УДК 550.34.09

# ДЛИННОВОЛНОВЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПУТНИКА *СНАМР*

© 2009 г. Д.Ю. Абрамова<sup>1</sup>, С.В. Филиппов<sup>1</sup>, Л.М. Абрамова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова, г. Троицк, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, г. Троицк, Московская обл., Россия

Новые взгляды на длинноволновые магнитные аномалии возникли с появлением первых карт этих аномалий, полученных с использованием данных спутниковых измерений. Анализируется распределение региональных литосферных аномалий, выявленных по результатам спутниковых измерений над территорией Евразийского кратона и прилегающей альпийской складчатой зоны. Параметры орбиты спутника *СНАМР* позволяют ежедневно получать данные о магнитном поле на практически однородной сетке над поверхностью Земли, что дает возможность рассчитывать сферическую гармоническую модель главного магнитного поля Земли отдельно для каждого дня.

Ключевые слова: спутниковые измерения, длинноволновые магнитные аномалии, Европейский кратон.

#### Введение

Карты магнитных аномалий, получаемые при наземных, аэро- и морских съемках давно используются для изучения геологических и тектонических свойств коры. При этом, как правило, выделяются геологические объекты с размерами по латерали порядка 50 км. Однако в последние десятилетия возрос интерес к изучению крупномасштабных аномалий, имеющих протяженность в сотни километров, которые проявляются при региональных обобщениях данных аэромагнитных съемок. Пространственные изменения параметров этих аномалий отражают характеристики магнитных свойств и мощности намагниченных слоев на больших глубинах.

Под длинноволновыми понимаются аномалии, половина пространственной длины волны которых превышает 250 км. