

Об исследовании тектоносферы с использованием спутниковых данных

Д.Ю. Абрамова¹, Л.М. Абрамова², С.В. Филиппов¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН
142190, г. Троицк Московской обл.

E-mails: abramova@izmiran.ru, sfilip@izmiran.ru

² Центр геоэлектромагнитных исследований

Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

142190, г. Троицк Московской обл.

E-mail: labramova@igemi.troitsk.ru

Результаты спутниковой магнитной съемки могут внести существенный вклад при геолого-тектоническом картировании и изучении глубинного строения территорий. С появлением первых магнитных карт, полученных со спутников, возникли новые взгляды на возможность интерпретации длинноволновых магнитных аномалий. Анализируется морфология региональных литосферных магнитных аномалий, выявленных над Восточной Европой и Сибирью по результатам съемки на германском спутнике CHAMP. Обсуждается их возможная природа и приуроченность к геологическим структурам, расположенным на этих территориях. Построены и рассмотрены фрагменты спутниковых магнитных карт разных масштабов. Интерпретация этих карт показывает, что магнитные аномалии связаны с современными крупномасштабными геологическими элементами фундамента, в то же время их существенная корреляция с поверхностными геологическими структурами выявляется не всегда.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения магнитного поля, литосферные магнитные аномалии, Восточно-Европейская платформа, Сибирская платформа, кратоны.

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). Неоднородности литосферы на различных ее глубинных уровнях проявляются гравитационными и магнитными аномалиями различного порядка, поэтому выявление и типизация их природы являются актуальной задачей в изучении тектоносферы Земли.

В связи с этим возрос интерес к изучению крупномасштабных аномалий протяженностью в сотни километров, пространственные изменения параметров которых отражают характеристики магнитных свойств и мощности намагниченных слоев на больших глубинах. Такие аномалии проявляются при региональных обобщениях данных аэромагнитных и морских съемок.

Получить карту, отображающую аномальное магнитное поле (МП) глубинных источников на огромных территориях, используя экспериментальный материал только

наземных и аэромагнитных съемок, практически невозможно. Кроме того, существуют проблемы увязывания данных магнитных съемок, проводимых в разное время на ограниченных площадях.

Возможность по-новому взглянуть на крупномасштабные магнитные аномалии возникла благодаря запуску спутников, оснащенных магнитометрической аппаратурой: *Pogo* (Regan et al., 1975), *Magsat* (Langel et al., 1982; Пашкевич и др., 1990; Arkani-Hamed et al., 1994; Ravat et al., 1995; Sabaka et al., 2000) и *Orsted* (Olsen, 2000).

Анализ пространственного распределения МП показывает (Hemant, Maus, 2005; Hemant et al., 2005), что на спутниковых высотах аномальная часть поля существенно изменяется: 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 полям геологических структур небольших размеров, что позволяет выделять по ним региональные литосферные аномалии, не осложненные локальной компонентой.

Исследования, проведенные на базе спутниковых данных об аномальном литосферном МП, показали, что крупномасштабные тектонические единицы – щиты, кратоны и зоны субдукции характеризуются положительными аномалиями (вызванными повышенной намагниченностью), а бассейны и абиссальные равнины – отрицательными аномалиями, причины возникновения которых объяснялись утонением коры и поднятием изотермы Кюри (Hemant, Maus, 2005).

Начиная с 2000 г. возможность анализа параметров геомагнитного поля серьезно расширилась в связи с запуском германского искусственного мини-спутника *CHAMP*, признанного одним из самых успешных проектов для наблюдения Земли. Он имел круговую орбиту с углом наклона 87,3° и начальной высотой полета около 460 км. Благодаря околополярной орбите спутник равномерно покрывал поверхность всего земного шара высококачественными высокоточными измерениями. Данные имеют секундное разрешение по времени, в пространстве это составляет примерно 7 км. За одни сутки спутник совершал порядка 14 витков, равномерно охватывая весь интервал локального времени (Reigber et al., 2002). Миссия продолжалась около 10 лет (по сентябрь 2010 г.), обеспечивая измерения скалярных и векторных параметров МП. За годы работы высота полета спутника снижалась до 330 км, дважды проводились маневры по увеличению высоты орбиты до 450 км. На спутнике были установлены два магнитометра: скалярный магнитометр, регистрирующий амплитуды модуля полного вектора геомагнитного поля (T), и феррозондовый магнитометр, измеряющий три ортогональных векторных компоненты (X , Y , Z).

Авторы настоящей работы получили положительный опыт исследований литосферного МП с использованием спутниковых геомагнитных данных, измеренных *CHAMP* над различными территориями (Абрамова Д. и др., 2009, 2011; Абрамова Л. и др., 2010). Задача настоящей работы – проиллюстрировать возможности спутниковых наблюдений при исследованиях геологического устройства нижних слоев земной коры.

Методика обработки данных спутниковых измерений

Геомагнитное поле на спутниковых высотах 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.

Измеренное на спутнике магнитное поле является суперпозицией следующих составляющих:

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

В измеренных значениях имеется также вклад внешнего электромагнитного поля, обусловленный магнитосферно-ионосферными токовыми системами.

Литосферное магнитное поле остается после последовательного исключения из измеренных значений всех упомянутых выше составляющих, что, фактически, ставит надежность его выделения в зависимость от методик, выбранных для описания удалаемых частей.

