтальные размеры, тем медленнее убывают аномалии с высотой. Таким образом, данные наблюдений геомагнитного поля, полученные на орбите, несут информацию о литосферных аномалиях, вызванных крупномасштабными структурами, которые залегают на больших глубинах. Свойства таких аномалий и их связь с геолого-тектоническим строением в неко-

торых труднодоступных регионах Евразии рассмотрены в настоящей работе.

3. СВЯЗЬ ДЛИНОВОЛНОВЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ С ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И ГЕОЛОГИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ ЛИТОСФЕРЫ

В настоящее время принято считать, что главным источником магнитных аномалий любых уровней являются наиболее распространенные на земле магнитные минералы — магнетиты, титаномагнетиты, гематиты и пирротины — магматические поверхностные и близповерхностные породы, погружившиеся в дальнейшем на большие глубины. Вторым вероятным источником обогащения пород магнитными минералами являются флюиды, богатые железом [Печерский и Генштафт, 2001]. По современному представлению, нижним ограничением магнитоактивного слоя, то есть части литосферы, в которой сосредоточены источники аномалий, является либо раздел Мохо, либо глубина до изотермической поверхности Кюри магнетита [Tanaka et al., 1999]. Вопрос о проникновении магнитоактивного слоя в верхнюю мантию до сих пор остается открытым [Artemieva and Mooney, 2001]. Кровля магнитного слоя может совпадать с земной поверхностью, или находиться в закрытых и складчатых районах на глубинах более 10 км. Аномалии могут быть вызваны как изменением средней эффективной намагниченности крупных участков литосферы, так и изменением мощности ее магнитоактивного слоя. Латеральные вариации состава магнитных минералов являются еще одним источником длинноволновых аномалий, причем степень намагниченности именно нижней части земной коры играет здесь наибольшую роль.

В пределах древних платформ наблюдается низкий фон теплового потока, что в сочетании с большой мощностью коры и глубоким положением изотермической поверхности Кюри магнетита приводит к тому, что магнитоактивный слой в них значительно мощнее, чем в молодых регионах. Однако довольно часто более поздние раздробленные структуры практически полностью перекрывают архейский фундамент, маскируя природу нижних частей коры [Goodwin, 1996]. Информация о положении МА на той или иной территории позволяет судить о закономерностях распределения магнитных неоднородностей в глубинной структуре земной коры, как бы “просвечивая” древние платформы [Nemant and Maus, 2005], а зоны сочленения отдельных литосферных МА часто являются отражением глубинных и долгоживущих разломов, на которых развиваются авлакогены и депрессии [Орлюк и Пашкевич, 2012].

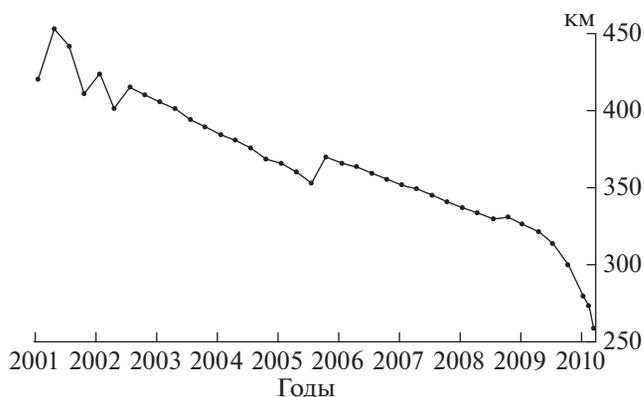


Рис. 1. Изменение высоты орбиты спутника СНАМР за период измерений.

4. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Методика выделения поля региональных литосферных магнитных аномалий из спутниковых измерений состоит из следующих шагов:

- подбор экспериментальных данных, относящихся к изучаемой территории, их обобщение и приведение к удобной для дальнейшей обработки форме;
- выделение (с использованием специально разработанных технологий) из полученных массивов данных составляющей, наиболее адекватно характеризующей именно литосферное аномальное магнитное поле;
- построение карт пространственного распределения компонент аномального магнитного поля над заданной территорией.

Геомагнитное поле на спутниковых высотах является сложной функцией пространства и времени, поэтому основная проблема при проведении анализа состоит в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля на составляющие, связанные с различными физическими источниками. Для выделения части, связанной с полем литосферных магнитных аномалий, необходимо исключить из измеренных значений все остальные составляющие, по возможности максимально адекватно описывая их с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей. Этот, так называемый, “физический” подход к выделению литосферных данных, ставший практически классическим, был усовершенствован авторами в части удаления из суммарного поля составляющей главного магнитного поля.

