

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 550.34.09

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
СПУТНИКОВЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ИССЛЕДОВАНИИ  
ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ

© 2020 г. Д. Ю. Абрамова<sup>а</sup>, \* , С. В. Филиппов<sup>а</sup>, Л. М. Абрамова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Москва, Троицк, Россия

<sup>б</sup>Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта,  
Москва, Троицк, Россия

\*e-mail: f.step2014@mail.ru

Поступила в редакцию 20.11.2019 г.

Анализируются особенности отражения параметров геолого-тектонических структур в литосферных магнитных аномалиях, построенных по геомагнитным измерениям спутника Земли CHAMP. С помощью специально разработанной оригинальной технологии выделения аномального магнитного поля из измеренных на спутнике значений  $Z_a$  создана база экспериментальных данных модуля полного вектора  $T_a$  и вертикальной компоненты  $Z_a$  литосферного магнитного поля на спутниковых высотах. По полученным данным определено положение крупномасштабных магнитных аномалий над территориями Восточных Карпат, Таримской крупной изверженной провинции, Хатангского центра трапповых излияний и Колымо-Омолонского микроконтинента. Приложение данных о намагниченности структур на нижнекоровых глубинах к совместному анализу с другими геофизическими методами исследования позволяет выявить специфические особенности условий зарождения и развития мантийных и мантийно-коровых рудообразующих систем, приводящих к формированию крупных и уникальных рудных месторождений. Показано, что из магнитных данных может быть извлечена количественная геологическая информация путем уточнения границ докембрийских провинций, перекрытых фанерозойскими отложениями. Литосферное магнитное поле как параметр, отражающий реальное положение структур нижней части земной коры и изменение их физических свойств, в сочетании с другими геологическими и геофизическими методами может быть успешно использовано для их выделения, оконтуривания и коррекции положения в пространстве.

*Ключевые слова:* спутниковые магнитные наблюдения, литосферные магнитные аномалии, зона Вранча, Тарим, Хатангский центр трапповых излияний, Колымо-Омолонский микроконтинент

DOI: 10.31857/S0205961420010029

## ВВЕДЕНИЕ

Спутниковая магнитная съемка сегодня – один из наиболее дешевых и доступных геофизических методов исследования глубинного строения Земли. К настоящему времени практически вся поверхность нашей планеты покрыта равномерной сетью геомагнитных измерений благодаря специально рассчитанной субмеридиональной ориентации орбит геофизических спутников. 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 исследований. Существенным преимуществом использования экспериментального материала, полученного на спутниках Земли, является возможность анализа и интерпретации огромных массивов данных и построе-

ния магнитных карт над труднодоступными пространствами, где наземные и морские измерения отсутствуют, причем, получать и анализировать качественный материал возможно на различных уровнях наблюдений (Миловский и др., 2013, 2017).

Проблема связи неоднородностей земной коры и верхней мантии с поверхностными структурами является одной из центральных в современной геологии. В тектоносфере не существует изолированных друг от друга (региональных или локальных) структурных неоднородностей и аномалий геофизических полей, все они взаимосвязаны и взаимообусловлены динамически взаимодействующими системами глубинных геосфер (Нургалиев и др., 2008).

Известно, что измерение геомагнитного поля на спутниковых высотах является аналогом “фильтра низких частот”, т.к. с увеличением расстояния от

источника подавляются мелкие локальные аномалии, расположенные в самых верхних слоях земной коры, а параметры крупных региональных сохраняются в мало искаженном виде. При этом чем больше глубина залегания намагниченного тела и его горизонтальные размеры, тем медленнее его аномалия убывает с высотой, то есть аномалии, вызванные крупномасштабными структурами, залегающими в нижних частях земной литосферы, сохраняются практически неизменными.

Анализ карт аномального магнитного поля (АМП) на спутниковых высотах показал, что спутниковые наблюдения действительно малочувствительны к поверхностным структурам. На уровнях орбит над поверхностью Земли (~250–400 км) фиксируются именно низкочастотные литосферные магнитные аномалии интенсивностью порядка единиц – первых десятков нТл, пространственные размеры которых составляют ~200–400 км, сравнимые с высотой измерений (Nemant et al., 2005; Абрамова и др., 2009, 2011, 2016, 2019).

Интерес к изучению крупномасштабных, так называемых литосферных, магнитных аномалий (*lithospheric magnetic anomalies*) протяженностью в несколько сотен километров, пространственная структура которых отражает распределение магнитных свойств и особенности залегания слоев нижней части коры, в последние два десятилетия существенно вырос.

Источники аномалий магнитного поля континентальной литосферы сконцентрированы в, так называемом, магнитоактивном слое. По современным представлениям, нижним ограничением магнитоактивного слоя является либо раздел Моховичича, 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, Mooney, 2001).

Литосферные магнитные аномалии могут быть вызваны как изменением средней эффективной намагниченности блоков крупных участков литосферы, так и изменением мощности ее магнитоактивного слоя. При этом степень намагниченности именно нижней части земной коры играет наиболее существенную роль.

Исследования показали, что крупные тектонические единицы – щиты, кратоны и зоны субдукции характеризуются положительными магнитными аномалиями, вызванными повышенной магнитной восприимчивостью пород, а бассейны и абиссальные равнины – отрицательными аномалиями, причины возникновения которых объяснялись утонением коры и поднятием поверхности изотермы Кюри (Nemant, Maus, 2005).

Тот факт, что различные области земной коры характеризуются контрастом плотности минералов и степенью намагниченности слоев, позволя-

ет фиксировать тектонические границы различного вида, например, 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.). Магнитные аномалии создают возможность исследовать закономерности распределения магнитных неоднородностей в глубинной структуре земной коры, как бы “просвечивая” древние платформы.

В работах (Nemant, Maus, 2005; Nemant, Maus, Naak, 2005) показано, что при сравнении рассчитанных магнитных аномалий для глобальной геологической модели и наблюдаемых на спутнике CHAMP выявлены значительные несоответствия величин и форм аномалий в ряде регионов земного шара. Это зачастую обусловлено тем, что архейский фундамент полностью перекрывается малыми и большими фанерозойскими структурами с разделяющими их кайнозойскими, мезозойскими и палеозойскими складчатыми поясами (Goodwin, 1996). Для решения таких проблем необходимы дальнейшие серьезные исследования.

Конечно, пользоваться данными известных моделей для проведения расчетов геофизических параметров удобно, но зачастую они недостаточно адекватно отражают картину аномального магнитного поля литосферы, что нами проверялось неоднократно при сопоставлении параметров региональных аномалий, полученных при непосредственных измерениях и модельных построениях.

Возможности исследования свойств таких аномалий и их приложения к самым разным геолого-тектоническим процессам, протекающим в отдельных регионах Евразии, рассмотрены в настоящей работе.

#### КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ НА СПУТНИКЕ CHAMP И МЕТОДИКЕ ВЫДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

В 2000 г. был запущен германский искусственный спутник Земли CHAMP, поставлявший высокоточные геомагнитные данные практически в масштабе реального времени (Reigber et al., 2002). Даже при относительно невысокой альтитуде полета (в разные годы она изменялась в интервале 456–250 км), миссия просуществовала в два раза дольше запланированного срока благодаря устойчивой и надежной конструкции. На борту аппарата измерялись параметры магнитного и гравитационного полей Земли. После 10 лет, 2 месяцев и 4 дней работы на орбите спутник CHAMP, постепенно снижаясь, завершил свою миссию и сгорел в атмосфере над Охотским морем 19 сентября 2010 г. К концу его “жизни” высота орбиты составляла ~250 км. Таким образом, благодаря есте-

ственному уменьшению альтитуды, стало возможным использовать огромные массивы данных измерений геомагнитного поля на разных уровнях наблюдения практически над всей поверхностью земного шара. Успех миссии CHAMP продемонстрировал высокий научный и экономический потенциал спутниковых наблюдений за физическими полями Земли, а для российских геофизиков, получивших возможность бесплатно использовать уникальные данные, предоставил широкое поле для исследований.

Околополярная круговая орбита CHAMPa с углом наклона  $87.3^\circ$  позволяла проводить измерения в каждой точке пространства в разное локальное время практически в масштабе реального времени (Reigber et al., 2002), а низкая, по сравнению с другими миссиями, альтитуда наблюдений обеспечивала более точное разрешение измеряемых параметров. За одни сутки спутник делал порядка 14 витков, равномерно охватывая весь интервал долгот. Данные имели секундное разрешение по времени, что составляет в пространстве  $\sim 7$  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  $\pm 0.5$  нТл, компонент —  $\pm 3$  нТл.

Для анализа литосферного магнитного поля над обсуждаемыми ниже территориями и построения карт магнитных аномалий были отобраны, систематизированы и преобразованы в подходящую для дальнейшей обработки форму данные измерений компонент геомагнитного поля вдоль витков спутника CHAMP. Сформированы базы данных аномальной части поля модуля полного вектора  $T_a$  и вертикальной компоненты  $Z_a$  за 2010 год, когда высота орбиты CHAMP была близка к минимальному уровню  $\sim 280$ – $290$  км. При проведенном анализе наборы данных каждой компоненты аномального магнитного поля насчитывали порядка нескольких тысяч для каждой области исследования.

Основная проблема при осуществлении процесса выделения из измеренного суммарного поля части, обусловленной намагниченностью горных пород земной литосферы, заключалась в корректном разделении поля на составляющие от нескольких физических источников внутреннего и внешнего происхождения:

- 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, необходимого нам аномального поля литосферы.

Технология выделения параметров литосферного магнитного поля из спутниковых данных подробно описана в ряде наших публикаций, например, (Абрамова и др., 2016).

Кроме того, в процессе интерпретации поля литосферных магнитных аномалий на разных уровнях наблюдения периодически возникает необходимость привлекать данные модели EMAG2 WDMAM (*World Digital Magnetic Anomaly Map*). EMAG2 скомпилирована из материалов наземных, спутниковых, морских и аэромагнитных съемок (Maus et al., 2009). Разрешение сетки 2 угловые минуты, высота над геоидом 4 км.

### ЗОНА ТЕКТОНИЧЕСКОЙ КОЛЛИЗИИ В ЮГО-ВОСТОЧНЫХ КАРПАТАХ

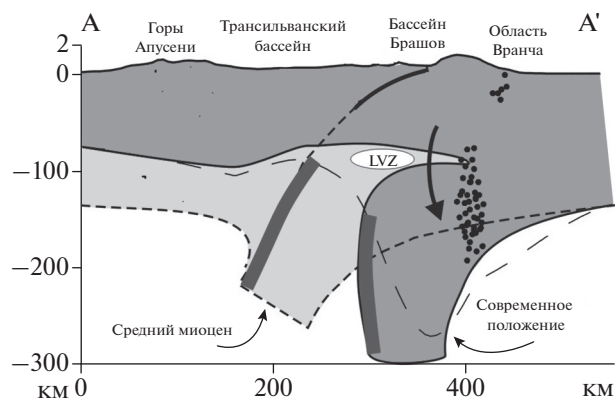
Отражение особенностей геолого-тектонического строения структур земной коры в аномальном литосферном магнитном поле можно видеть на примере процесса субдукции (погружения) холодной литосферной плиты с востока под юго-восточный угол Восточных Карпат на территории Румынии.

В настоящее время в геологии и геофизике активно обсуждаются механизмы и возможные варианты завершения этого процесса (Girbacea, Frish, 1998; Wortel, Spakman, 2000; Gvirtzman, 2002). Дело в том, что данный процесс предоставляет уникальную возможность для изучения конечного и коротко живущего этапа конвергенции литосферной плиты, когда ее погружающаяся часть, наконец, отрывается от надвигающейся пластины и вскоре начнет свободно тонуть в пластичную мантию. Иллюстрация предполагаемого процесса показана на рис. 1 (Girbacea, Frish, 1998).

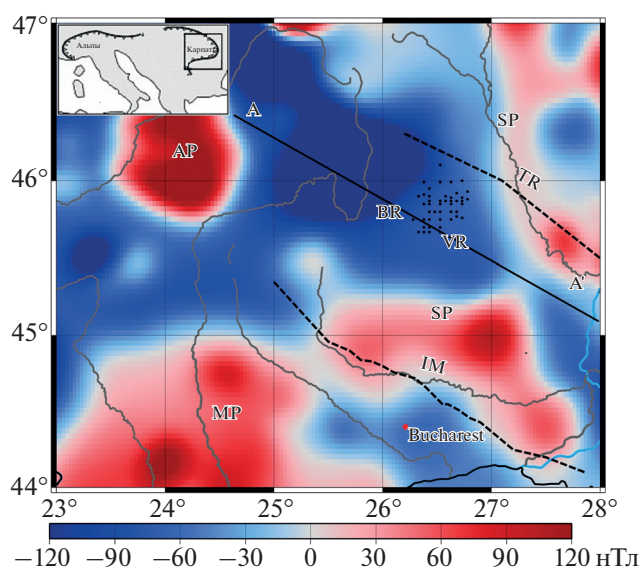
Плита, погружающаяся под Карпаты, находится на рисунке справа. Ее положение в среднем миоцене (16–11 млн лет назад) очерчено толстой пунктирной линией.

Переход от этой ситуации к настоящему времени (тонкий пунктир) включает в себя постепенное отслоение части погружающейся литосферы (так называемого, литосферного корня). Большая стрелка показывает, что в области бассейна Брашов отсоединяющаяся часть еще вязко связана с первоначальной литосферой и тянет ее вниз. Причем предполагается, что отсоединяемый корень, в основном, висит на отдельном блоке, ограниченном разломами Тротус (TR) и Интра-Мизийским (IM), показанными на рис. 2.

Область, обозначенная аббревиатурой AST на рис. 1, фиксирует предполагаемое поднятие с мантийных глубин нагретого астеносферного материала. Под этой зоной была прослежена аномалия пониженной сейсмической скорости (Fan et al.,



**Рис. 1.** Предполагаемая модель литосферной структуры в юго-восточном углу Карпат между разломами Тротус (TR) и Интра-Мизийским (IM); положение профиля AA' см. на рис. 2.