На сегодняшний день разрабатываются различные подходы решения этой проблемы. Почти классическим стал так называемый «физический» подход обработки спутниковых данных: исключение вклада главного поля посредством модели сферического гармонического разложения до $n = m = 13$. Магнитосферные токовые системы аппроксимируются первой зональной гармоникой в сферическом гармоническом разложении, а ионосферные – линейными или параболическими трендами. Детальное описание такого подхода обработки спутниковых массивов можно найти в работах (Langel, 1993; Arkani-Hamed et al., 1994). В применении к данным **CHAMP** этот общепринятый подход был усовершенствован авторами в части удаления из суммарного измеренного поля составляющей, представляющей главное магнитное поле, обычно аппроксимируемое международной аналитической моделью (IGRF).

В основе IGRF лежит сферический гармонический анализ среднегодовых значений геомагнитного поля. Для построения точной пространственной модели поля методом СГА принципиальное значение имеет равномерное заполнение данными узлов расчетной сетки. Базовым массивом экспериментальных данных для построения моделей IGRF являются наблюдения мировой сети магнитных обсерваторий, которые расположены на поверхности Земли крайне неравномерно. В тех областях, где обсерватории отсутствуют, сетка СГА заполняется дополнительными данными (спутниками, аэромагнитными, морских съемок). Для получения более точной модели главного поля проводят тщательную селекцию таких исходных данных, чтобы избавиться от полей внешних источников.

При этом значительная часть данных теряется и преимущество, например, спутниковых данных – их однородность в пространстве и во времени – рукояточно нарушается. Проводимая селекция вызывает определенные проблемы, состоящие в том, что количество отброшенных данных разное для разных дней, и их положение в пространстве также оказывается весьма неравномерным.

Заданные специальным образом параметры орбиты спутника **CHAMP** дают возможность получать измерения геомагнитного поля ежесуточно в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли (Головков и др., 2007). Это позволяет с помощью разложения по сферическим гармоникам (вплоть до степени и порядка 14) компонент поля, полученных в течение суток с секундным разрешением, построить среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ) главного магнитного поля для каждого отдельного дня.

$$U(r, \theta, \lambda) = a \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \times P_n^m(\cos \theta);$$

$$X = -\frac{1}{r} \frac{dU}{d\theta}; Y = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{dU}{d\lambda}; Z = -\frac{dU}{dr},$$

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 нашем случае мы рассматриваем восстановленное по ССГМ коэффициентам главное поле как некую достаточно стабильную во времени составляющую, которую необходимо удалить из измеренных значений. При этом для построения ССГМ берутся все данные за сутки, включая высокие широты. При одинаковом порядке точности ССГМ и IGRF моделей (Головков и др., 2007) очевидным преимуществом является техническое упрощение расчетов и полное отсутствие субъективизма, неизбежного при селекции данных.

Итак, при вычислении значений литосферного поля из измеренных спутником данных на каждом витке исключались: главное магнитное поле, рассчитанное по моделям для каждого конкретного дня, и поля предполагаемых ионосферных и магнитосферных источников.

Геомагнитные данные спутника **CHAMP** отобраны и обработаны для спокойных в магнитном отношении ($k_p \leq 2$ и Dst -индекс – до 20 нТл) дней. Для уменьшения искажающего влияния на результаты анализа спокойной солнечно-сугубой вариации к рассмотрению принимались только витки, совершенные спутником в ночное время (LT от 22.00 ч до 6.00 ч) в осенне-зимний период. Для построения карт представленных регионов использованы данные:

Восточно-Европейская платформа – за 2000, 2001, 2003, 2005, 2008, 2010 гг.;

Волго-Уральский кратон – 2003, 2005, 2008 гг.;

Сибирская платформа – за 2001, 2003, 2005, 2008, 2010 гг.

За сутки в ночное время за счет постепенного смещения орбиты по долготе спутник попадает в рассматриваемый сектор, например Восточную Европу, максимум 2 раза, пролетает вторично вдоль той же самой орбиты ($+1^\circ$) примерно через 7 суток. Таким образом, количество витков спутника, которое возможно использовать для данного сектора, оказывается ограниченным, что иногда приводит к образованию на карте региона, особенно вытянутого в широтном направлении, небольших (порядка $3\text{--}5^\circ$) лишенных данных участков. Интервал между точками вдоль орбиты (смещение по широте) стабильный – около $0,3^\circ$. Вытянутость изолиний магнитного поля в направлении движения спутника в некоторых местах карты на *рис. 2a* иллюстрирует возникающие по этой причине ошибки интерполяции значений поля между орбитами. Сглаживание намеренно не производилось.

Решением этой проблемы может быть использование для анализа дополнительных рядов спутниковых измерений. Это иллюстрирует карта Восточно-Европейского региона (*рис. 1a*), для построения которой было использовано значительно большее количество экспериментальных данных и на которой такие искажения отсутствуют.

С использованием вышеописанной методики по данным спутника **CHAMP** были построены карты пространственного распределения модуля (Ta) и вертикальной компоненты (Za) литосферного магнитного поля на высоте полета.

Источники литосферного магнитного поля в свете геологических и физических представлений

Хорошо известно, что имеются существенные различия между дорифейскими (архейскими) образованиями, которые являются главным источником магнитных 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. Разным платформам отвечает разная природа аномальных МП. Часто дорифейский фундамент полностью перекрывается малыми и большими фанерозойскими структурами с разделяющими их складчатыми поясами. Считается, что дорифейские породы, представленные на поверхности Земли, составляют только 29%, от всей дорифейской коры (Goodwin, 1991, 1996). Это означает, что существенная часть дорифейской коры на континентах лежит под более молодым фанерозойским покровом и, следовательно, картирование горных пород кристаллического фундамента и изучение глубинного строения могут базироваться исключительно на геофизических данных.