Общепринятым для решения такого рода задач является представление главного магнитного поля международной аналитической моделью (IGRF), в основе которой лежит сферический

гармонический анализ (СГА) среднегодовых значений геомагнитного поля. В этом случае для построения точной пространственной модели поля принципиальное значение имеет равномерное заполнение данными узлов расчетной сетки. Однако базовым массивом экспериментальных данных для построения моделей IGRF являются наблюдения мировой сети магнитных обсерваторий, которые расположены на поверхности Земли крайне неравномерно, поэтому в тех областях, где обсерватории отсутствуют, сетка заполняется дополнительными экспериментальными данными (спутниковыми, аэромагнитными, морских съемок), имеющими различную точность измерений. Для получения более точной модели главного поля проводят тщательную селекцию измерений, что приводит к потере значительной части данных, таким образом, первоначальное относительно равномерное распределение их в пространстве и во времени рукотворно нарушается. В результате предлагаются несколько моделей-кандидатов, из которых на каждые 5 лет строится модель IGRF, описывающая главное магнитное поле Земли.

В нашем случае заданные специальным образом параметры орбиты спутника CHAMP позволяют получать измерения геомагнитного поля ежесуточно с секундным разрешением в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли. Это дает возможность с помощью разложения компонент поля, полученных в течение суток, по сферическим гармоникам до степени и порядка $n = m = 14$, построить среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ) главного магнитного поля для каждого конкретного дня, а не усредненную за длительный (годовой) интервал времени [Головков и др., 2007]. При этом для построения модели берутся все данные за сутки, включая полученные в области высоких широт, что значительно увеличивает равномерности покрытия сферы исходными данными. Далее на каждые конкретные сутки по полученным коэффициентам ССГМ синтезируются модельные значения главного поля, которые и используются для удаления соответствующей составляющей из измеренных в эти сутки значений суммарного магнитного поля.

Поскольку при решении задачи выделения значений аномального магнитного поля мы рассматриваем главное поле Земли как некую постоянную в конкретный промежуток времени составляющую, которую необходимо удалить из измеренных значений, использование коэффициентов среднесуточной сферической гармонической модели для синтеза значений главного поля в каждые конкретные сутки является предпочтительным.

В работе [Головков и др., 2007] показано, что среднесуточные сферические гармонические модели не уступают по точности традиционным моделям IGRF, кроме того существенным преимуществом ССГМ является простота расчета и полное отсутствие субъективизма, неизбежного при селекции данных.

Для редукации вклада внешнего электромагнитного поля, которое обычно аппроксимируется первой зональной гармоникой в сферическом гармоническом разложении для магнитосферных токовых систем и линейными или параболическими трендами для ионосферных, был применен упрощенный подход, заключавшийся в тщательном отборе исходных экспериментальных данных. Для построения ССГМ использованы измерения поля только 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 $k_p \leq 1$ и $D_{st} \leq 20$). Проведенные нами оценки показали, что данный подход не приводит к уменьшению точности определения значений аномального поля, при этом существенно снижается время обработки.

5. ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ СЕВЕРО-АТЛАНТИЧЕСКОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ И ОСТРОВА ГРЕНЛАНДИЯ

В данном разделе анализируются карты поля литосферных магнитных аномалий, построенные по данным наблюдений спутника CHAMP за 2010 год, когда высота его орбиты снизилась до 280 км. Полученное распределение АМП имеет более высокую информативность по сравнению с рассчитанным ранее по данным CHAMP для высоты орбиты 450 км за счет повышенных (примерно в 2–3 раза) значений величины амплитуды поля на меньшей высоте. Пространственные распределения получены для сектора $60^\circ - 0^\circ$ E и $55^\circ - 75^\circ$ N.

Северо-Атлантическая магматическая провинция является результатом спрединговых и магматических процессов в северной части акватории Атлантического океана и в области его перехода к Северному Ледовитому океану. В процессе спрединга северной части Атлантики на ее акватории формировались магматические поля, что продолжалось вплоть до окончательного раскрытия североатлантической рифтовой системы [Gaina et al., 2009]. По этой причине данная часть Северо-Восточной Атлантики перекрыта обширными лавовыми потоками – базальтовыми плато [Larsen and Watt, 1985; Søger and Holm, 2009]. В результате взаимодействия двух систем (срединно–океанических рифтов и плюмов Исландия–Ян Майен) здесь образовалась аномально толстая кора, являющаяся одной из характерных