**Рис. 2.** Карта магнитных аномалий в зоне коллизии в Юго-Восточных Карпатах на высоте над геоидом 4 км. Масштаб карты 1 : 2 500 000. Квадрат на схеме в левом углу – область исследований. Аббревиатуры: SP – субдуцирующая плита, MP – Мизийская плита, AP – горы Апусени, BR – бассейн Брашов, VR – область Вранча. Разломы: IM – Интра-Мизийский, TR – Тротус.

1998), которая, по мнению этих авторов, может представлять собой поднявшийся астеносферный материал и свидетельствует о том, что, именно под бассейном Брашов, корень разъединения вязко связан с исходной литосферой и тянет ее вниз.

На поверхности Земли процесс разделения плиты генерирует мощные катастрофические землетрясения в зоне, проходящей через территорию бассейна Брашов и зону Вранча в NE-SW направлении. Черные точки под зоной Вранча на рис. 2 обозначают гипоцентры землетрясений именно

в том регионе, который в данный момент находится над местом отрыва части плиты.

Наличие тяжелого литосферного корня под юго-восточным углом Карпат подтверждается также топографическими наблюдениями. Считается, что для объяснения очень сильного изгиба зоны Юго-Восточного угла Карпат, должна быть приложена дополнительная сила, тянущая край субдуцирующей пластины. Последние исследования (Matenco, Bertotti, 2000), указывают на то, что площадь наибольшего изгиба угла Карпат также ограничена двумя коровыми разломами: Тротус и Интра-Мизийским.

Карта магнитных аномалий в зоне коллизии в Юго-Восточных Карпатах на уровне 4 км над поверхностью геоида, построенная по данным базы EMAG2, показана на рис. 2. На карте видна мозаичная структура чередующихся крупных положительных и отрицательных аномалий. В северной части карты магнитных аномалий сейсмически активная зона Юго-Восточных Карпат, в основном, характеризуется отрицательными значениями магнитного поля, за исключением изометрической положительной магнитной аномалии над горами Апусени.

Надвигающаяся с востока под Юго-Восточные Карпаты плита (SP) которая с юга ограничена Интра-Мизийским разломом (IM), а с севера – разломом Тротус (TR), территориально совпадает с положительными значениями аномального поля.

В юго-западной части присутствует крупная положительная аномалия MP, расположенная над западной частью Мизийской платформы.

Очень значительная отрицательная аномалия наблюдается над бассейном Брашов (BR) и областью Вранча VR (последняя отмечена точками координат сильных и катастрофических коровых землетрясений).

Таким образом, все тектонические особенности этого региона вполне логично отражаются в аномальном литосферном магнитном поле на карте рис. 2.

1. Сильный изгиб форландового бассейна Юго-Восточных Карпат и его форма фиксируется значительным градиентом и формой отрицательной магнитной аномалии.

2. Положительная аномалия погружающейся плиты ограничена положением разломов Тротус и Интра-Мизийского и резким изменением значений аномального поля с положительных на отрицательные.

3. Отрицательные значения аномального магнитного поля в бассейне Брашов обусловлены уменьшением мощности магнитоактивного слоя ввиду высокого положения нагретой астеносферы, а следовательно, подъемом изотермической поверхности Кюри магнетита.

Интересная особенность влияния температуры на намагниченность нижней части коры проявляется в том, что положительная магнитная аномалия над погружающейся плитой SP в центральной ее части, там, где предполагается подъем нагретой астеносферы, разделена на две половины, что свидетельствует о мощном прогреве астеносферным теплом далее к востоку от литосферного корня.

Таким образом, предположение о возможности подъема нагретого астеносферного материала с мантийных глубин, сделанное по данным сейсмоки, находит свое подтверждение в наблюдениях аномального магнитного поля.

### МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ КРУПНЫХ ИЗВЕРЖЕННЫХ ПРОВИНЦИЙ

Анализ литосферных магнитных аномалий может играть существенную роль при изучении глубинного строения активных регионов, таких, например, как Центральная Азия и Сибирская вулканическая провинция. Изучение последствий вулканической активности для подобных крупных изверженных провинций LIP (*large igneous provinces*) в настоящее время активно развивается в геологии и геофизике. Анализ геологических процессов, связанных с формированием LIP и проявлением мантийных плюмов<sup>1</sup>, позволяет выявить специфические особенности условий зарождения и развития рудообразующих систем, функционирование которых нередко приводит к формированию крупных и уникальных рудных месторождений (Добрецов и др., 2010). Выявленные особенности размещения разных типов полезных ископаемых в ареалах LIP, их возрастные и генетические связи с определенными типами магматизма являются основой для разработки комплекса геологических, магматических, литологических и геохимических критериев прогноза и оценки перспектив выявления запасов полезных ископаемых (Pirajno, 2004).

Далее мы рассмотрим карты литосферных магнитных аномалий двух областей, явившихся результатами магматических извержений: Таримскую крупную изверженную провинцию на территории Центрально-Азиатского складчатого пояса и Хатангский центр трапповых излияний (Таймыр). В ареале этих структур образовались крупные месторождения меди, никеля, платины, палладия и др., обусловленные упомянутыми тектоническими процессами (Добрецов, 2008).

<sup>1</sup> Под плюмом понимается горячий мантийный поток, движущийся от основания мантии у ядра Земли. Главным агентом теплопереноса является "горячая струя" расплава. Мантийные плюмы считаются ответственными за возникновение траппов, внутриконтинентальных рифтов и горячих точек.

### ТАРИМСКАЯ ИЗВЕРЖЕННАЯ ПРОВИНЦИЯ

В ряде районов Центральной Азии вследствие развития траппового магматизма существуют области, имеющие чрезвычайно сложную структуру литосферы, составленную серией складчатых поясов и кристаллических массивов (микроконтинентов) с докембрийским фундаментом (Huang J., Zhao, 2006; Диденко и др., 2010). Тектоническая активность ярко проявляется здесь до настоящего времени, ее природа определяется сложным взаимодействием литосферных плит и активными мантийными процессами. Актуальной задачей геодинамических исследований в данном регионе является определение границ жестких блоков (микроплит) и окружающих их зон пластических деформаций. Вблизи этих границ концентрируются эпицентры большей части землетрясений, это наиболее сейсмически активные области в Центральной Азии (Chen et al., 1997; Ghose et al., 1998; Tanaka et al., 1999; Gao et al., 2000). Многие землетрясения происходят на стыке жестких литосферных блоков и в окрестности зон пластических деформаций. Сложность геолого-тектонического устройства этой области хорошо иллюстрирует тектоническая схема, показанная на рис. 3.

В этой связи фиксация положения градиентных зон литосферных магнитных аномалий и их оконтуривание представляется важной при решении задач выделения областей повышенной сейсмической активности и глубин их залегания.

Составной частью этого региона является, в частности, Таримская изверженная провинция (Таримский массив) с ареалами медно-никелевых и платиновых оруденений.

Таримский массив, расположенный на северо-западе Китая и занимающий площадь ~500000 км<sup>2</sup>, в плане напоминает двояковыпуклую линзу, вытянутую в широтном направлении. Эта "линза" на севере обрамлена складчатыми структурами Тянь-Шаня, а на юге – орогенами Куньлуня и Тибета.