Источники аномалий магнитного поля континентальной литосфера сконцентрированы в некотором ее объеме, называемом магнитоактивным слоем. Верхняя граница этого слоя может совпадать с земной поверхностью или находиться в закрытых и складчатых районах на глубинах более 10 км. Нижним ограничением магнитоактивного слоя, вероятно, является либо глубина до изотермической поверхности Кюри магнетита, либо раздел Мохо (Arkani-Hamed, Strangway, 1986; Tanaka et al., 1999). Вопрос о том, находится ли магнитоактивный слой полностью в коре или же проникает и в верхнююmantию, до сих пор остается открытым.

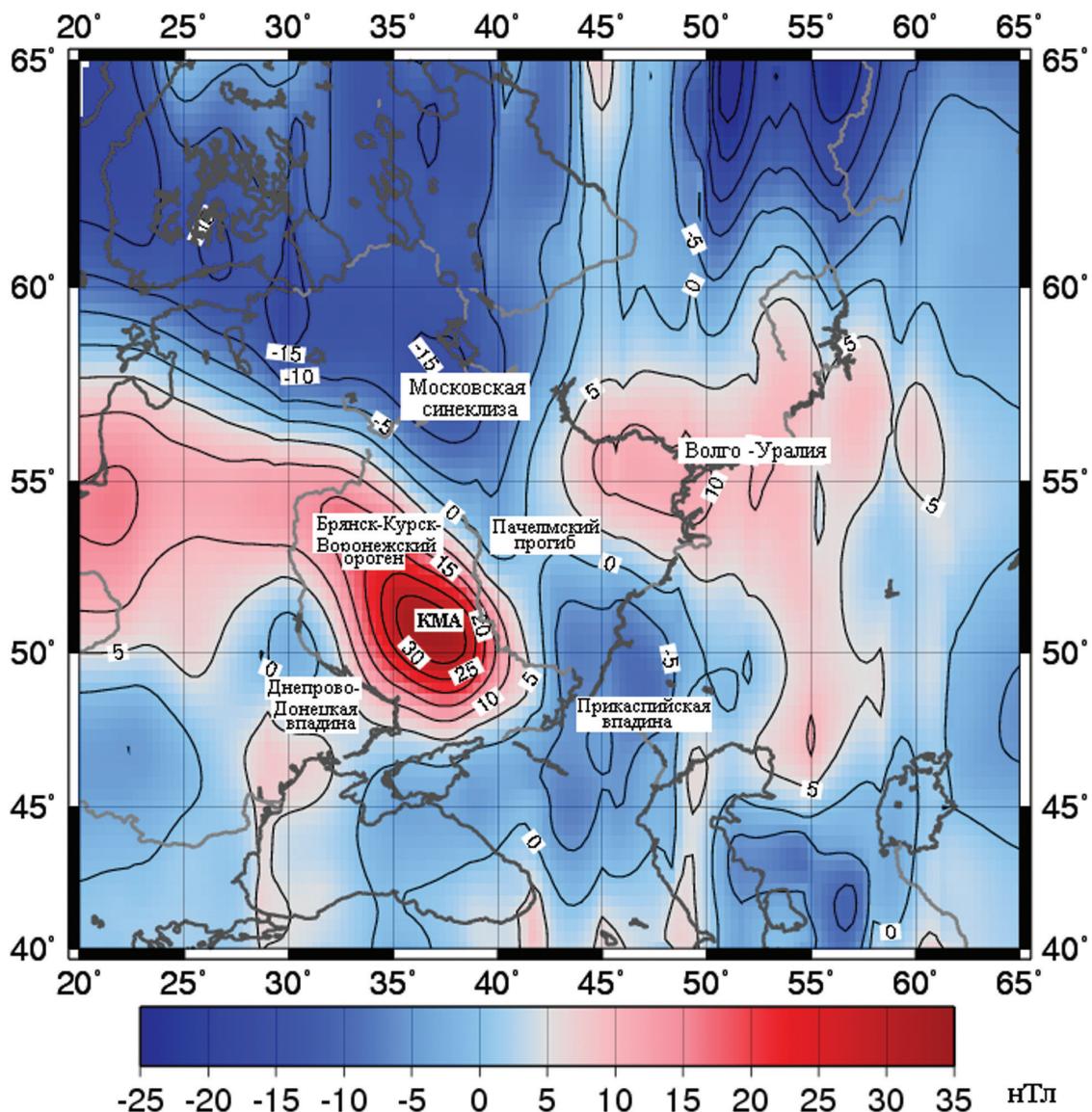


Рис. 1.

a. Распределение вертикальной компоненты литосферного аномального магнитного поля Za на высоте 335 км спутника CHAMP для центральной и восточной частей Восточно-Европейской платформы

Попытки физико-геологической интерпретации спутниковых литосферных аномалий приводят к выводу об их связи с несколькими равновероятными источниками. По мнению большинства интерпретаторов, они могут быть вызваны как изменением средней эффективной намагниченности крупных участков литосферы, так и изменением мощности ее магнитоактивного слоя. Другим, не менее важным источником спутниковых магнитных аномалий являются латеральные вариации состава магнитных минералов. По всей видимости, источником большинства выявленных аномалий является совместное действие обоих вышесказанных факторов.

В пределах древних платформ отмечается низкий средний фон теплового потока. Это, 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.



Рис. 1 (продолжение).

