

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕГИОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

© 2011 г. Д. Ю. Абрамова^{1*}, Л. М. Абрамова², С. В. Филиппов¹, А. Х. Фрунзе¹

¹Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк

²Центр геоэлектромагнитных исследований Объединенного института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, Троицк

*E-mail: abramova@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.02.2011 г.

Новые возможности исследования латеральных изменений магнитных свойств литосферы и мощности намагниченных слоев на больших глубинах возникли с появлением карт региональных аномалий постоянного магнитного поля, полученных по данным спутников. Параметры орбиты спутника CHAMP (Германия) позволяют непрерывно измерять геомагнитное поле в узлах равномерной сетки, практически полностью покрывающей поверхность Земного шара. Это дает уникальную возможность достаточно надежно выделить из измеренных значений геомагнитного поля вклад постоянного аномального магнитного поля литосферной природы, который определяется положением магнитных масс в земной коре. Обработаны данные компонентных измерений магнитного поля на спутнике CHAMP. Сделан анализ распределения величины вертикальной компоненты аномального магнитного поля Z_a , рассчитанного по результатам спутниковых измерений над некоторыми регионами Евразии, показана его согласованность с геологическими представлениями о строении земной коры эти территорий.

Ключевые слова: спутниковые геомагнитные наблюдения, литосферное магнитное поле, региональные магнитные аномалии, намагниченность земной коры.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования последних десятилетий показали, что тектоносфера Земли состоит из разноранговых разноплановых неоднородностей, положение которых в разрезе и по латерали не всегда однозначно коррелирует с видимыми на дневной поверхности геологическими структурами. В связи с этим возникает потребность глубинного картирования неоднородностей коры и верхней мантии, связанная с проблемой формирования глубинных критериев минерагенического прогноза (нефть, газ, твердые полезные ископаемые) и создания нового поколения карт прогноза скрытых месторождений (Щукин, 2005).

В связи с этим возрос интерес к изучению крупномасштабных аномалий протяженностью в сотни километров, которые проявляются при региональных обобщениях данных аэромагнитных съемок. Пространственные изменения параметров этих длинноволновых аномалий отражают характеристики магнитных свойств и мощности намагниченных слоев на больших глубинах. К сожалению, получить региональную карту, отображающую магнитные поля глубинных источников, используя экспериментальный материал только

наземных и аэромагнитных съемок, практически невозможно. Это связано с тем, что из-за небольшой высоты полета при аэромагнитных съемках поверхностные источники магнитных полей подавляют сигналы глубинных областей земной коры.

Возможность по-новому взглянуть на крупномасштабные магнитные аномалии возникла благодаря запуску спутников, оснащенных специальной аппаратурой, позволяющей получить данные о параметрах геомагнитного поля Земли: Pogo (1965–1971 гг.) (Regan et al., 1975), Magsat (1979–1980 гг.) (Langel et al., 1982; Cain et al., 1989; Пашкевич и др., 1990; Arkani-Hamed et al., 1994; Ravat et al., 1995; Sabaka et al., 2000) и Oersted (1999–2002 гг.), (Olsen et al., 2000).

Анализ пространственного распределения магнитного поля показывает (Nemant, Maus, 2005; Nemant, Maus, Naak, 2005), что на спутниковых высотах высокочастотные аномалии сглаживаются, а низкочастотные региональные аномалии с размерами пространственных периодов 400–500 км и интенсивностью порядка первых десятков нТл остаются. Спутниковые наблюдения малочувствительны к мелкомасштабным структу-

рам, что позволяет выделять региональные литосферные аномалии, не осложненные локальной компонентой. В последние годы спутниковые данные широко используются при геофизической интерпретации, обеспечивая длинноволновую часть литосферного поля как основу для наземных, морских и аэромагнитных съемок.

Исследования, проведенные на базе измерений магнитного поля на спутниках, показали, что крупномасштабные тектонические единицы — щиты, кратоны и зоны субдукции — характеризуются положительными аномалиями (вызванными повышенной магнитной восприимчивостью), а бассейны и абиссальные равнины — отрицательными аномалиями, причины возникновения которых объяснялись утонением коры и поднятием изотермы Кюри (Nemant, Maus, 2005).

Начиная с 2000 г., возможность анализа параметров геомагнитного поля серьезно расширилась в связи с запуском германского спутника CHAMP, поставляющего высокоточные данные практически в масштабе реального времени. По сравнению с предыдущими спутниками, CHAMP имеет следующие преимущества: на порядок улучшена точность измерений, возросла длительность съемки, выбрана более удачная конфигурация орбиты. Например, околополярная орбита CHAMP в отличие от солнечно-синхронной орбиты Magsat позволяет проводить измерения в каждой точке пространства в разное местное (локальное) время, а более низкая высота полета, чем у Oersted, обеспечивает несколько лучшее разрешение.

Авторы настоящей работы получили положительный опыт исследований аномального магнитного поля с использованием спутниковых геомагнитных данных CHAMP, полученных над территорией Восточной Европы (Абрамова и др., 2009).

Задача настоящей работы — показать возможные перспективы использования спутниковых измерений для анализа морфологии и геолого-геофизических свойств региональных литосферных магнитных аномалий.

ВЫБОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для построения карт аномального магнитного поля использованы данные спутника CHAMP, который на протяжении уже 10 лет обеспечивает международное научное сообщество надежными измерениями скалярных и векторных параметров геомагнитного поля с высоким разрешением и плотностью покрытия поверхности Земли.

Малый научный спутник CHAMP (Challenging Minisatellite Payload for Geophysical Research and Application) был запущен 15 июля 2000 г. со стартового комплекса Государственного испытательного космодрома РФ (г. Плесецк) и предназначен для

одновременных высокоточных измерений гравитационного и магнитного поля Земли, а также параметров ее атмосферы.