Для определения положения и степени однородности аномального магнитного поля в самых нижних частях земной коры этой территории по данным измерений спутника CHAMP построены карты вертикальной компоненты  $Z_a$  аномального магнитного поля. Данные взяты за 6 месяцев 2010 г., когда высота полета спутника составляла ~280–290 км.

В качестве примера на рис. 4 приведена карта аномалий вертикальной компоненты  $Z_a$ . При ее построении использовано медианное осреднение по блокам размером 60 × 60 км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

Структура Тарима отчетливо проявляется в виде конформной положительной аномалии с амплитудой ~10 нТл и положением центра ~38° с.ш./

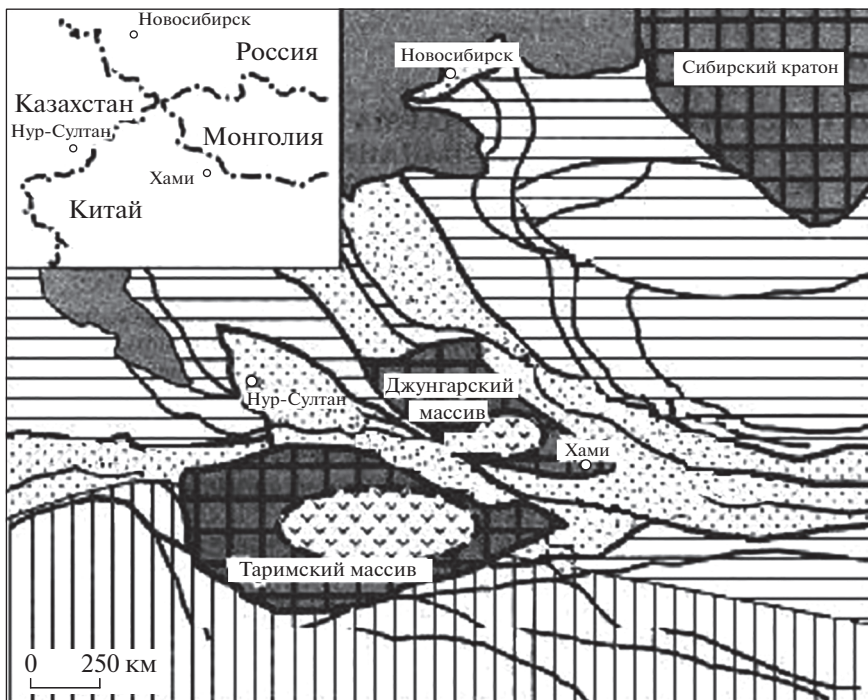


Рис. 3. Тектоническая схема Центрально-Азиатского региона (Huang J., Zhao, 2006).

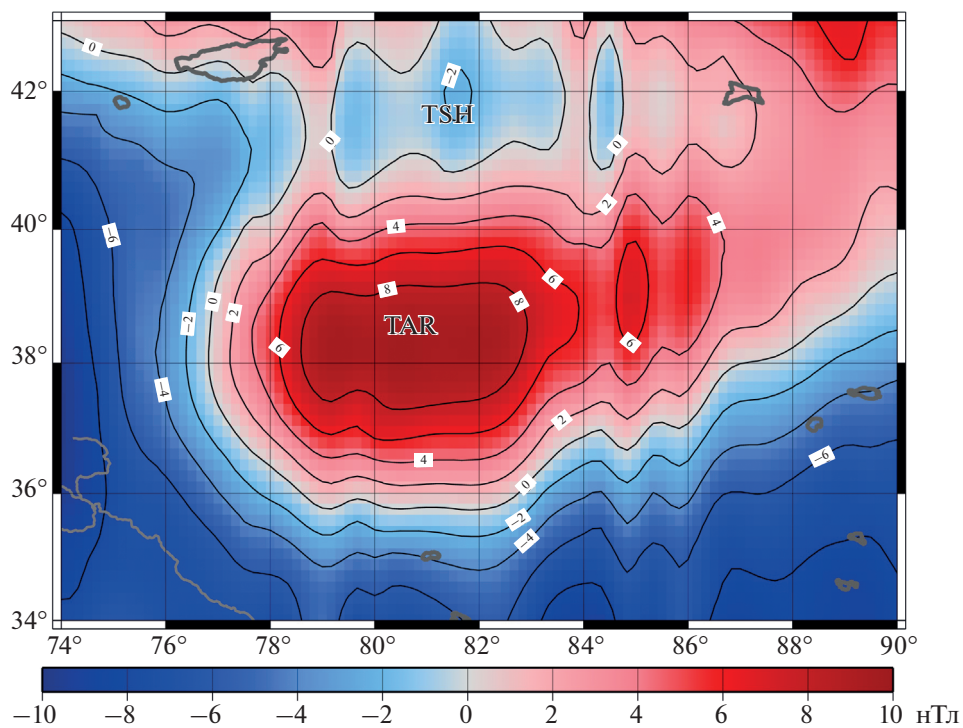
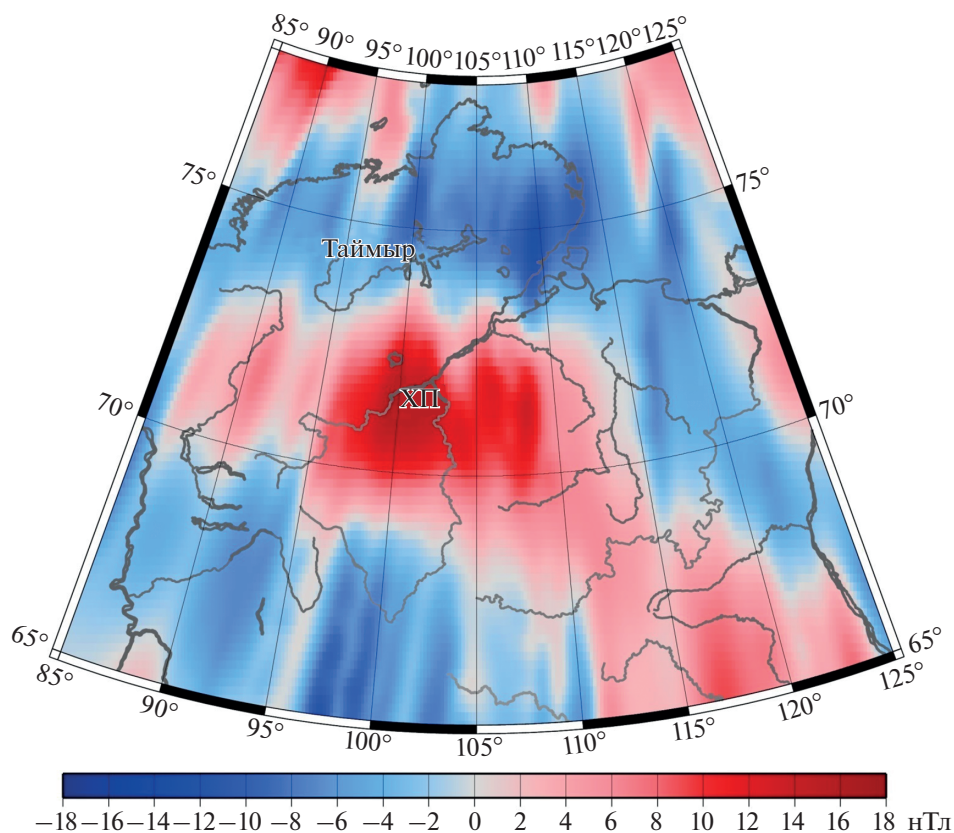


Рис. 4. Карта аномалий вертикальной компоненты  $Z_a$  (нТл) литосферного магнитного поля CHAMP над Таримским массивом. TSH – Тянь-Шань; TAR – Тарим.