б. Схема тектонического районирования Восточно-Европейской платформы:

1 – граница платформы, 2 – граница основных структур, 3 – южная граница Скифской плиты, 4 – докембрийские авлакогены, 5 – палеозойские авлакогены; цифры в кружках:

- 1–9 – авлакогены (1 – Беломорский, 2 – Лешуконский, 3 – Воже-Лачский, 4 – Среднерусский, 5 – Кажимский, 6 – Колтасинский, 7 – Серноводско-Абдулинский, 8 – Пачелмский, 9 – Печоро-Колвинский); 10 – Московский грабен, 11, 12 – впадины (11 – Ижма-Печорская, 12 – Хорейверская); 13 – Предкавказский передовой прогиб;
- 14–16 – седловины (14 – Латвийская, 15 – Жлобинская, 16 – Полесская)

Литосферное МП, полученное по спутниковым данным, можно рассматривать как некоторую региональную характеристику крупных тектонических единиц. Области повышенных значений поля указывают на закономерности распределения различных типов магнитных неоднородностей в структуре земной коры, свидетельствуют о «просвечивании» древних структур. Их зоны сочленения, по-видимому, являются отражением глубинных и долгоживущих разломов, на которых развивались авлакогены и депрессии (Hemant, Maus, 2005).

Далее мы рассмотрим примеры, отражающие строение глубинных геологических структур в измеренном на спутнике **CHAMP** литосферном МП.

Восточная Европа (Сарматия – Волго-Уралія)

На рис. 1а представлена карта спутникового литосферного МП вертикальной компоненты Z_a . На карте видны сегменты положительных и отрицательных аномалий, ассоциирующиеся с геолого-тектоническим строением региона и хорошо согласующиеся с положением платформенных и складчатых областей и разрывных нарушений. Для сопоставления элементов литосферного МП с геолого-тектоническим строением региона на рис. 1б приведена схема тектонического районирования Русской (Восточно-Европейской) платформы (International..., 1996). Рамкой выделен регион, представленный на рис. 1а. Считается, что Восточно-Европейский кратон сформировался в палеопротозое в результате последовательной коллизии трех сегментов: Фенноскандии, Волго-Уралії и Сарматии (Bogdanova et al., 2006, 2008; Gorbatschev, Bogdanova, 1993). Волго-Уралія и Сарматия в этот период, вероятно, входили в состав единой континентальной массы, подвергшейся воздействию процессов коллизионного и/или плюмового типа (Герасимов, Савко, 1995).

В левой части представленного фрагмента карт аномального поля четко выделяется изометрическая положительная аномалия максимальной интенсивностью порядка 40 нТл с центром около 50° с. ш. и 37° в. д., географически приуроченная к Брянск-Курск-Воронежскому внутриконтинентальному коллизионному орогену. На северо-востоке она ограничивается Пачелмским прогибом, а на юго-западе – Днепровско-Донецкой впадиной. Курская магнитная аномалия (КМА) входит в состав Брянск-Курск-Воронежского орогена, главную роль в ее строении играют железорудные вулканогенно-осадочные пояса, определяющие магнитные свойства этой области. Железорудные пояса КМА характеризуются преимущественно северо-западным простиранием, аналогичное простирание имеет и спутниковая магнитная аномалия.

На востоке рассматриваемой территории расположены архейские структуры Волго-Уральского свода (Волго-Уральская антеклиза), им соответствует положительная магнитная аномалия несколько меньшей интенсивности. Центральную часть территории занимает Торопец – Сердобский пояс, представляющий собой зону коллизии между Волго-Уральским и Сарматским архейскими протоконтинентами. Зона находится под мощными осадочными накоплениями Пачелмского авлакогена. Эти структуры характеризуются пониженными значениями аномального поля, измеренного спутником **CHAMP**.

На территории центральной части Прикаспийской впадины по данным спутника **CHAMP** наблюдается отрицательная аномалия МП. Прикаспийский прогиб находится в пределах широкой полосы относительно молодых геологических образований – Средиземноморского пояса тектонических впадин, созданных тафрогенным режимом (Белоусов, 1989). В центральной части Прикаспийской впадины гранито-гнейсовый слой по сейсмическим данным отсутствует, и осадки лежат прямо на гранулит-базитовом слое. Хотя прогиб и заполнен осадками, мощность коры в целом меньше средней мощности, граница Мохо выпуклая. Прикаспийская отрицательная аномалия соответствует положительной аномалии теплового потока (Бурьянин и др., 1987). Этот факт дает основание полагать, что средняя намагниченность магнитоактивной части коры там незначительна.

Центральную часть Восточно-Европейской платформы занимает Московская синеклиза. В аномальных полях, полученных по данным спутника **CHAMP**, этот сегмент характеризуется отрицательной аномалией. Мощность магнитоактивного слоя в сегменте сокращена снизу в связи с наблюдаемым здесь повышенным тепловым потоком.

Дополнительное сопоставление пространственного распределения аномалий литосферного МП с данными сейсмического зондирования и теплового поля показывает, что на изучаемой территории весь комплекс геофизических наблюдений определяют одни и те же тектонические структуры. В пределах древней платформы средний фон теплового потока низкий. Это в сочетании с большой мощностью коры и глубоким положением изотермической поверхности Кюри магнетита обуславливает существенно большую мощность магнитоактивного слоя, чем в более молодых регионах.

*Отдельные сегменты карты литосферного МП Восточной Европы:
Волго-Уральский кратон*

Попытка извлечь более детальную информацию из спутниковых карт литосферного МП различных масштабов сделана на примере, рассмотренном ниже.

Менее ярко, чем Курская, выражена положительная аномалия на территории, определяемой как Волго-Урал. Для попытки расчленения магнитной аномалии и выделения отдельных ее частей рассмотрим фрагмент карты литосферного магнитного поля более крупного масштаба, относящийся к этой области, *рис. 2а*. На *рис. 2б* для сравнения с картой МП приведен фрагмент карты тектонических подразделений раннедокембрийской коры центральной и восточной частей Восточно-Европейской платформы (Минц, Филиппова, 2009).