Спутник имеет круговую орбиту с углом наклона 87.3° и начальной высотой полета около 460 км (Reigber et al., 2002). Благодаря околополярной орбите, спутник равномерно покрывает высокоточными измерениями магнитного поля практически всю поверхность Земного шара. Данные имеют секундное разрешение по времени, в пространстве это составляет около 7 км. За сутки спутник совершает порядка 14 витков, равномерно охватывая весь интервал локального времени. За пять первых лет работы высота полета спутника снизилась до 360 км, однако в результате двукратных дополнительных маневров высота орбиты была восстановлена, и его миссия успешно продолжается до сих пор.

Для магнитной съемки на спутнике установлены два стандартных феррозондовых магнитометра FGM (Fluxgate magnetometer), изготовленных в Датском техническом университете Люнгбю (DTU). Они измеряют три ортогональные векторные компоненты (X, Y, Z) магнитного поля в пределах ± 65000 нТ при чувствительности 0.1–0.2 нТ и частоте опроса 50, 10 или 1 Гц. Магнитометры вынесены на штангу, чтобы уменьшить помехи от систем спутника, причем при одновременной работе двух FGM, разнесенных на 60 см, можно вычислить величину этих помех. Скалярный магнитометр Оверхаузера (OVM (Overhauser magnetometer), изготовленный в Лаборатории электроники, технологии и приборостроения LETI (Гренобль, Франция), определяет абсолютную величину напряженности магнитного поля (T) в диапазоне 18000–65000 нТ с разрешением 0.1 нТ при абсолютной погрешности 0.5 нТ, что позволяет проверить данные FGM. Поставленный DTU немагнитный звездный датчик ASC, оси головок которого расположены под углом 102° , используется для определения текущей ориентации магнитометров FGM с погрешностью 0.003° , а GPS-приемник — для нахождения текущих координат спутника.

С помощью специально разработанной программы выделения геомагнитных полей из общего объема записей, поставляемых спутником CHAMP для любого региона земного шара и для любого индекса геомагнитной активности, создана база экспериментальных данных. Геомагнитные данные отобраны для витков, совершаемых спутником только в ночное время (LT от 22.00 ч до 6.00 ч) и только в спокойные в магнитном отношении ($k_p \leq 2$ и $Dst \leq 20$) дни.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измеренное на спутниковых высотах поле является сложной функцией пространства и времени и представляет собой сумму вкладов нескольких источников – внешних и внутренних – по отношению к поверхности Земли. Основная проблема при анализе состоит в корректном разделении суммарного магнитного поля на составляющие, связанные с различными физическими источниками.

Первичное спутниковое геомагнитное поле является суперпозицией следующих составляющих:

- главного геомагнитного поля, генерируемого источниками магнитогидродинамической природы, расположенными в жидкой части земного ядра;
- аномального поля, связанного с намагниченностью горных пород, слагающих земную литосферу;
- внешних полей, произведенных магнитосферно-ионосферными токовыми системами;
- индукционных полей, обусловленных токами в проводящих слоях земной коры и верхней мантии Земли.

Литосферное аномальное магнитное поле остается после последовательного исключения из измеренных значений всех остальных составляющих, что, таким образом, ставит надежность его выделения в зависимость от методик, выбранных для описания удаляемых частей. Этот, так называемый, физический подход к выделению “литосферных” данных стал практически классическим. В ходе настоящих исследований он был существенно усовершенствован авторами при удалении из измеренных на спутнике CHAMP значений геомагнитного поля той части, которая представляет главное магнитное поле Земли, обычно аппроксимируемое международной аналитической моделью (IGRF). В основе IGRF лежит сферический гармонический анализ средне-годовых значений геомагнитного поля, базирующийся на данных мировой сети магнитных обсерваторий.

Однако в нашем случае параметры орбиты спутника CHAMP дают возможность ежедневно получать измерения геомагнитного поля в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли (Головков, Зверева, Чернова, 2007). Это позволяет с помощью разложения по сферическим гармоникам экспериментальных значений компонент поля, полученных в течение суток с секундным разрешением по времени, построить среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ или DIGRF) главного магнитного поля для каждого отдельного дня, коэффициенты которой и будут использованы для

решения задачи удаления главного поля из измеренных значений

$$U(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times \\ \times (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta), \\ X = -\frac{1}{r} \frac{dU}{d\theta}; \quad Y = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{dU}{d\lambda}; \quad Z = -\frac{dU}{dr},$$

где U – геомагнитный потенциал в точке с географическими координатами (r, θ, λ) ; X, Y, Z – северная, восточная и вертикальная компоненты измеренного поля; a – средний радиус Земли; $P_n^m(\cos \theta)$ – присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m ; g_n^m и h_n^m – коэффициенты модели поля.

В настоящей работе при вычислении разностных полей из измеренных значений на каждом витке исключались значения главного магнитного поля, рассчитанные по моделям для каждого конкретного дня до степени и порядка 14, а не усредненные за длительный (годовой) интервал времени, как это делается обычно.

Магнитосферные токовые системы аппроксимировались первой зональной гармоникой в сферическом гармоническом разложении, а ионосферные – линейными или параболическими трендами.

Таким образом, в пределах рассматриваемой территории были выделены и обработаны спутниковые витки, равномерно покрывающие сектор от 25° до 130° в.д. и $20-60^\circ$ с.ш. Количество использованных измерений при построении карт отдельных регионов составляет, как правило, от 5 до 6 тыс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием описанной выше методики по данным спутника CHAMP были построены карты пространственного распределения модуля (T_a) и вертикальной компоненты (Z_a) аномального магнитного поля на высоте полета спутника для территории Восточной Европы, Западно-Сибирской платформы и Юго-Восточной Азии. Чтобы повысить надежность построений и исследовать воспроизводимость полученных результатов, аномальное поле было рассчитано по нескольким независимым наборам спутниковых данных. Сравнение построенных вариантов показало, что пространственная структура поля воспроизводится достаточно надежно.