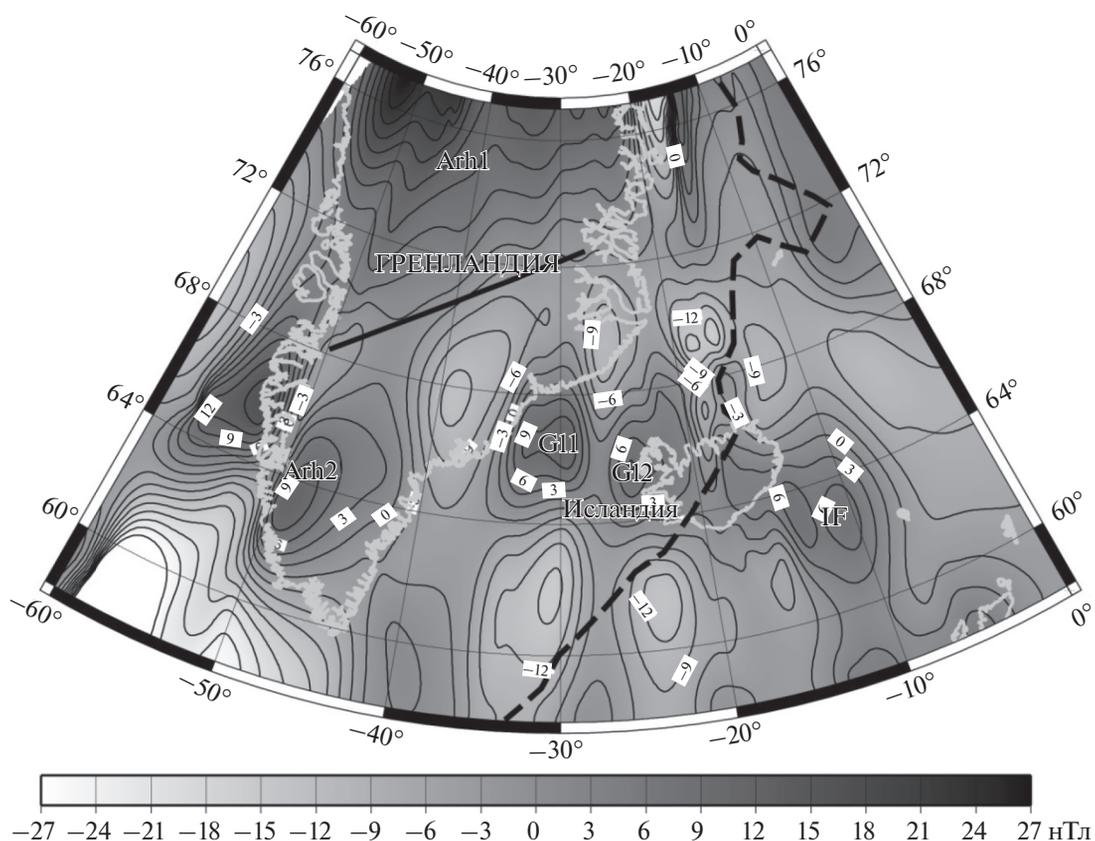


Рис. 2. Распределение полного вектора поля литосферных магнитных аномалий T_a на высоте 280 км над территорией Северо-Атлантической магматической провинции. Штриховая линия – положение Срединно-Атлантического хребта; сплошная линия – зона предполагаемого раздела архейской и протерозойской части Гренландии; Arh1 и Arh2 – архейские блоки [Henriksen, 2008]. G11, G12, IF – аномалии поля (см. текст).

особенностей этой территории [Alvey et al., 2008; Rickers et al., 2013; Funck and Hopper, 2014]. Сейсмические исследования показывают, что мощность коры здесь, по крайней мере, в 3–4 раза превышает обычно наблюдаемые средние значения мощности океанической коры. Томографические исследования [Allen et al., 2002] выявили наличие обширной системы, которая подает мантийный расплав в верхние магматические камеры, расположенные в коре.

Соседствующий с этой областью о. Гренландия представляет собой участок прочной континентальной литосферы докембрийского возраста, составленный из двух архейских блоков, разделенных более молодыми подвижными поясами [Henriksen et al., 2000].

Карта аномалий модуля полного вектора магнитного поля T_a над Северной Атлантикой на высоте 280 км приведена на рис. 2. При ее построении использовано медианное осреднение по блокам размером 80×80 км средствами GMT (blockmedian) [Wessel and Smith, 2007]. Рисунок 2 показывает, что АМП над Северной Атлантикой имеет существенно пониженный уровень прак-

тически вдоль всего протяжения Срединно-Атлантического хребта. Вся обширная область отрицательных значений T_a приурочена к территории, связанной со спредингом Срединно-Атлантического хребта и магматическими процессами, обусловленными деятельностью мантийных плюмов.

В Северной Атлантике прослеживается интенсивная низкоскоростная аномалия под Норвежско-Гренландским бассейном, которая отражает активные процессы спрединга, протекающие не только непосредственно вдоль оси Срединно-Атлантического хребта, но и по периферийным ответвлениям [Bijwaard and Spakman, 1999; Яковлев и др., 2012; Rickers et al., 2013]. Этим, несомненно, объясняется низкий уровень литосферного аномального магнитного поля в океанической части рис. 2. Активные процессы разогрева астеносферы уменьшают глубину, на которой достигается температура Кюри для ферромагнитных минералов, что ведет к сокращению мощности магнитоактивного слоя литосферы.