На карте магнитных аномалий отчетливо выделяются в виде положительных сегментов овощи: Токмовский (1), Верхнекамский (2), Красноуфимский (3), а также Межовоидная область (6). Бузулукский (4) и Оренбургский (5) сегменты выражены менее четко и представляют собой как бы одну зону с пониженными в центре значениями поля. Неоархейская кора Волго-Уральского кратона пересечена относительно молодыми зонами деформаций, проявляющихся в виде пониженных значений литосферного МП.

Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири

Карта вертикальной компоненты спутникового литосферного МП территории Сибири от побережья Арктики до ее южного горного обрамления представлена на *рис. 3*.

Северная часть региона включает мезозойскую Западно-Сибирскую плиту и докембрийскую Сибирскую платформу. Изученность глубинного строения этого региона геофизическими методами достаточно неравномерна. Несколько трансконтинентальных разрезов построены с использованием ядерных взрывов, осуществленных на этой территории (Egorkin, 1998). Однако окончательный результат все еще не получен.

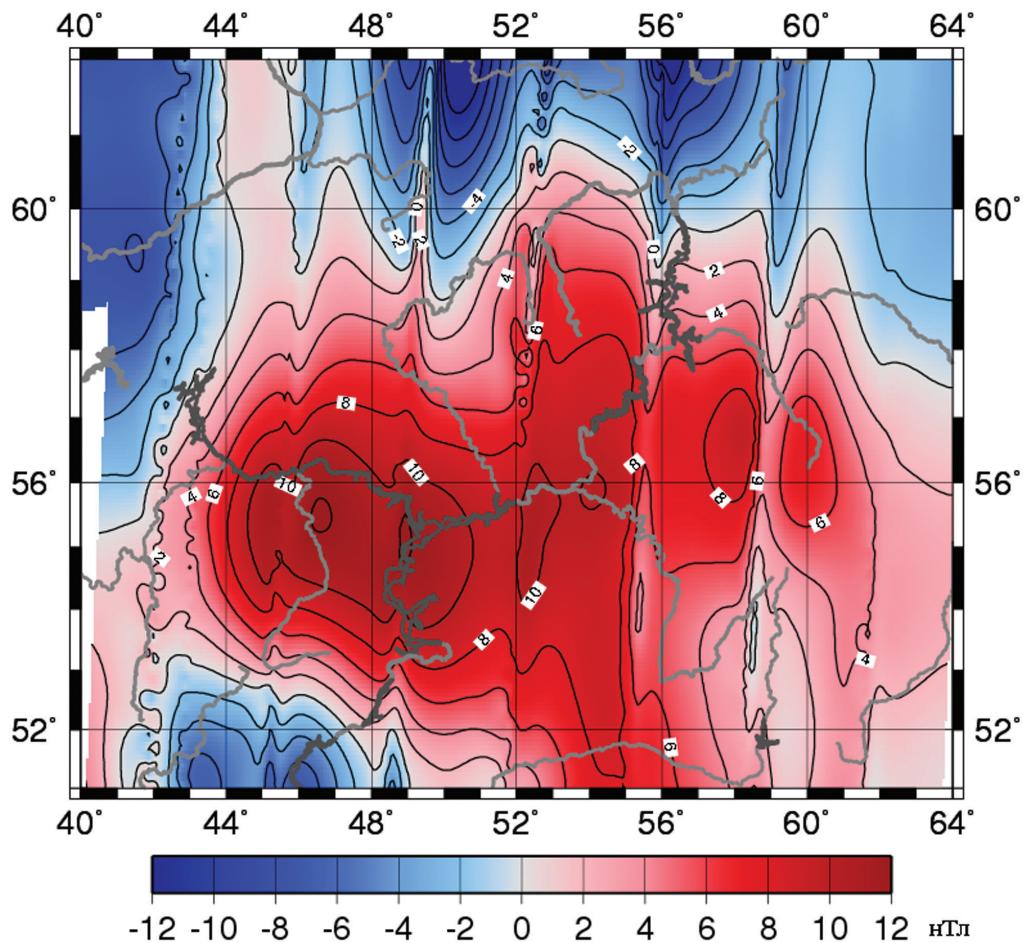


Рис. 2.

a. Фрагмент карты вертикальной компоненты За аномального магнитного поля на высоте 335 км спутника CHAMP для Волго-Уральского кратона

Южная часть территории включает горное обрамление Сибири (Алтай и Саяны) и смежные регионы Монголии и Китая. Эта область имеет чрезвычайно сложную структуру литосферы, состоящую из блоков различного возраста, мощности и размеров. Формирование региона связано, вероятно, с закрытием Палеозойского океана в середине мезозоя. Тектоническая активность здесь проявляется до сих пор, а ее природа приписывается межплитному взаимодействию и (или) мантийным процессам (Zonenshain, Savostin, 1981; Berzin, Dobretsov, 1993).

Аномалии Западно-Сибирской платформы подробно обсуждены в работе (Абрамова и др., 2010).

Сибирский кратон

Докембрийский Сибирский кратон расположен к востоку от Западно-Сибирской платформы. Здесь наблюдается обширная положительная аномалия литосферного спутникового магнитного поля. Полученный методом томографической инверсии продольных сейсмических волн сейсмический образ недр показывает наличие здесь достаточно мощной единой литосферы древнего кратона (Бушенкова и др., 2003).