**Рис. 5.** Карта модуля полного вектора магнитного поля,  $T_a$  на высоте спутника CHAMP  $\sim 280$  км над территорией Хатангского центра трапповых излияний. При построении использовано медианное осреднение по блокам размером  $80 \times 80$  км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

$81^\circ$  в.д., отражающей интенсивную намагниченность и высокую однородность нижней части земной коры.

Складчатая система Тянь-Шаня видна как седловина с нулевым уровнем литосферного магнитного поля. Пониженный уровень аномального поля обусловлен здесь, в первую очередь, уменьшением мощности магнитоактивного слоя, особенно резким в пределах складчатых областей в силу аномального геотермического режима, что предполагает высокое положение изотермы Кюри и потерю магнитных свойств коровых структур.

Поскольку большинство землетрясений происходит в пограничных областях на стыке жестких литосферных блоков и в окрестности зон пластических деформаций, фиксация градиентных зон литосферных магнитных аномалий представляется весьма важным для выделения областей повышенной сейсмической угрозы.

#### ХАТАНГСКИЙ ЦЕНТР ТРАППОВЫХ ИЗЛИЯНИЙ

Сибирская вулканическая провинция, частью которой является Хатангский центр трапповых излияний, или Хатангский плюм (ХП), представляет собой одно из крупнейших из известных последствий вулканической активности (Добрецов и др., 2010).

Магнитный образ Хатангского плюма (ХП) показан на рис. 5. В центре карты находится обширная изометрическая область положительных значений магнитного поля с центральным “ядром” в пределах  $95/110^\circ$  в.д. и  $70/74^\circ$  с.ш. Амплитуда центральной магнитной аномалии достигает максимальных величин  $\sim 18$  нТл. Размер аномалии по долготе составляет порядка  $550$  км, в том числе, “ядра” —  $330$  км; размер по широте — общий  $\sim 760$  км, “ядро”  $\sim 530$  км.

Аномалия имеет четкие границы на западной, северной, южной окраинах, а на юго-восток продолжается с меньшими значениями и размытыми границами.

Западнее на той же широте видна более слабая положительная аномалия, также изометрической формы. Эти аномалии окружены ансамблем отрицательных аномалий, амплитуды которых имеют порядок величин  $8-12$  нТл.

Такая форма аномалии типична для магнитных образов глубинных структур плюмовой при-

роды. Как и в предыдущем примере с Таримской изверженной провинцией, параметры аномалии, представляющей собой образ строения нижней части коры, позволяет делать выводы о размерах и степени однородности ее намагниченной части и оценивать температурные условия в этой структуре.

### КОЛЫМО-ОМОЛОНСКИЙ МИКРОКОНТИНЕНТ

Настоящий раздел призван проиллюстрировать возможности приложения результатов интерпретации спутниковых наблюдений литосферного магнитного поля для коррекции имеющихся геодинамических моделей земной коры с учетом реально измеренных спутниковых данных и дальнейшего совершенствования интерпретации с учетом перспектив получения новых экспериментальных спутниковых наблюдений.

С этой целью рассмотрим результаты построения и анализа литосферных магнитных аномалий над Колымо-Омолонским микроконтинентом (КОМ) по данным спутника CHAMP.

В 2005 г. авторами (Nemant, Maus, 2005) построена глобальная модель вертикальной компоненты аномального магнитного поля  $Z_a$  с использованием созданной ими глобальной модели намагниченности. Последняя базируется на глобальном распределении намагниченности геологических областей Земли в целом, полученном по данным мировой геологической карты ЮНЕСКО (Commission, 2000). Дополнительная петрологическая и сейсмическая информация объединялись авторами модели в Географической системе ГИС. По построенной модели намагниченности было рассчитано теоретическое аномальное литосферное поле  $Z_a$  для высоты наблюдения 400 км, которое затем было сравнено с доступными на то время результатами наблюдений на спутнике CHAMP на этой же высоте.

По оценкам авторов, часть теоретически предсказанных мировых аномалий достаточно хорошо совпала с измеренными на спутнике, однако, для целого ряда выявились существенные расхождения (Nemant, Maus, 2005). Это свидетельствовало о недостаточном учете неких параметров в модели намагниченности глубинных слоев земной коры, в том числе это выяснилось и для Колымо-Омолонского микроконтинента.

Цель исследования (Nemant, Maus, 2005) в этой части заключалась в том, чтобы показать, что из параметров магнитных аномалий, наблюдаемых на спутнике, может быть извлечена количественная геологическая информация, которая далее может быть использована для уточнения глубинных границ докембрийских провинций, перекрытых по поверхности фанерозойскими отложениями,

и коррекции параметров при совершенствовании геологической модели.

На панели рис. 6а показана карта наблюдаемых аномалий  $Z_a$  на высоте 400 км над областью КОМ, на рис. 6б — значения поля, рассчитанные по данной исходной модели намагниченности для этой же территории. При задании исходных параметров глобальной модели была использована форма КОМ, показанная на рис. 6д. Графики (рис. 6г) изменения значений аномального магнитного поля  $Z_a$  вдоль профиля AA' (см. рис. 6а) демонстрируют несогласие измеренных и модельных данных (кривые 1 и 3).

В настоящее время Колымо-Омолонский микроконтинент практически весь погребен под более молодыми отложениями, за исключением незначительных выходов докембрийских пород и точно определить его очертания весьма проблематично. Ранее предполагалось (Howell, Wiley, 1987), что форма блока со времени ранней юры до настоящего времени изменений не претерпела, несмотря на мощные процессы тектонической активизации, протекавшие здесь на протяжении указанного интервала времени.

Построенное по этим параметрам КОМ положение литосферных магнитных аномалий, рис. 6б, оказалось не соответствующим наблюдаемому полю (рис. 6а), причина такого расхождения лежала, скорее всего, в неверном задании модельных параметров блока.