Примеры пространственного распределения вертикальной компоненты аномального магнитного поля Z_a для рассматриваемых территорий на

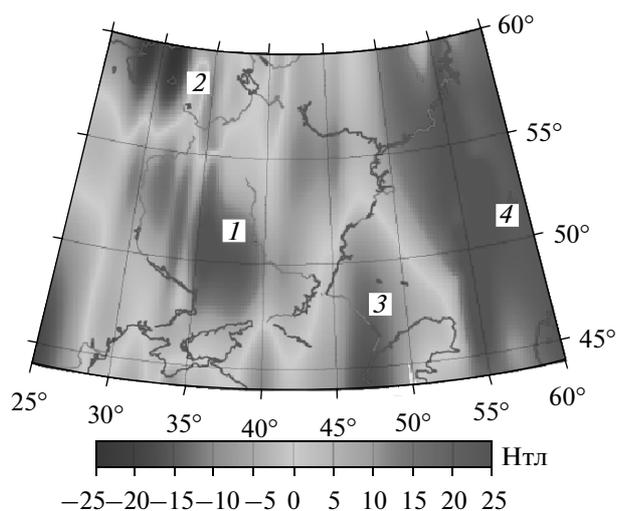


Рис. 1. Магнитные аномалии вертикальной составляющей аномального магнитного поля Z_a по данным спутника CHAMP. Цифрами обозначены аномалии, соответствующие отдельным тектоническим зонам: (1) – Воронежская антеклиза; (2) – Московская синеклиза и Балтийская моноклираль; (3) – Прикаспийская впадина; (4) – Уральская зона.

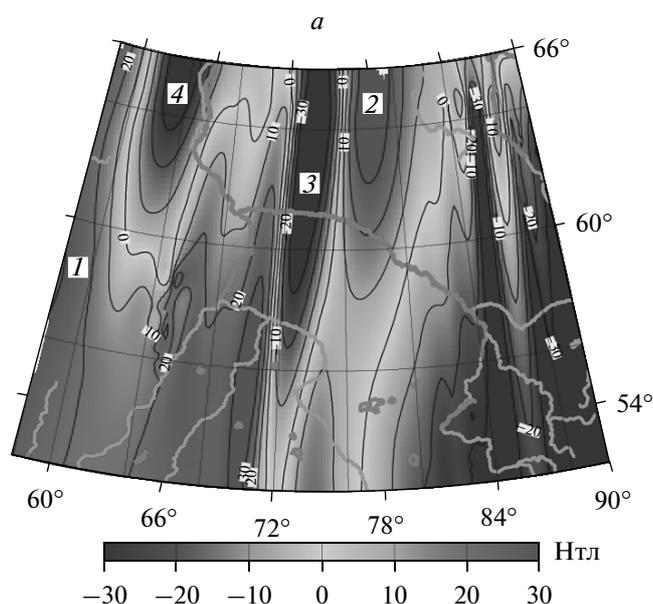


Рис. 2. а – Распределение вертикальной компоненты литосферного аномального магнитного поля Z_a на высоте спутника CHAMP для региона Западно-Сибирской плиты (цифрами обозначены аномалии, соответствующие отдельным тектоническим зонам: (1) – Уральская складчатая зона; (2) – Колпашевский мегаблок; (3) – Обь-Тазовская мегазона; (4) – Салымовская мегазона и Надымский мегаблок); б – схема тектонического районирования земной коры Западно-Сибирской плиты по глубинным критериям.

высоте спутника (порядка 400 км) представлены на рис. 1–3.

Природа литосферных аномалий

Источники аномального магнитного поля континентальной литосферы сконцентрированы в некотором ее объеме, называемом магнитоактивным слоем. Верхняя граница этого слоя может как совпадать с земной поверхностью, так и находиться на глубинах более 10 км в закрытых и складчатых районах. Нижним ограничением магнитоактивного слоя, вероятно, является либо глубина до изотермической поверхности Кюри магнетита, либо раздел Мохоровичича (Arkani-Hamed, Strangway, 1986; Пашкевич и др., 1990; Tanaka et al., 1999). Вопрос о том, находится ли он полностью в земной коре или проникает и в верхнюю мантию, до сих пор остается открытым.

Попытки физико-геологической интерпретации спутниковых данных об аномалиях постоянного магнитного поля (АМП) приводят к выводу об их связи с несколькими равновероятными источниками. По мнению большинства интерпретаторов (Arkani-Hamed, Strangway, 1986; Пашкевич и др., 1994), они могут быть вызваны как изменением средней эффективной намагниченности крупных участков литосферы, так и изменением мощности ее магнитоактивного слоя. Причинами образования магнитных аномалий также могут быть латеральные изменения температуры однородного слоя литосферы и соответственно изменение глубины до изотермической поверхности Кюри магнетита. Другим, не менее важным источником спутниковых магнитных аномалий, являются латеральные вариации состава магнитных минералов.

По всей видимости, в реальности большинство выявленных аномалий является результатом наложения друг на друга влияния обоих названных выше факторов, однозначно разделить которые пока не представляется возможным.

Однако наблюдаются и некоторые общие закономерности. В пределах древних платформ отмечается низкий средний фон теплового потока. Последнее в сочетании с большой мощностью коры и глубоким положением изотермической поверхности Кюри магнетита приводит к тому, что мощность магнитоактивного слоя в них значительно больше, чем в молодых регионах. В молодых тектонических провинциях, даже при благоприятном температурном режиме, земная кора в целом обладает слабой намагниченностью, что принято связывать с ее более кислым составом.