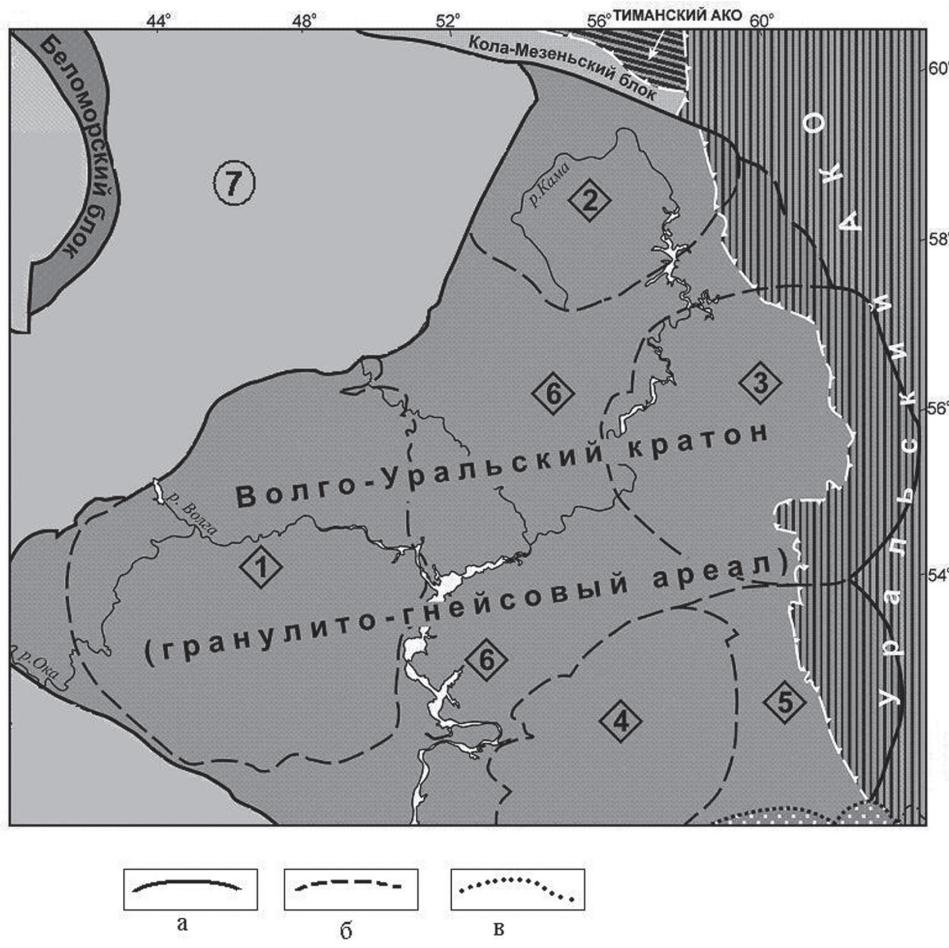


Рис. 2 (продолжение).

б. Тектонические подразделения раннедокембрийской коры Центральной и Восточной частей Восточно-Европейской платформы. Фрагменты архейских структурно-тектонических подразделений Волго-Уральского кратона (гранулито-гнейсовый ареал), (цифры в ромбах): 1–5 овоиды: 1 – Токмовский, 2 – Вернекамский, 3 – Красноуфимский, 4 – Бузулукский, 5 – Оренбургский, 6 – Межовоидная область; 7 (цифра в кружке): Среднерусский внутриконтинентальный коллизионный ороген.

Границы тектонических структур, их фрагментов и сегментов:

а – главных тектонических подразделений (орогенов, фрагментов континентов),

б – секторов и подразделений второго порядка,

в – фанерозойских впадин

Об этом свидетельствуют и данные теплового потока (Дучков, Соколова, 1974), фиксирующие его низкие значения в этой области.

Отдельным сегментом выделяется локальная аномалия МП, расположенная в северной части исследуемой области с центром примерно 65° с. ш. и 92° в. д., которая географически совпадает со сводом современного плато Путорана.

Область пониженных значений литосферного магнитного поля в зоне, ограниченной примерно 55 – 60° с. ш. и 92 – 115° в. д., разделяется на две локальные зоны и согласуется с участком пониженных скоростей сейсмических волн. Это, вероятно, связано с повышенным прогревом литосферы, что выражено здесь резким повышением значений теплового потока до 50 мВт/м 2 (Дучков, Соколова, 1974).

*Горное обрамление Сибири: Алтай, Саяны
и смежные регионы Монголии и Китая*

Для тектонически-активной области Центральной Азии одной из актуальных, интенсивно обсуждающихся в настоящее время проблем, является определение границ жестких блоков (микроплит) и окружающих их зон пластических деформаций. На карте рис. 3 видны крупные сегменты положительных и отрицательных аномалий. Образ магнитных аномалий более мозаичен по сравнению с северной половиной Сибири. Аналогичная картина наблюдается также в тепловом поле (Дучков, Соколова, 1974; Lysak, 1984; Mongolian, 1990) и аномалиях скоростей сейсмических волн (Бушенкова и др., 2003). Обращает на себя внимание чередование положительных и отрицательных аномалий в юго-западном – северо-восточном направлении. Эта общая вытянутость магнитных аномалий в северо-западном направлении соответствует ориентации принципиальных структур литосферы региона.