Аномальное магнитное поле над территорией Гренландии демонстрирует в основном положи-

тельные значения, поскольку остров представляет собой участок мощной континентальной литосферы (до 250–280 км), что выявлено результатами сейсмической томографии [Lebedev et al., 2009; Яковлев и др., 2012]. Она состоит из двух архейских блоков Arh1 и Arh2 (рис. 2), разделенных более молодыми подвижными поясами протерозойского возраста [Henriksen, 2008]. Этим представлениям, как видно из рис. 2, хорошо отвечает геометрия полученных региональных магнитных спутниковых аномалий. Так, вся северная часть Гренландии характеризуется положительными значениями АМП. На высоте ~280 км его амплитуда достигает 27 нТл, то есть имеет значительную величину в ряду обычно наблюдаемых на такой высоте аномалий. Это магнитная аномалия, соответствующая природе архейской континентальной коры [Nemant and Maus, 2005]. Южная окраина этой аномалии четко выражена и проходит в ЮЗ–СВ направлении через территорию центральной и северной Гренландии. Положение южной границы магнитной аномалии Arh1 (сплошная линия на рис. 2) практически точно совпадает с установленной сейсмическими методами зоной предполагаемого раздела архейской и протерозойской части Гренландии [Henriksen, 2008].

Область отрицательных значений T_a в центральной части Гренландии продолжается на восток в зону спрединга Срединно-Атлантического хребта. Томографическими исследованиями [Яковлев и др., 2012] в этой области обнаружена низкоскоростная аномалия, которая, по-видимому, отражает свойства литосферы, частично разрушенной Исландским плюмом. Эта область пониженных значений аномального магнитного поля и сейсмических скоростей совпадает также с зоной аномального увеличения теплового потока и повышенной скорости таяния льдов [Fahnestock et al., 2001]. Следствием повышения теплового потока является поднятие изотермической поверхности Кюри магнетита, что приводит к уменьшению мощности магнитоактивного слоя и понижению значений аномального магнитного поля.

Над южной оконечностью Гренландии прослеживается менее значительная, с уровнем порядка 10 нТл, положительная магнитная аномалия, являющаяся отражением магнитных свойств архейского блока Arh2. От восточного края центральной части Гренландии до шельфа Фарерских островов протягивается пояс изометрических положительных аномалий. Присутствие этих аномалий и их размеры в зоне мощной тектонической активизации представляется, на первый взгляд, весьма неожиданным. Однако, природа этих положительных литосферных магнитных аномалий, по-видимому, состоит в том, что, отдельные микроплиты разрушавшейся древней

коры в процессе рифтинга были погружены под активные области, что подтверждают некоторые косвенные признаки, полученные в работах по обобщению результатов геофизических исследований и геологических данных [Allen et al., 2002; Foulger and Anderson, 2005]. Так геохимические исследования [Torsvik et al., 2015], показали, что под юго-восточным побережьем Исландии в области обнаруженной нами положительной магнитной аномалии IF под вулканическими породами выявлены отдельные фрагменты континентальной коры. В связи с чем, можно достаточно уверенно утверждать, что положительная магнитная аномалия IF представляет собой образ микроблока континентальной коры, разрушенной действием мантийного Исландского плюма. Изометрические положительные магнитные аномалии у восточного побережья Гренландии G11 и G12 также, по-видимому, имеют эту же природу.

6. ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Для исследования параметров литосферного аномального магнитного поля на территории Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) по данным измерений спутника CHAMP построены карты аномального поля вертикальной компоненты Z_a . Использовались данные за 6 мес. 2008 г., когда высота полета спутника составляла ~310–320 км. В ходе исследований строились карты различных масштабов и с разными параметрами площадного осреднения поля. На рисунке 3 представлена типичная карта аномального магнитного поля для центральной части ЦАСП (60°–110° E, 24°–54° N).

ЦАСП имеет чрезвычайно сложную структуру литосферы, составленную серией складчатых поясов и кристаллических массивов (микроконтинентов) с докембрийским фундаментом. Формирование этого региона связано, в первую очередь, с закрытием в середине мезозоя палеозойского океана и последующими процессами континентальной коллизии [Диденко и др., 2010].

В данных литосферного магнитного поля на высоте наблюдений ~300 км (рис. 3) отчетливо проявляется мозаичная структура крупных положительных и отрицательных аномалий.

Положительные аномалии уровня 7–8 нТл приурочены к Таримскому (TAR) и Джунгарскому (JG) докембрийским кристаллическим массивам (в центре планшета). На самом юге карты краевая часть субдуцирующей Индийской плиты (IND) отмечена положительными значениями литосферного аномального поля (~10 нТл). На северной периферии Казахской платформы (KAZ) положительная аномалия достигает уровня порядка 10 нТл.