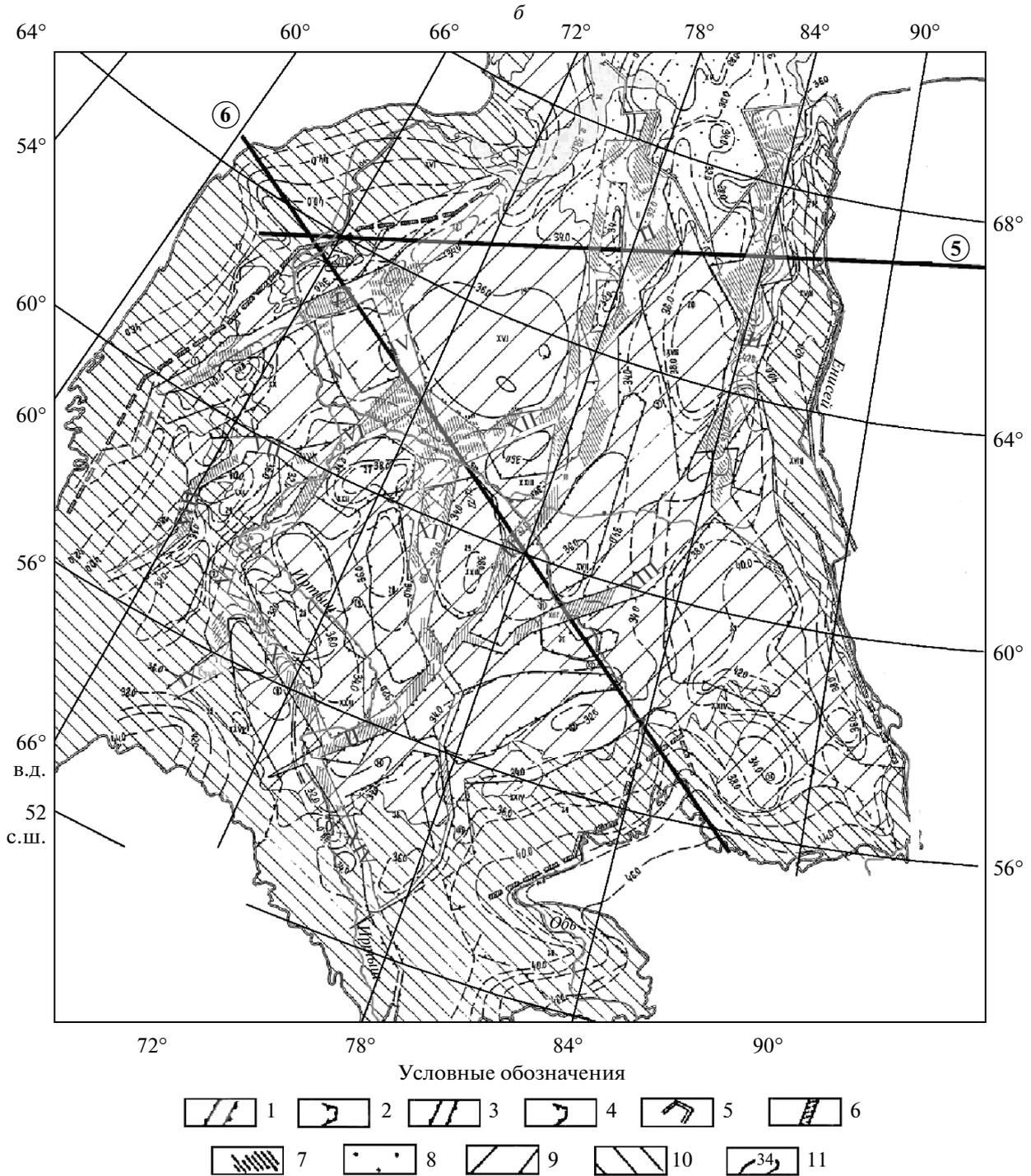


Рис. 2. Окончание.

Источники литосферного аномального магнитного поля в свете геолого-тектонических представлений

Хорошо известно, что имеются существенные различия между дорифейскими образованиями, которые являются главным источником магнит-

ных аномалий, и более молодыми, как правило, менее магнитными, такими, как фанерозойская кора. Дорифейские платформы включают в себя как поверхностные щиты (кратоны), так и захороненные под более поздними отложениями области, называемые дорифейскими основаниями.

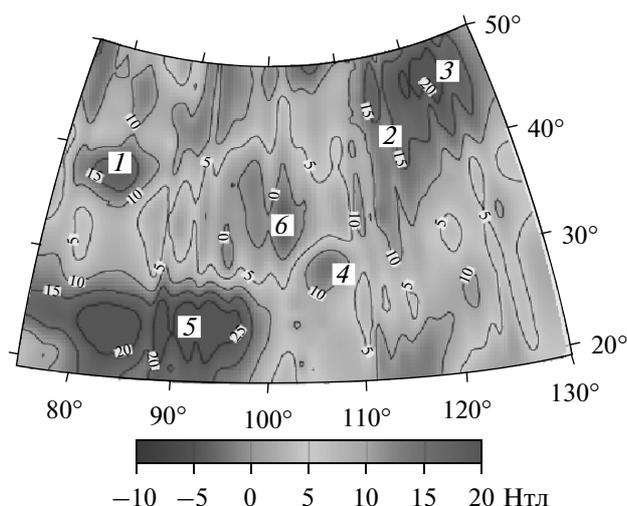


Рис. 3. Распределение вертикальной компоненты литосферного аномального магнитного поля Z_a на высоте спутника СНАМР для региона Юго-Восточной Азии. Цифрами обозначены аномалии, соответствующие тектоническим зонам: (1) – Таримский бассейн; (2) – Северо-Китайский кратон; (3) – впадина Сунляо; (4) – Сычуань–Юннаньский массив; (5) – Индостанский кратон; (6) – Тибетское плато.