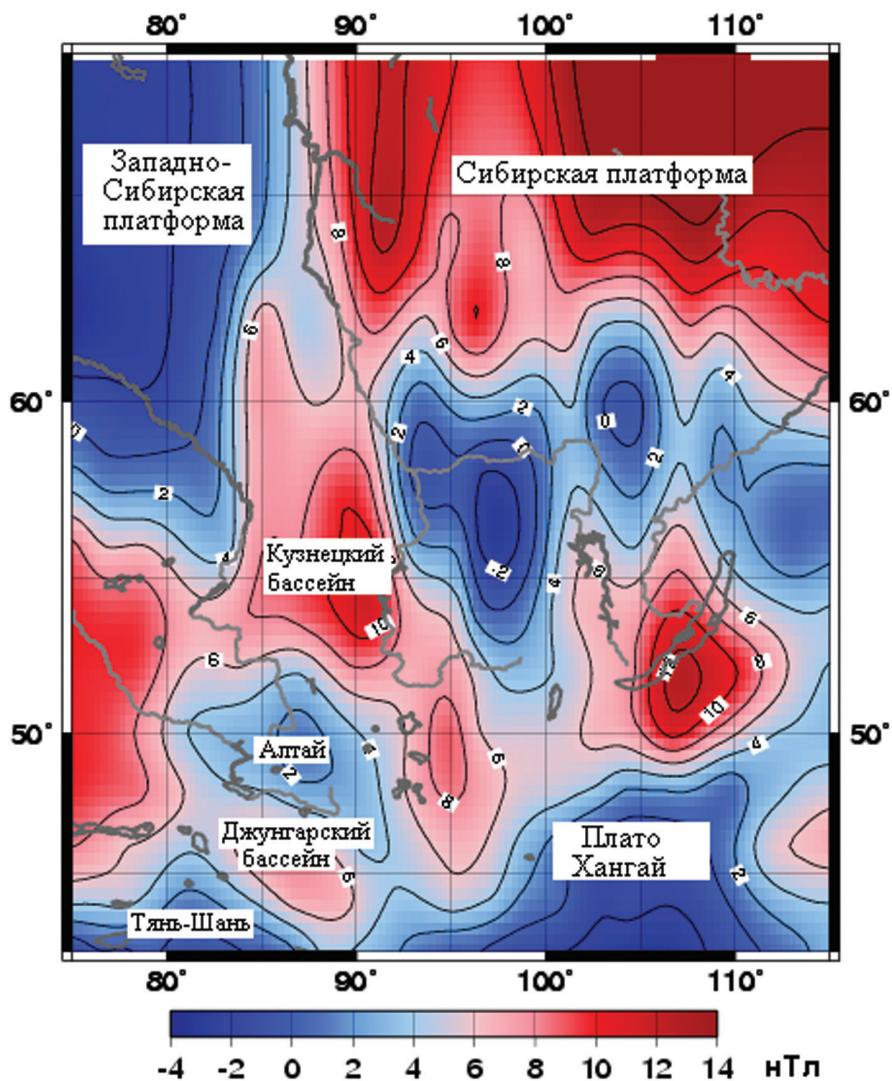


Рис. 3. Карта вертикальной компоненты литосферного аномального магнитного поля Za на высоте 335 км спутника CHAMP для региона Сибирской платформы

Две четких отрицательных аномалии литосферного магнитного поля приурочены к областям Алтая и плато Хангай. При объяснении возможных причин пониженных значений магнитного поля Алтайской зоны и отрицательной аномалии скоростей сейсмических волн (Бушенкова и др., 2003) предполагается разогрев недр современными мантийными процессами и изначальная пластичность литосферы, приобретенная в процессе образования континентальной литосферы области (Dobretsov et al., 1996; Берзин и др., 1994). Объяснение отрицательной аномалии МП в области плато Хангай, возможно, заключается в наличии здесь повышенных значений теплового потока. Топография в виде характерного сводового поднятия говорит о том, что под литосферой плато может существовать современный мантийный плом (Dobretsov et al., 1996; Windley, Allen, 1993). Положительные аномалии литосферного МП обнаруживаются в районах некоторых осадочных бассейнов, таких как Кузнецкий и Джунгария.

Выводы

Изучение литосферного магнитного поля Земли на сегодняшний день является одним из наиболее информативных геофизических подходов в исследовании внутреннего строения и процессов, происходящих в нижних частях земной коры. Литосферное магнитное поле может быть использовано в комплексе с другими методами для картирования фундамента. Например, вся территория Восточно-Европейской платформы перекрыта осадочными отложениями различного состава и возраста. Следовательно, картирование горных пород кристаллического фундамента и тем более изучение глубинного строения могут базироваться исключительно на геофизических данных. Согласованность пространственного распределения регионального магнитного поля с современными геологическими представлениями о строении коры свидетельствует о том, что источники магнитных аномалий действительно имеют реальное геологическое происхождение и лежат в земной коре. Кроме того, их локализация почти всегда хорошо согласуется с данными сейсморазведки и геотермических исследований.

Области повышенных значений литосферного поля указывают на общие закономерности распределения различных типов магнитных неоднородностей в структуре земной коры, свидетельствуют о «просвечивании» древних структур. Их зоны сочленения, по-видимому, являются глубинными и долгоживущими структурами. Все это говорит о перспективности использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля для изучения регионального тектонического строения, в том числе исследований погребенных дорифейских структур, состава и мощности глубинных частей коры. Одной из целей использования спутниковых данных может стать поиск возможного распространения дорифейских областей под фанерозойским покровом и пересмотр их скрытых границ.

Карты магнитного литосферного поля построены с использованием программ GMT (Wessel, Smith, 1998).