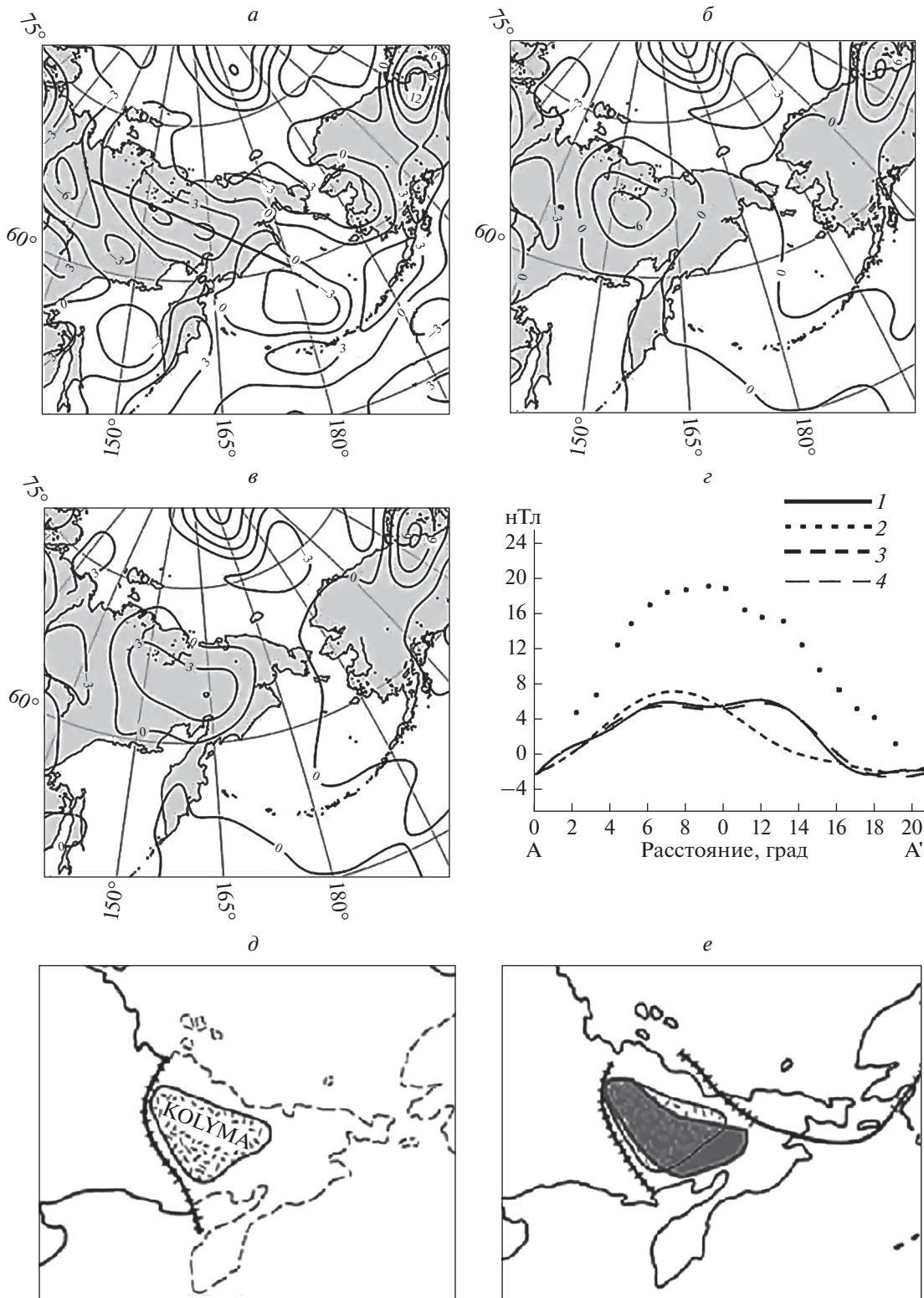
В исходную модель были внесены изменения границ Колымо-Омолонского микроконтинента, показанные на рис. 6е, где затемненная область демонстрирует новую форму микроконтинента, использованную при расчетах следующей итерации модели магнитной восприимчивости. На карте распределения аномального магнитного поля для измененной модели, приведенной на рис. 6в, видно, что после коррекции границ микроконтинента аномальное поле достаточно хорошо согласуется с измеренным на спутнике, рис. 6а.

Профильные кривые рис. 6г также показывают лучшее согласие наблюдаемой и прогнозируемой аномалии по сравнению с исходной моделью, что демонстрирует перспективность пересмотра форм геологических структур земной коры, перекрытых более молодыми отложениями.

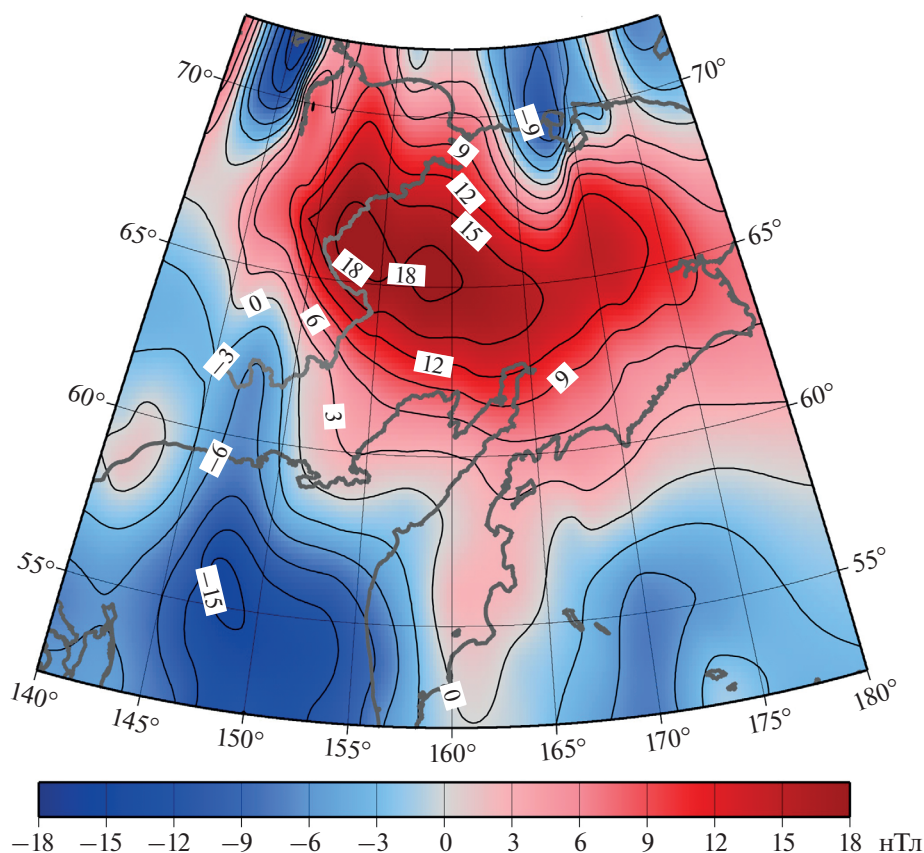
По данным спутника CHAMP за 2010 г. с помощью нашей технологии мы выделили часть, относящуюся к магнитному полю литосферы, и построили карты распределения вертикальной компоненты  $Z_a$  над территорией Колымо-Омолонского микроконтинента на высоте 280 км, рис. 7.

Заметим, что аномалия в центральной части имеет значительную для этой высоты амплитуду ~18 нТл. Форма аномалии — изометрическая,





**Рис. 6.** (а) Карта наблюдаемых аномалий  $Z_a$  на высоте 400 км над КОМ; (б) карта, посчитанная по данным исходной модели намагниченности; (в) скорректированная карта с учетом изменения формы КОМ; (z) магнитное поле вдоль профиля AA' где: 1 – наблюдаемое на высоте 400 км, 2 – то же на высоте 280 км, 3 – посчитанное по исходной модели намагниченности, 4 – то же – по скорректированной форме КОМ (Nemant, Maus, 2005 с некоторыми добавлениями); (d, e) – тектоническая реконструкция КОМ со времени ранней юры (d) по настоящее время (e) (Howell, Wiley, 1987).