Разным платформам отвечает разная природа аномальных магнитных полей. Часто архейский фундамент полностью перекрывается малыми и большими фанерозойскими структурами с разделяющими их кайнозойскими, мезозойскими и палеозойскими складчатыми поясами (Goodwin, 1991, 1996).

Как предыдущие исследования (Nemant, Maus, 2005), так и полученные нами по геомагнитным спутниковым данным карты аномального поля, в общем согласующиеся с картами геологических провинций, свидетельствуют о том, что источники магнитных аномалий действительно являются по происхождению геологическими и лежат в коре Земли. Однако несоответствие между предсказанными и наблюдаемыми аномалиями в некоторых регионах земного шара вызывает вопросы, для решения которых необходимы дальнейшие исследования, особенно в контексте изучения подповерхностных дорифейских областей, состава более глубоких частей коры и мощности коры в регионах.

Считается, что дорифейские породы, представленные на поверхности Земли, составляют только 29% от всей дорифейской коры (Goodwin, 1991). Таким образом, существенная часть дорифейской коры на континентах лежит под более молодым фанерозойским покровом. Аномальное магнитное поле, полученное по спутниковым данным, можно рассматривать лишь как некото-

рую региональную характеристику крупных тектонических единиц. Магнитные сегменты указывают на закономерности распределения различных типов магнитных неоднородностей в структуре земной коры, зачастую они свидетельствуют о “просвечивании” древних структур. Зоны сочленения разных магнитных сегментов, по видимому, являются глубинными и долгоживущими разломами, на которых развивались авлакогены и депрессии.

МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ, ВЫДЕЛЯЕМЫЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА СНАМР

Европейская часть России

Магнитные аномалии, фиксируемые на территории Восточной Европы, подробно рассмотрены в работе (Абрамова и др., 2009) и использованы здесь в качестве иллюстрации. Вертикальная компонента Z_a литосферного магнитного поля на высоте спутника порядка 400 км показана на рис. 1.

Рассмотрим данный рисунок более подробно.

В центре представленного фрагмента карты АМП четко выделяется обширная положительная аномалия (1) с максимальной интенсивностью более 25 нТл. Сопоставление этой аномалии с геолого-тектоническими схемами региона показывает, что однозначная связь спутниковой аномалии с основными морфоструктурами земной коры разного возраста консолидации практически отсутствует. Однако в контексте сказанного выше мы с уверенностью можем связать эту положительную аномалию с суммарным эффектом от блоков земной коры, слагающих Украинский щит, Мазурско-Белорусскую и Воронежскую антеклизы, т.е. с “просвечиванием” архейского Сарматского щита.

К востоку от этой зоны на карте вертикальной компоненты АМП наблюдается высокомагнитный сегмент (4), который охватывает Волго-Уральскую антеклизу, восточную часть Прикаспия, юг Предуральяского краевого прогиба, собственно Урал и часть Зауральской зоны. Присутствие протерозойских областей на территории Уральской зоны незначительно, однако положительные спутниковые магнитные аномалии занимают достаточно большую площадь, что, по видимому, является указанием на существование обширных намагниченных слоев глубоких частей коры. Подробный анализ возможных причин этого факта также ранее рассмотрен в работе (Абрамова и др., 2009).

На севере региона наблюдается отрицательная аномалия (2), охватывающая местоположение Балтийской моноклинали и Московской синеклизы. Мощность магнитоактивного слоя в сегменте снизу сокращена в связи с наличием в его центральной части интенсивной положительной

аномалии теплового потока, что дает основание сделать предположение о пониженном значении средней намагниченности магнитоактивной части коры.

В центральной части Прикаспийской впадины, по данным спутника СНАМР, наблюдается отрицательная аномалия магнитного поля (3). Здесь, судя по сейсмическим данным, осадки лежат прямо на “базальтовом” слое, который имеет мощность 6–9 км, и раздел Мохо находится на глубине 26–30 км, тогда как на окраинах Прикаспийской впадины, где есть “гранитный” слой и мощность “базальтового” достигает 15 км, толщина коры увеличивается до 40 км.

Построенная карта была сопоставлена с результатами других авторов (Пашкевич и др., 1990; Taylor, Ravat, 1995). Сравнение показало, что основные особенности аномального поля выделяются достаточно надежно, имеющиеся отличия приурочены к областям, где значения выделяемого аномального поля близки к уровню шума.

Западная Сибирь

В качестве источников геолого-тектонической и геофизической информации при анализе спутникового литосферного магнитного поля Западной Сибири нами были использованы результаты исследований глубинной структуры земной коры Западно-Сибирской платформы (Костюченко, 1992) и построенные по комплексу геолого-геофизических методов опорные разрезы литосферы вдоль двух профилей: “Мурманск–Кызыл” и “Березово–Усть-Мая” (Егоров, Чистяков, 2003). Рис. 2б иллюстрирует современные представления о геолого-тектоническом строении Западно-Сибирской плиты.

Основные структурно-тектонические элементы коры: (1) – зоны утонения консолидированной части коры Западно-Сибирской рифтовой системы; (2) – межрифтовые блоки и мегаблоки утолщенной коры; (3) – зоны утонения кристаллической части коры; (4) – блоки утолщенной кристаллической части коры; (5) – Няояхский кристаллический блок; (6) – краевые глубинные разломы; (7) – грабены Западно-Сибирской рифтовой системы; (8) – Пур-Гыданский сверхглубокий прогиб; (9) – Центрально-Западно-Сибирская мегаобласть; (10) – внешний бортовой пояс плиты; (11) – изопакеты консолидированной части земной коры).