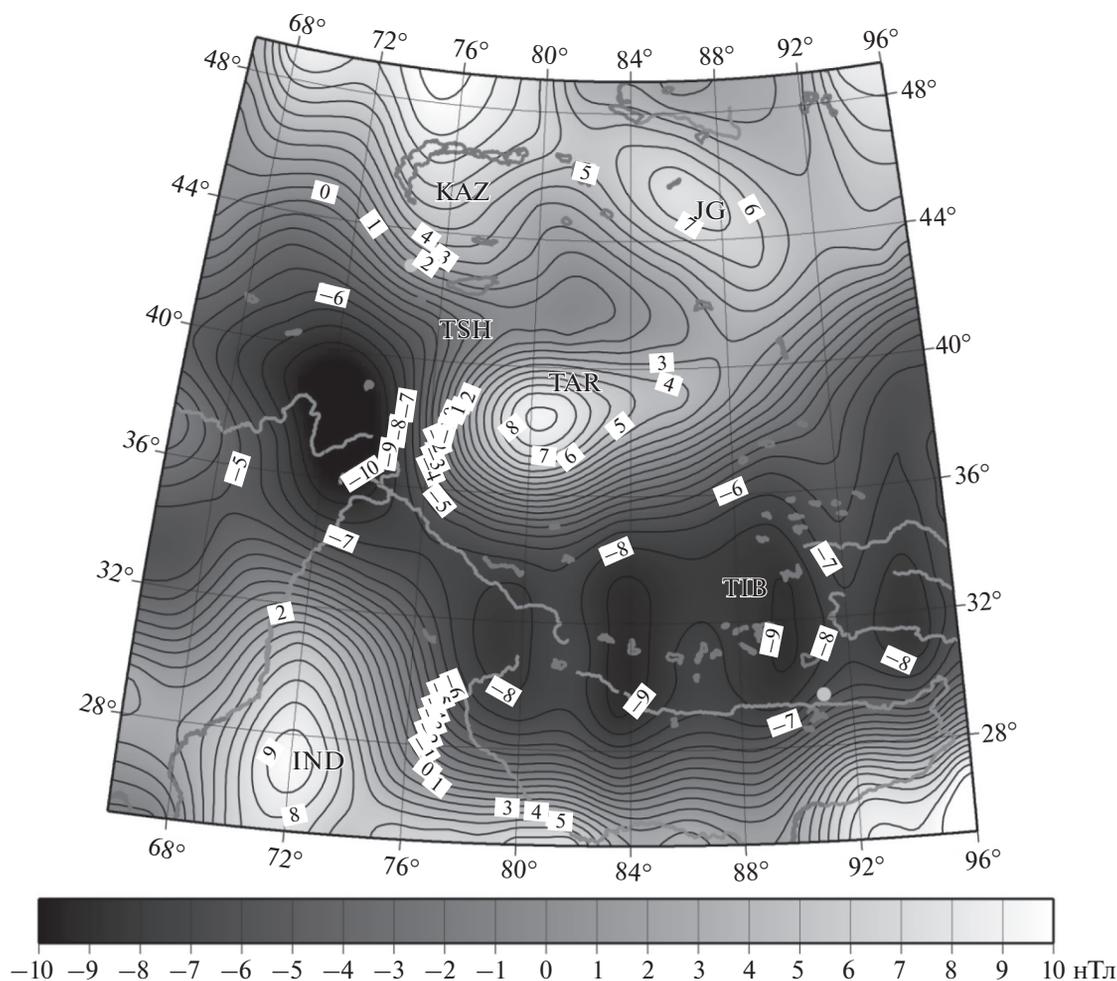


Рис. 3. Распределение вертикальной компоненты поля литосферных магнитных аномалий Z_a на высоте ~ 300 км над территорией Центрально-Азиатского складчатого пояса. TAR – Таримский, JG – Джунгарский докембрийские кристаллические массивы; IND – Индийская плита; KAZ – Казахская платформа; ТВ – Тибет; РМ – Памир; TSH – Тянь-Шань.

Структуры Гоби-Тянь-Шаньского рифтогенного пояса характеризуются пониженными величинами спутникового АМП. Отрицательные аномалии очерчивают складчатые области Тибета (ТВ) и Памира (РМ), достигая уровня -12 нТл. Складчатая система Тянь-Шаня (TSH) видна в аномальном литосферном магнитном поле как седловина с нулевым уровнем. В целом, все складчатые области представлены в виде ареалов пониженного уровня аномального магнитного поля, что обусловлено уменьшением мощности магнитоактивного слоя. Это особенно резко проявляется на территориях Памира и Тибета в силу наблюдающегося там аномально повышенного теплового потока [Лысак, 2009].

Литосферные магнитные аномалии находятся в отчетливой корреляции с аномалиями сейсмических скоростей, полученных в результате сейсмических исследований (ГСЗ, томографии и др.)