**Рис. 7.** Карта вертикальной компоненты  $Z_a$  аномального магнитного поля на высоте спутника CHAMP ~280 км над территорией Колымо-Омолонского микроконтинента. При построении использовано медианное осреднение по блокам размером  $60 \times 60$  км средствами GMT (blockmedian) (Wessel, Smith, 2007).

исключение составляет ее слабое продолжение к югу на восточную часть п-ва Камчатка.

Как видно из карты, границы аномалии имеют более сложную изрезанную форму, чем на уровне 400 км, что открывает перспективы уточнения параметров погруженных блоков земной коры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что поле литосферных магнитных аномалий, выделенных по геомагнитным измерениям спутника Земли CHAMP, отражает реальные особенности глубинных геолого-тектонических структур.

Карты спутниковых магнитных аномалий в области Юго-Восточных Карпат иллюстрируют их согласованность с гипотезой процесса субдукции литосферной плиты в этом регионе. На примере зоны коллизии в Юго-Восточных Карпатах показана возможность подтверждения существования подповерхностных разрывов, скрытых под отложениями или надвигами по магнитным данным.

Построенные по данным спутника CHAMP карты аномалий модуля полного вектора  $T_a$  и вер-

тикальной компоненты  $Z_a$  литосферного магнитного поля на высотах 280–290 км отражают активные тектонические процессы, протекавшие в исследуемых регионах, и их последствия. Примеры анализа параметров отдельных региональных литосферных магнитных аномалий, наблюдаемых над Таримской изверженной провинцией, Хатангским центром трапповых излияний и Колымо-Омолонским микроконтинентом, показывают перспективность использования геомагнитных спутниковых данных для уточнения границ погруженных докембрийских провинций, перекрытых фанерозойскими отложениями.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что спутниковые геомагнитные наблюдения добавляют ценную информацию к региональным геологическим исследованиям, и литосферное магнитное поле как параметр, отражающий положение структур нижней части земной коры и изменение их физических свойств, может с успехом быть использовано для их выделения, оконтуривания и коррекции положения в пространстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. Длинно-волновые магнитные аномалии на территории России по измерениям спутника CHAMP // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 48–63.
- 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., Филиппов С.В., Абрамова Л.М., Варенцов И.М., Лозовский И.Н. Трансформация литосферных магнитных аномалий с высотой (по данным спутника CHAMP) // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. № 2. С. 254–264.
- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов И.М., Филиппов С.В. Исследование литосферных магнитных аномалий Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса по данным измерений на спутнике CHAMP // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 5–18.  
<https://doi.org/10.21455/gr2019.2-1>
- Диденко А.Н., Каплун В.Б., Мальшев Ю.Ф., Шевченко Б.Ф. Структура литосферы и мезозойская геодинамика востока Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 629–647.
- Добрецов Н.Л. Геологические следствия термохимической модели плюмов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1159–1187.
- Миловский Г.А., Орлянкин В.Н., Ишмухаметова В.Т., Ненадов Я.В. Перспективы нефтегазоносности Лено-Анабарской прогиба и Оленекской зоны дислокаций по космическим и магнито-гравиметрическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 28–34.
- Миловский Г.А., Ишмухаметова В.Т., Шемякина Е.М. Применение результатов дистанционного зондирования для выявления закономерностей локализации медно-никелевого оруденения в Норильском рудном районе // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 2. С. 52–63.
- Нургаллиев Д.К., Равилова Н.Н., Шукин Ю.К. Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов // Геофизический вестник. 2008. № 3. С. 5–10.
- Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л. Скоростное строение верхней мантии Европы по результатам шумовой поверхностно-волновой томографии // Физика Земли. 2013. № 5. С. 3–11.
- Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2001. V. 106 (B8). P. 16387–16414.
- Chen Y., Roecker S., Kosarev G. Elevation of the 410-km discontinuity beneath the central Tien Shan: Evidence for a detached lithospheric root // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. P. 1531–1534.
- Commission for the Geological Map of the World (CGMW). Geological map of the World. Paris: UNESCO, 2000.
- 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. 2000. V. 45. P. 2281–2286.
- Ghose S., Hamburger W., Virieux J. Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tien Shan of Kyrgyzstan, central Asia // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 2725–2748.
- Girbacea R., Frisch W. Slab in the wrong place: Lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathian subduction retreat // Geology. 1998. V. 26. P. 611–614.
- Goodwin A.M. Principles of Precambrian Geology. New York: Elsevier, 1996. 327 p.
- Gvirtzman Z. Partial detachment of a lithospheric root under the southeast Carpathians: toward a better definition of the detachment concept // Geology. 2002. V. 30. P. 51–54.
- Fan G., Wallace T.C., Zhao D. Tomographic imaging of deep velocity structure beneath the eastern and southern Carpathians, Romania: Implications for continental collision // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 2705–2723.
- 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.
- Howell D.G., Wiley T.J. Crustal evolution of northern Alaska inferred from sedimentology and structural relations of the Kandik area // Tectonics. 1987. V. 6. P. 619–631.
- Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. 1–21.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozina N., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., The'bault E., Caratori Tontini F. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. 2009. V. 10(8). Q08005.  
<https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Matenco L., Bertotti G. Tertiary tectonic evolution of the external East Carpathians (Romania) // Tectonophysics. 2000. V. 316. P. 255–286.
- Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Kluwer: Academic Publishers, 2004. 556 p.
- 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](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4)
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // Tectonophysics. 1999. V. 306. P. 461–470.
- Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. <http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Wortel M.J.R., Spakman W. Subduction and slab detachment the Mediterranean – Carpathian region // Science. 2000. V. 290 (5498). P. 1910–1917.

## About Possibilities of Satellite Observations Application to the Earth Geological-Tectonic Structure Study

D. Yu. Abramova<sup>1</sup>, S. V. Filippov<sup>1</sup>, and L. M. Abramova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia

<sup>2</sup> Geoelectromagnetic Research Centre, Shmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Troitsk, Russia

The image features of the geological-tectonic structure parameters in lithospheric magnetic anomalies field obtained from measurements of the Earth's satellite CHAMP are analyzed. Using a specially developed original technology for separating anomaly field part from the total volume of CHAMP satellite records, experimental database of the full vector module  $T_a$  and the vertical component  $Z_a$  values of the lithospheric magnetic field at satellite altitudes has been created. The position of large-scale anomalies over of the Eastern Carpathians territories, the Tarim and the Khatanga large igneous provinces, as well as the Kolyma-Omolon microcontinent was determined. The application of data on the structures magnetization at lower crustal depths to a joint analysis with other geophysical methods allows us to identify specific conditions of origin and evolution of mantle and mantle-crust ore-forming systems leading to the formation of large and unique ore deposits. It is shown that quantitative geological information can be extracted from magnetic data by revision the boundaries of Precambrian provinces covered by Phanerozoic deposits. The lithospheric magnetic field as a parameter illustrating the actual position of the structures of the lower crust and their physical properties can be efficiently used for their contouring and correction in combination with other geological and geophysical methods.