Рифтовые зоны: (I) – Приуральская; (II) – Колтогорско-Уренгойская; (III) – Худосейская; (IV) – Верхне-Ляминская; (V) – Надымская; (VI) – Тобольско-Нижнеиртышская; (VII) – Яхтурайская; (VIII) – Нижне-Тавдинская; (IX) – Ишимская; (X) – Тюкалинская; (XI) – Сургутская; (XII) –

Аганская; (XIII) – Усть-Тымская; (XIV) – Прииртышская.

Межрифтовые блоки: (XV) – Няояхский; (XVI) – Приуральско-Надымский; (XVII) – Среднеобско-Часельский; (XVIII) – Приенисейский; (XIX) – Верхнеляминский; (XX) – Ханты-Мансийский; (XXI) – Усть-Тавдинский; (XXII) – Иртышский; (XXIII) – Вартовский; (XXIV) – Чулымо-Кетский; (XXV) – Тара-Чанский; (XXVI) – Приказахстанский.

Глубинные сейсмические исследования показывают, что литосфера Западно-Сибирской платформы имеет сложное слоисто-блоковое строение. Изометричные блоки земной коры, достигающие в диаметре 500–700 км, разделены глубинными разломами и линейными зонами утоненной коры, являющимися, видимо, зонами нарушений сплошности среды.

Расчетное температурное поле Западно-Сибирской платформы по поверхности Мохо также неоднородно, его значения меняются в широком диапазоне: от 400° до 900°С. В пределах докембрийских массивов преобладают значения 550°–650°С, а рифтовые зоны характеризуются аномально высокими значениями температур, присутствующими областям, характеризующимися современной высокой тектонической активностью. В таких зонах следует ожидать пониженных значений аномального магнитного поля литосферы.

Высокие значения геотермических параметров, свойственные части территории центральной области, могут быть, по-видимому, объяснены присутствием в разрезе подкоревой литосферы Западно-Сибирской платформы мощной зоны разуплотнения среды, кровля которой располагается на уровне раздела Мохо. Эта зона проявляется в глубинных разрезах глубинно-сейсмического зондирования (ГСЗ–МОВЗ) как зона пониженных пластовых скоростей продольных сейсмических волн и пониженных значений плотности среды.

При рассмотрении карты Z_a литосферного магнитного поля Западно-Сибирской платформы (рис. 2а) также видны сегменты положительных и отрицательных аномалий, ассоциирующиеся с блоковым строением региона. Аномалии имеют преимущественно субмеридиональное простирание, согласующееся с простиранием складчатых областей и разрывных нарушений.

Комплексными геолого-геофизическими исследованиями вдоль разветвленной сети профилей ГСЗ установлено наличие преимущественно жесткого консолидированного фундамента Западно-Сибирской платформы. Этому утверждению вполне соответствует огромная область положительных значений аномального литосферного поля почти на всей территории Западно-Сибир-

ской платформы. Аномальный тип коры проявляется лишь в отдельных структурах – рифейских и палеозойских бассейнах.

Рассмотрим последовательно каждый из сегментов аномального поля, проявляющихся на картах вертикальной компоненты поля Z_a .

Положительные спутниковые магнитные аномалии занимают на карте Западно-Сибирской платформы достаточно большую площадь, что, по-видимому, является указанием на существование обширных намагниченных слоев глубоких частей коры.

Если на схеме тектонического районирования (рис. 2б) блоки – палеоплатформы и микроплатформы – с древней раннедокембрийской корой (Ханты-Мансийский, Зауральский, Кокчетавский, Иртышский и др.) представляются обособленными структурами, то на карте распределения спутникового аномального магнитного поля им соответствует единая область положительных значений, т.е. можно предположить, что разделяющие их разломы имеют неглубокое заложение. Тем не менее некоторые рифтовые зоны, такие как Тобольско-Нижнеиртышская (VI), Нижне-Тавдинская (VIII) и Ишимская (IX), все-таки проявляются отдельными особенностями на фоне однородного положительного аномального поля.

Обширная зона положительных значений аномального магнитного поля (2) на карте, построенной по данным СНАМР, в плане соответствует Колпашевскому мегаблоку, входящему в состав каледонского складчатого обрамления Сибирской платформы (Егоров, Чистяков, 2003). Для него характерна аномально высокая, до 20 км, мощность гранитно-метаморфического мегаслоя. Это обуславливает значительную мощность магнитоактивного слоя и, как следствие, высокие значения АМП.

В аномальных полях, полученных по данным спутника СНАМР, сегмент, приуроченный к Обь-Тазовской мегазоне (обозначен (3) на рис. 2а), характеризуется протяженной отрицательной аномалией, что полностью согласуется с современными представлениями о строении региона. По данным авторов (Егоров, Чистяков, 2003), Обь-Тазовская мегазона является характерным примером реликтовых бассейнов, ее характеристики хорошо изучены в сечениях профилей ГСЗ. Мощность магнитоактивного слоя в сегменте сокращена снизу в связи с наличием в его центральной части интенсивной положительной аномалии теплового потока, а в разрезе подкоровой литосферы как раз под областью Обь-Тазовской мегазоны присутствует мощный выступ низкоскоростной и низкоплотностной мантии. Этот слой занимает интервал глубин 85–120 км. В Обь-Тазовском районе он резко увеличивается в мощно-

сти и достигает подошвы земной коры. Образование слоя связывается с частичным плавлением и разуплотнением мантийных пород. Этому слою пониженных скоростей и высоких температур четко соответствует область отрицательных значений спутникового аномального магнитного поля, занимающая площадь вплоть до 56° с.ш. В плане ее границе соответствует Колтогорско-Уренгойская (III) рифтовая зона.

То же самое можно сказать об отрицательной аномалии под Салымовской мегазоной и Надымским мегаблоком (4). Здесь также наблюдается резкий подъем геотермы 1200°C, что приводит к изменению глубины до изотермической поверхности Кюри магнетита, уменьшению размеров магнитоактивного слоя и, как следствие, низким значениям аномального магнитного поля, полученным в настоящей работе.