[Gao et al., 2000; Huang and Zhao, 2006; Cotton and Avouac, 1994, Kosarev et al., 1993]. Тектоническая активность проявляется здесь по настоящее время, ее природа определяется сложным взаимодействием перемещающихся литосферных плит и активными мантийными процессами. Землетрясения здесь происходят и на стыке жестких литосферных блоков, и в окрестности зон пластических деформаций. Именно вблизи этих границ концентрируются эпицентры большей части землетрясений. В этой связи оконтуривание градиентных зон литосферных магнитных аномалий представляется весьма важным для выделения областей повышенной сейсмической активности.

7. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ РОДОПСКОГО МАССИВА

Для горной системы Родопского массива, расположенного на территории Республики Болга-

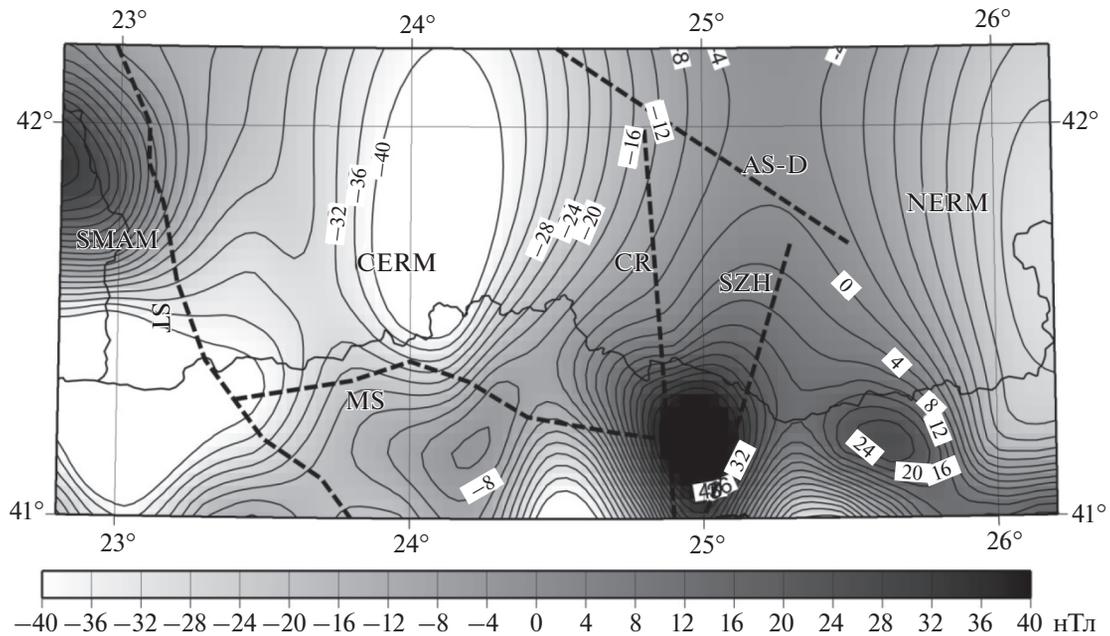


Рис. 4. Распределение полного вектора поля литосферных магнитных аномалий T_d на уровне 4 км над областью Родопского горного массива (по данным базы EMAG2). Крупные разломы и зоны скольжения (штриховые линии): SZH – Снежин, AS-D – Асеновград-Дядово, MS – разлом Места, ST – разлом Струма. “Частичные” массивы: CERM – Центральный Родопский массив, NERM – Северо-Восточный Родопский массив, SMAM – Сербо-Македонский массив.

рия, практически нет данных наземных и аэромагнитных съемок. По существу, для этого региона единственным источником АМП являются материалы базы EMAG2. Созданная коллективом авторов [Maus et al., 2009] модель глобального распределения аномального магнитного поля WDMAM (World Digital Magnetic Anomaly Map) в настоящее время является наиболее полным собранием данных, частью которого является база магнитных данных EMAG2, скомпилированная из материалов наземных, спутниковых, морских и аэромагнитных съемок (разрешение сетки 2 угловые минуты, высота над геоидом 4 км). Интересным представляется использование данных EMAG2 для определения границ магнитных аномалий и сравнения их положения с погребенными под осадками геологическими границами.

Родопский горный массив образовался в результате коллизии континентальных литосферных блоков, отчлененных от северных фрагментов континента Гондвана, и перемещенных на север. Интенсивное складкообразование, происходящее в результате процессов растяжения, способствовало появлению погруженных массивов, границы которых не видны на дневной поверхности [Дачев Х., 1988, Wortel and Spakman, 2000]. Для исследования соответствия МА тектонике Родопского массива (PM) мы использовали работу [Ivanov R., 1981], в которой обосновывалась спорная в то время гипотеза о существовании и границах Центрально-Родопского массива

(CERM). До этого PM рассматривался геологами как срединный массив нормального заложения, в котором возможность существования внутренних разрывов и тектонических границ категорически отвергалась. Принимая эту гипотезу, следует предположить, что аномальное магнитное поле должно быть на всей территории положительным и однородным.