**Keywords:** Satellite magnetic observations, lithospheric magnetic anomalies, collisional zone Vrancea, Tarim, Khatanga, Kolyma-Omolon microcontinent

### REFERENCES

- Abramova D. Yu., Filippov S. V., Abramova L. M.* Dlinnovolnovyye magnitnyye anomalii na territorii Rossii po izmereniyam sputnika CHAMP [Longwave magnetic anomalies at the territory of Russia from the CHAMP satellite measurements] // *Geofizicheskie issledovaniya*. 2009. V. 10. № 2. P. 48–63 (in Russian).
- Abramova D. Yu., Abramova L. M., Filippov S. V., Frunze A. Kh.* O perspektivah ispolzovaniya sputnikovyykh izmereniy dlya analiza regionalnykh magnitnykh anomaliiy [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. Yu., Filippov S. V., Abramova L. M., Varentsov I. M., Lozovskiy I. N.* Transformatsiya litosfernykh magnitnykh anomaliiy s vysotoy (po dannym sputnika CHAMP) [Changes of lithospheric magnetic anomalies with altitude (according to the CHAMP satellite)] // *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2016. № 2. P. 254–264 (in Russian).
- Abramova D. Yu., Abramova L. M., Varentsov I. M., Filippov S. V.* Issledovanie litosfernykh magnitnykh anomaliiy Grenlandsko-Islandsko-Farerskogo vulkanicheskogo kompleksa po dannym izmereniy na sputnike CHAMP [Investigation of lithospheric magnetic anomalies of the Greenland – Iceland – Faroe ridge complex on measurements of the CHAMP satellite] *Geofizicheskie issledovaniya*. 2019. V. 20. № 2. P. 5–18. doi.org/10.21455/gr2019.2-1 (in Russian).
- Artemieva I. M., Mooney W. D.* Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study. // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2001. V. 106 (B8). P. 16387–16414.
- Chen Y., Roecker S., Kosarev G.* Elevation of the 410-km discontinuity beneath the central Tien Shan: Evidence for a detached lithospheric root // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 1531–1534.
- Commission for the Geological Map of the World (CGMW). Geological map of the World. Paris: UNESCO. 2000.
- Didenko A. N., Kaplun V. B., Malyshev Yu. F., Shevchenko B. F.* Struktura litosfery i mezozoyskaya geodinamika vostoka Tsentralno-Aziatskogo skladchatogo poyasa // *Geologiya i geofizika*. [Lithospheric structure and mezozoic geodynamics of the Eastern central Asian fold belt] // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. № 5. P. 629–647 (in Russian).
- Dobretsov N. L.* Geologicheskie sledstviya termohimicheskoy modeli plyumov [The geological consequences of thermochemical model of mantle plumes] // *Geologiya i geofizika*. 2008. V. 49. № 7. P. 587–604 (in Russian).
- Dobretsov N. L., Borisenko A. S., Izoh A. E., Zhmodik S. M.* Termohimicheskaya model permotriasovykh mantiynykh plyumov Evrazii kak osnova dlya vyiyavleniya zakonornostey formirovaniya i prognoza medno-nikelevykh, blagorodno- i redkometallnykh mestorozhdeniy [Thermochemical model of Permian mantle plumes of Eurasia as a basis for revealing regularities of formation and forecast of copper-nickel, noble and rare metal deposits] // *Geologiya i geofizika*. 2010. V. 51. № 9. P. 1159–1187 (in Russian).
- 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.* 2000. V. 45. P. 2281–2286.
- Ghose S., Hamburger W., Virieux J.* Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tien Shan of Kyrgyzstan, central Asia // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 2725–2748.
- Girbacea R., Frisch W.* Slab in the wrong place: Lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the

- Eastern Carpathian subduction retreat // *Geology*. 1998. V. 26. P. 611–614.
- Goodwin A.M.* Principles of Precambrian Geology. New York: Elsevier, 1996. 327 p.
- Gvirtzman Z.* Partial detachment of a lithospheric root under the southeast Carpathians: toward a better definition of the detachment concept // *Geology*. 2002. V. 30. P. 51–54.
- Fan G., Wallace T.C., Zhao D.* Tomographic imaging of deep velocity structure beneath the eastern and southern Carpathians, Romania: Implications for continental collision // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 2705–2723.
- 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.
- Howell D.G., Wiley T.J.* Crustal evolution of northern Alaska inferred from sedimentology and structural relations of the Kandik area // *Tectonics*. 1987. V. 6. P. 619–631.
- Huang J., Zhao D.* High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. 1–21.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozina J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Muller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thébaud E., Caratori Tontini F.* EMAG2: A 2–arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009. V. 10(8). Q08005. doi: 10.1029/2009GC002471
- Matenco L., Bertotti G.* Tertiary tectonic evolution of the external East Carpathians (Romania) // *Tectonophysics*. 2000. V. 316. P. 255–286.
- Milovskiy G.A., Orlyankin V.N., Ishmuhametova V.T., Nenadov Ya.V.* Perspektivy neftegazonosnosti Leno-Anabarskogo progiba i Olenyokskoy zonyi dislokatsiy po kosmicheskim i magnito-gravimetricheskim dannym [Prospects of oil and gas potential of the Leno-Anabar deflection and Olenok dislocation zone according to space and magneto-gravimetric data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2013. № 1. P. 28–34 (in Russian).
- Milovskiy G.A., Ishmuhametova V.T., Shemyakina E.M.* Primenenie rezultatov distantsionnogo zondirovaniya dlya vyyavleniya zakonornostey lokalizatsii medno-nikel-evogo orudneniya v Norilskom rudnom rayone [Application of remote sensing results to identify patterns of localization of copper-nickel mineralization in the Norilsk ore region] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2017. № 2. P. 52–63 (in Russian).
- Nurgaliev D.K., Ravilova N.N., Schukin Yu.K.* Izmenyayushchayasya geologicheskaya sreda: prostranstvenno-vremennyye vzaimodeystviya endogennykh i ekzogennykh protsessov [Changing geological environment: spatial-temporal interactions of endogenous and exogenous processes] // *Geofizicheskiy vestnik*. 2008. № 3. P. 5–10 (in Russian).
- Pirajno F.* Ore deposits and mantle plumes. Kluwer: Academic Publishers, 2004. 556 p.
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P.* CHAMP mission status // *Advances in Space Research*. 2002. V. 30 (2). P. 129–134. doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O.* Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // *Tectonophysics*. 1999. V. 306. P. 461–470.
- Wessel P., Smith W.H.F.* The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2. 2007. <http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Wortel M.J.R., Spakman W.* Subduction and slab detachment the Mediterranean – Carpathian region // *Science*. 2000. V. 290 (5498). P. 1910–1917.
- Yanovskaya T.B., Lyiskova E.L.* Skorostnoe stroenie verkhney mantii Evropy po rezultatam shumovoy poverhnostno-volnovoy tomografii [Velocity structure of the upper mantle of Europe by results of noise surface-wave tomography] // *Fizika Zemli*. 2013. № 5. P. 3–11 (in Russian).