Вдоль западной границы Западно-Сибирской платформы прослеживается положительный сегмент магнитного поля (1), отражающий сложное распределение магнитных масс в Уральской складчатой зоне, рассмотренный выше.

На северо-восточном фланге Западно-Сибирской платформы происходит резкое изменение АМП от положительных значений к отрицательным. В тектоническом отношении такое поведение АМП характерно для краевых частей крупных тектонических образований. Это отвечает результатам геолого-геофизических исследований по профилю “Березово–Усть-Мая” (Егоров, Чистяков, 2003). Западная граница Сибирского кратона имеет наиболее контрастное геофизическое выражение – она представляется в форме узкого шва, наклонно погружающегося в восточном направлении, и маркируется такими геофизическими параметрами, как изменение структуры сейсмической расчлененности и скорости продольных волн разреза ГСЗ, градиентными зонами гравиметрического поля. Граница сочленения Западно-Сибирской и Сибирской платформ также отчетливо выражена пониженными значениями АМП и соответствует Худосейской рифтовой зоне (III), а южнее – Усть-Тымской (XIII) зоне утонения коры.

Юго-Западная Азия

Карта вертикальной компоненты Z_a аномального литосферного магнитного поля на территории Юго-Западной Азии приведена на рис. 3. Наиболее яркие аномальные зоны помечены цифрами.

Здесь четко видны аномалии, отвечающие тектоническому строению этого региона: Таримский бассейн (1), Северо-Китайская платформа (2) и впадина Суньяля (3), Сычуань-Юннаньский мас-

сив (4), Индостанский кратон (5), Тибетское плато (6).

Местоположению Таримского бассейна на карте АМП соответствует изометрическая положительная аномалия. Значение аномального поля в ее центре достигает 20 нТл.

По мнению геологов (Wang, Qiao, 1984), Таримский бассейн – это молодая платформа, образовавшаяся в среднем и позднем протерозое. Кора под ней утолщена и составляет 50–56 км.

На территории Северо-Китайской платформы и впадины Суньяо аномальное поле положительное и достаточно однородное. Это древняя платформа, становление которой закончилось в архее – нижнем протерозое (Huang, 1978; Ma, 1987). Верхний ярус платформы, сложенный осадочными метаморфическими и интрузивными породами, и даже ее фундамент неоднократно испытывали тектоническую активизацию, когда на стабильных блоках появились активные разломы, образовались наложенные впадины и рифтовые зоны, заполненные терригенными осадками.

Измеренное спутником CHAMP аномальное литосферное поле в общем адекватно согласуется с представлением о поле древних платформ, оно имеет положительные значения и достаточно однородно на территории платформы. В пределах древней платформы средний фон теплового потока низкий. Это в сочетании с большой мощностью коры и глубоким положением изотермической поверхности Кюри магнетита обуславливает значительно большую мощность магнитоактивного слоя, чем в более молодых регионах.

Что касается впадины Суньяо (3), то в ее пределах фиксируется положительная магнитная аномалия, происхождение которой неясно. Дело в том, что по данным измерений теплового потока, здесь наблюдаются высокие его значения: $62 \pm \pm 15$ мВт/м² (Лысак, 2009), – что свидетельствует о значительном разогреве земной коры в этом регионе. Однако большая положительная аномалия, отвечающая за состояние нижней части коры, этому противоречит.

На территории Сычуань-Юннаньского массива (4), так же как в Таримской зоне, наблюдается изометрическая положительная аномалия, правда, меньшей интенсивности. Зона входит в состав молодой Южно-Китайской платформы. Толщина земной коры здесь порядка 36 км. Глубина залегания астеносферы 77–146 км. Средний по площади тепловой поток равен 54 мВт/м². Аномалия магнитного поля хорошо согласуется с геолого-тектоническими предпосылками и тепловым состоянием земной коры.

Повышенные положительные значения аномального астеносферного поля наблюдаются в широкой полосе, ограниченной 20° и 30° с.ш. и

60° и 100° в.д., соответствующей Индостанскому кратону (5). Область аномального поля адекватно отвечает геолого-тектоническим представлениями о платформенном строении этой территории.

На Тибетском плато (6), по данным спутниковых наблюдений, фиксируется низкий уровень аномального поля, что также не противоречит геологическим и термическим условиям. Для формирующих эту область зон сжатия (Тибетской, Гималайской) характерен аномально повышенный тепловой поток, величины которого превышают 83–160 мВт/м². Это обусловлено более горячим режимом литосферы, что приводит к сокращению ее мощности, уменьшению размеров магнитоактивного слоя и, как следствие, низким значениям аномального магнитного поля.

Таким образом, полученное по данным спутника CHAMP пространственное распределение регионального аномального магнитного поля за редким исключением хорошо отвечает геологическим и тектоническим представлениям о зонно-блоковой структуре строения земной коры в этом регионе.

ВЫВОДЫ

Изучение постоянного аномального магнитного поля Земли на сегодняшний день является одним из информативных геофизических подходов в исследовании внутреннего строения и процессов, происходящих в нижних частях земной коры.

Для выделения из полного геомагнитного поля, измеренного на спутнике, аномальной части, связанной с намагниченностью земной коры, применена оригинальная методика, использующая среднесуточную сферическую гармоническую модель главного поля DIGRF вместо классической модели IGRF. По данным измерений, выполненных спутником CHAMP, построены карты и проведен анализ распределения регионального аномального магнитного поля литосферы различных регионов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что источники магнитных аномалий действительно имеют реальное геологическое происхождение и лежат в земной коре. Кроме того, их локализация зачастую хорошо согласуется с данными сейсмологии и теплового поля.