Литература

1. 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. 2011. № 6. С. 53–63.
2. Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. Длинноволновые магнитные аномалии на территории России по измерениям спутника CHAMP // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 48–63.
3. Абрамова Л.М., Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В. Исследования литосферного спутникового поля Западной Сибири // Геофизика. 2010. № 6. С. 45–54.
4. Белоусов В.В. Основы геотектоники. М.: Недра, 1989. 382 с.
5. Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л. Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7–8. С. 8–28.
6. Бушенкова Н.А., Тычков С.А., Кулаков И.Ю. Исследование структуры верхней мантии Центральной Сибири и прилегающих районов на PP-Р-волнах // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 474–490.
7. Бурьяннов В.Б., Гордиенко В.В., Завгородняя О.В. и др. Геофизическая модель тектоносферы Европы. Киев: Наукова думка, 1987.
8. Герасимов В.Ю., Савко К.А. Геоспидометрия и температурная эволюция гранат-кордиеритовых метапелитов Воронежского кристаллического массива // Петрология. 1995. № 3.
9. 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.
10. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Геотермальные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. 280 с.
11. Минц М.В., Филиппова И.Б. Карта «Тектоническое районирование раннедокембрийской коры центральной и восточной частей Восточно-Европейской платформы». 2009. М. 1:2 500 000.
12. Пацкевич И.К., Марковский В.С., Орлюк М.И. Магнитная модель литосферы Европы. Киев: Наукова думка, 1990. 168 с.
13. Щукин Ю.К. Проблемы глубинной геологии в региональных геофизических исследованиях. Вторая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли: Сб. М.: МАКС ПРЕСС, 2005. С. 21–30.
14. 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.
15. 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.
16. Berzin N.A., Dobretsov N.L. Geodynamic evolution of South Siberia in Late Precambrian-Early Paleozoic Time // Reconstruction of the Paleoasian Ocean. Netherlands: VSP Inter. Sci. Publishers, 1993. P. 45–62.

17. Bogdanova S., Bingen B., Gorbatschev R., Kheraskova T., Kozlov V., Puchkov V., Volozh Yu. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // *Precam. Res.*, 2008. 160. P. 23–45.
18. Bogdanova S., Gorbatschev R., Grad M., Guterich A., Janik T., Kozlovskaia E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L., EUROBRIDGE: New insight into the geodynamic evolution of the East European Craton // *European Lithosphere Dynamics*, Geological Society. London: Memoirs, 2006. V. 32. P. 599–628.
19. Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D. et al. Mezo- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: Effects of the lithospheric plates interactions and mantle plumes // *Int. Geology Rev.*, 1996. V. 38, P. 430–466.
20. Egorkin A.V. Velocity structure, composition and discrimination of crustal provinces in the former Soviet Union // *Tectonophysics*, 1998. V. 289. P. 395–404.
21. Goodwin A.M. *Precambrian Geology*: Elsevier, New York, 1991.
22. Goodwin A.M. *Principles of Precambrian Geology*: Elsevier, New York, 1996.
23. Gorbatschev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield // *Precam. Res.*, 1993. 64. P. 3–21.
24. 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.
25. 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.
26. *International Tectonic Map of Europe. 1: 5 000 000*. Commission for the Geological Map of the World. 1996.
27. Langel R.A., Ousley G., Berbert J. The Magsat Mission // *Geophys. Res. Lett.*, 1982. V. 9. P. 243–245.
28. Langel R.A. The use of low altitude satellite data base for modeling of core and crustal fields and the separation of external and internal fields // *Surveys in Geophysics*, 1993. No. 14. P. 31–87.
29. Lysak S.V. Terrestrial heat flow in the south of East Siberia // *Tectonophysics*, 1984. V. 103, P. 205–215.
30. Mongolian National Atlas. Ulan Bator, Moscow, 1990.
31. Olsen N. Orsted initial field model // *Geophys. Res. Lett.*, 2000. V. 27. P. 3607–3610.
32. 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.
33. Regan R.D., Cain J.C., Davis W.M. A global magnetic anomaly map // *J. Geophys. Res.*, 1975. V. 80. P. 794–802.
34. Reigber C., Luhr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // *Adv. Space Res.*, 2002. V. 30. P. 129–134.
35. 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.
36. Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // *Tectonophysics*, 1999. V. 306. P. 461–470.

37. Wessel P., Smith W.H.F. New improved version of the Generic Mapping Tools Released: EOS // Trans. AGU, 1998. V. 79. 579 p.
38. Windley B.F., Allen M.B. Mongolian plateau: Evidence for the late Cenozoic mantle plume under Central Asia // Geology, 1993. V. 21. P. 295–298.
39. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics, 1981. V. 76. P. 1–15.

On the study of tectonosphere on the base of satellite data

D.Yu. Abramova¹, L.M. Abramova², S.V. Filippov¹

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)
142190, Troitsk, Moscow Region, Russia

E-mails: abramova@izmiran.ru, sfilip@izmiran.ru

²Geoelectromagnetic Research Centre of Shmidt Inst. of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences
142190, Troitsk, Moscow reg., PO box 30, Russia
E-mail: labramova@igemi.troitsk.ru

Results of the satellite magnetic measurements could make a valuable contribution in the geological and tectonic mapping and a deep structure study. New sights at an opportunity of the long wavelength anomalies interpretation have come when the first magnetic anomaly maps were constructed on the base of the satellite observation. The morphology of the regional lithosphere magnetic anomalies discovered above the East Europe and Siberia from the experimental data obtained by CHAMP satellite was analyzed. Its probable nature and links with the tectonic structure of these areas were discussed. Fragments of the several scales maps of the satellite anomaly magnetic field were constructed and examined. Interpretation of these maps shows that the magnetic anomalies are connected with the modern large-scale geological and tectonic elements of the foundation, but at the same time they are not well and not always correlated with the surface geological structures.

Keywords: satellite magnetic observations, long-wave lithosphere magnetic anomalies, East European platform, Siberian platform, cratons.