Напротив, по мнению Иванова [Ivanov R., 1981], PM является территорией, составленной из нескольких частично перекрытых осадками массивов. На карте литосферных магнитных аномалий Родопского массива на высоте 4 км (рис. 4) показано положение разломных структур и частичных массивов, постулируемых Р. Ивановым: Северо-Восточный Родопский массив (NERM), Центрально-Родопский массив, (CERM), и Сербо-Македонский массив (SMAM). При этом поверхностные структуры зачастую не указывают на существование границ между этими “частичными” массивами.

Анализ распределения МА (рис. 4), показывает хорошее совпадение контуров аномалий магнитного поля и наиболее вероятных границ отдельных массивов. В целом, вся площадь CERM характеризуется отрицательными значениями магнитного поля, что согласуется с наблюдаемыми здесь повышенными значениями теплового потока, вызывающего подъем изотермической поверхности Кюри магнетита, и, соответственно, уменьшение толщины магнитоактивного слоя.

Западная граница магнитной аномалии четко коррелирует с разломом Струма (ST), что хорошо согласуется с предположением о том, что западная граница CERM перекрыта мощными осадками вдоль реки Струма. При этом здесь фиксируется значительный градиент аномального магнитного поля и изменение знака поля с отрицательного на положительный. Положительные значения аномального поля относятся уже к соседнему Сербско-Македонскому массиву (SMAM).

Положение северной геологической границы CERM предполагается вдоль разлома Асеновград – Дядовцы (AS-D) юго-восточного направления. Граница магнитной аномалии также совпадает с разломом AS-D. Геологические карты указывают на существование одного большого так называемого разлома “Места” (MS) вдоль южного склона Родопского массива. Южная граница магнитной аномалии на рис. 4 также отражает это. На восточном краю SMAM фиксируется широкая область мощного складкообразования на границе между CERM и SERM (разломы CR, SZH), что отмечено резким понижением значений аномального магнитного поля.

8. ВЫВОДЫ

Исследования литосферы с использованием спутниковых наблюдений добавляют ценную информацию и способствуют лучшему пониманию тектонической структуры и эволюции литосферы в труднодоступных регионах земного шара. Выделение аномалий магнитного поля, в зонах, где протекают активные тектонические процессы, связанные с корово-мантийными зонами термического разуплотнения и флюидизации, чрезвычайно важно для понимания строения и геодинамических режимов активных регионов и прогноза опасных природных рисков.

Локализация литосферных аномалий хорошо коррелирует с данными других геофизических полей, таких как тепловое поле и поле скоростей сейсмических волн и подтверждает существование подповерхностных разрывов, скрытых под осадочными отложениями или надвигами.

Фиксируемые крупные положительные магнитные аномалии в океанической части зоны спрединга Северо-Атлантического хребта, по-видимому, отражают существование микроплит древней континентальной коры, погруженных под структуры базальтового основания. Анализ карт аномального литосферного магнитного поля показывает их согласованность с геолого-тектоническими идеями зонально-блоковой структуры земной коры данного региона.

Литосферное магнитное поле может с успехом использоваться в комплексе с другими геологическими и геофизическими методами для описания

положения глубинных тектонических структур и их физических свойств, для понимания природы глубинных процессов в литосфере Земли.

9. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность к.ф.-м.н. Л.М. Абрамовой за ценные советы и оказанную помощь при проведении данного исследования, Н.И. Волковой за помощь в обработке и систематизации данных.

Для построения карт геомагнитного поля была использована программа 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 // Исследование Земли из космоса. № 6. С. 53–63. 2011.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М. Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (по измерениям спутника CHAMP) // Геология и геофизика. Т. 55. С. 1081–1092. 2014.
- Абрамова Д.Ю., Варенцов И.М., Абрамова Л., Филиппов С.В. Анализ аномалий литосферного магнитного поля в рамках геолого-геофизического исследования корово-мантийных структур карпато-балканского региона // Геофизика. № 2. С. 71–78. 2017.
- Дачев Хр. Строеж на земната кора в България. София: Техника, 364 с. 1988.
- Головкин 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. Т. 47. № 2. С. 272–278. 2007.
- Диденко А.Н., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф., Шевченко Б.Ф. Структура литосферы и мезозойская геодинамика востока Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. Т. 51. № 5. С. 629–647. 2010.
- Контарович А.Э., Эзов М.И., Бурштейн Л.М., Каминский В.Д., Курчиков А.Р., Малышев Н.А., Прищепина О.М., Сафронов А.Ф., Ступакова А.В., Супруненко О.И. Геология, ресурсы углеводородов шельфов Арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. Т. 51. № 1. С. 7–17. 2010.
- Лысак С.В. Термальная эволюция, геодинамика и современная геотермальная активность литосферы Китая // Геология и геофизика. Т. 50. С. 1058–1071. 2009.
- Орлюк М.И., Пашкевич И.К. Глубинные источники региональных магнитных аномалий: тектонотипы и связь с транскоровыми разломами // Геофизич. журн. Т. 34. № 4. С. 224–234. 2012.
- Печерский Д.М., Гениафт Ю.С. Петромагнетизм континентальной литосферы и природа региональных магнитных аномалий: обзор // Российский журн. наук о Земле. Т. 3. № 2. <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v03/rje01059/rje01059.htm>. 2001.

- Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика. Т. 53. С. 1261–1272. 2012.
- Allen R., Nolet G., Morgan W. et al. Plume-driven plumbing and crustal formation in Iceland. *J. Geophysical Research*. V. 107. № B8. 1JB000584. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001>
- 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.* 27. P. 310–321. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.036>
- Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. V. 106. № B8. P. 16,387–16,414. 2001.
- Bijwaard H., Spakman W. Tomographic evidence for a whole-mantle plume below Iceland // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 166. P. 121–126. 1999.
- Cotton F., Avouac P. Crust and upper-mantle structure under the Tian Shan from surface wave dispersion // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 84. P. 1–4. 1994.
- Fahnestock M., Abdalati W., Joughin I., Brozena J., Gogineni P. High geothermal heat flow, basal melt, and origin of rapid ice flow in central Greenland // *Science*. V. 294. P. 2338–2342. 2001.
- Foulger G.R., Anderson D.L. A cool model for the Iceland hotspot // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 141. P. 1–22. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.10.007>
- Funck T., Hopper J.R. Crustal structure. Tectonostratigraphic Atlas of the North-East Atlantic Region. // *Geological Surv. of Denmark and Greenland (GEUS)*. Copenhagen, Denmark. P. 69–128. 2014.
- Gaina C., Gernigon L., Ball P. Palaeocene–Recent plate boundaries in the NE Atlantic and the formation of the Jan Mayen microcontinent // *J. Geol. Soc. London*. 166. P. 601–616. 2009. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-112>
- 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 Geod. Geophys.* V. 52. № 3. P. 407–420. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z>
- Gao R., Huang D., Lu D. Deep seismic reflection profile across the juncture zone between the Tarim basin and the west Kunlun mountains // *Chin. Sci. Bull.* V. 45. P. 2281–2000.
- Goodwin A.M. Principles of Precambrian Geology. New York: Elsevier. P. 327. 1996.
- 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.
- Henriksen N., Higgins A.K., Kalsbeek F., Pulvertaft T.C.R. Greenland from Archaean to Quaternary. Descriptive text to the Geological map of Greenland 1 : 2500000 // *Geology of Greenland Survey Bull.* P. 93–185. 2000.
- Henriksen N. Geological history of Greenland – four billion years of earth evolution. Copenhagen: Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), V. 46. Is. 1. P. 272. ISBN 978-87-7871-211-0. 2008.
- Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // *J. Geophys. Res.* V. 111. P. 1–21. 2006.
- Ivanov R. The deep – seated Central-Rhodope Nappe and the interference tectonics of the Rhodope crystalline basement // *Geologica Balcanica*. Vol. 11. № 3. P. 47–66. 1981.
- Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: Contrasts in the evolution of structures across the Tallasso-Fergana fault // *J. Geophys. Res.* V. 98. P. 4437–4448. 1993.
- Larsen L.M., Watt W.S. Episodic volcanism during break-up of the North Atlantic: evidence from the East Greenland plateau basalts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 73. P. 105–116. 1985. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90038-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90038-X)
- Lebedev S., Boonen J., Trampert J. Seismic structure of Precambrian lithosphere: new constraints from broadband surface-wave dispersion // *Lithos*. V. 109. № 1. P. 96–111. 2009.
- Maus S., Rother M., Holme R., Lühr H., Olsen N., Haak V. First scalar magnetic anomaly map from CHAMP satellite data indicates weak lithospheric field // *Geophys. Res. Lett.* 2002. 29 (10). 45.1–47.4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013685>
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al. EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* V. 10. № 8. Q08005. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // *Advances in Space Research*. V. 30. № 2. P. 129–134. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4)
- Rickers F., Fichtne A., Trampert J. The Iceland–JanMayen plume system and its impact on mantle dynamics in the North Atlantic region // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 367. P. 39–51. 2013.
- Soager N., Holm P.M. Extended correlation of the Paleogene Faroe Islands and East Greenland plateau basalts // *Lithos*. V. 107. Is. 3–4. P. 205–215. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.002>
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // *Tectonophysics*. V. 306. P. 461–470. 1999.
- Trond H., Torsvik H., Amundsen E.F., Reidar G. Trønnes, Doubrovine P.V. Continental crust beneath southeast Iceland // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. V. 112. № 15. P. 1818–1827. 2015.
- Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. <http://gmt.soest.hawaii.edu>. 2007.
- Wortel M.J.R., Spakman W. Subduction and slab detachment the Mediterranean – Carpathian region // *Science*. V. 290. Is. 5498. P. 1910–1917. 2000.