Размеры магнитных областей близки к размерам тектонических сегментов, однако не всегда они совпадают пространственно. Выявленные магнитные сегменты соответствуют общим закономерностям распределения различных типов магнитных неоднородностей в структуре земной коры, свидетельствуют о возможном “просвечивании” погребенных древних структур. Зоны сочленения магнитных сегментов, по-видимому, являются глубинными и долгоживущими структурами.

Однако существуют и расхождения между предсказываемыми и наблюдаемыми региональными аномалиями магнитного поля в некоторых частях рассматриваемой области, что, безусловно, требует дальнейших исследований. Несогласие указывает на ограниченность современных знаний о подповерхностной геологии и строении земной коры, а именно:

– гипотетичность данных о положении изотермы Кюри;

– предположительное наличие дорифейских областей под фанерозойским покровом и др.

Настоящая работа показывает перспективность использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля для изучения региональной тектоники, в том числе исследований подповерхностных дорифейских областей, состава и мощности глубинных частей коры. Одной из целей использования спутниковых данных могут стать поиск возможного распространения дорифейских областей под фанерозойским покровом и просмотр их скрытых границ.

Авторы выражают благодарность сотруднице лаборатории Волковой Н.И за помощь в обработке экспериментального материала и в создании базы данных АМП спутника CHAMP.

Карты магнитного аномального поля построены с использованием программ GMT (Wessel, Smith, 1991).

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.
- 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.
- Егоров А.С., Чистяков Д.Н. Структура консолидированного фундамента Западно-Сибирской платформы и прилегающих складчатых областей // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 1–2. С. 101–119.
- Костюченко С.Л. Глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты по результатам комплексного геолого-геофизического изучения: Дис. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1992. 247 с.
- Лысак С.В. Термальная эволюция, геодинамика и современная геотермальная активность литосферы Китая // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 9. С. 1058–1071.
- Пашкевич И.К., Марковский В.С., Орлюк М.И. и др. Магнитная модель литосферы Европы. Киев: Наукова думка, 1990. 168 с.
- Пашкевич И.К., Печерский Д.М. и др. Петромагнитная модель литосферы. Киев: Наукова думка, 1994.
- Шукин Ю.К. Проблемы глубинной геологии в региональных геофизических исследованиях // Вторая Всерос. школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли. М.: МАКС ПРЕСС, 2005. С. 21–30.
- Arkani-Hamed J., Langel R.A., Purucker M.E. Magnetic anomaly maps of Earth derived from POGO and Magsat data // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 24075–24090.
- Arkani-Hamed J., Strangway D.W. Effective magnetic susceptibility anomalies of the oceanic upper mantle derived from Magsat data // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. P. 999–1002.
- Cain J.C., Wang Z., Kluth C., Schmitz D.R. Derivation of a geomagnetic model to $n = 63$ // Geophys. J. 1989. V. 97. P. 431–441.
- Goodwin A.M. Precambrian Geology. N.-Y.: Elsevier, 1991.
- Goodwin A.M. Principles of Precambrian Geology. N.-Y.: Elsevier, 1996.
- 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.
- 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.
- Huang Chi-cheng. An outline of the tectonic characteristics of China and its explanation // Ecological Geol. 1978. V. 71. № 3. P. 611–635.
- Langel R.A., Ousley G., Berbert J. The Magsat Mission // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. P. 243–245.
- Ma X. Lithosphere dynamic map of China and adjacent seas (in scale 1 : 4000000) and explanatory notes. Beijing: Publishing House of Geology, 1987. 53 p.
- Olsen N. et al. Orsted initial field model // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. P. 3607–3610.
- Ravat D., Langel R.A., Purucker M., Arkani-Hamed J., Alsdorf D.E. Global vector and scalar Magsat magnetic anomaly maps // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 20111–20136.
- Regan R.D., Cain J.C., Davis W.M. A global magnetic anomaly map // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 794–802.
- Reigber C., Luhr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // Adv. Space Res. 2002. V. 30. P. 129–134.
- Sabaka T.J., Olsen N., Langel R.A. A comprehensive model of the near-Earth magnetic field: Phase 3 // NASA Tech. Memo. 2000. TM-2000-20. 9894.
- 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.
- Taylor P.T., Ravat D.N. An interpretation of the Magsat anomalies of central Europe // J. Appl. Geophys. 1995. V. 34. P. 83–91.
- Wang H., Qiao X. Proterozoic stratigraphy and tectonic framework of China // Geol. Magazine. 1984. V. 121. № 6. P. 559–614.
- Wessel P., Smith, W.H.F. Free software helps map and display data, EOS, Trans. Am. Geophys. Union. 1991. V. 72. 441 p.

Prospects of Satellite Measurements for the Regional Magnetic Anomalies Analysis

D. Yu. Abramova¹, L. M. Abramova², S. V. Philippov¹, A. Kh. Frunze¹

¹ *Pushkov Institute of the Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow District*

² *Geoelectromagnetic Research Centre of Shmidt Institute of Physics of the Earth,
Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow District*

A new opportunity to research the lateral changes of the lithosphere magnetic properties and of the magnetized layer capacity in the Earth interior had appeared when the first maps of the regional magnetic field anomalies had been received from the satellites. The features of the satellite CHAMP orbit allow obtaining the means of geomagnetic field on the practically uniform grid above the whole of the Earth surface. This gives a unique chance for the lithosphere constant anomaly magnetic field contribution to the measured geomagnetic field values will be successfully marked out and will be analyzed in the connection with a view of the magnetic mass distribution in the crust. The data of magnetic field component measurements at satellite CHAMP were processed. The analysis of the magnetic field vertical component Z_a distribution revealed by the results of satellite measurements was made for several Europe and Asia regions. Its concordance with geological conception about an Earth crust tectonic structure was shown.

Keywords: satellite geomagnetic observation, lithosphere magnetic field, regional magnetic anomalies, crust magnetization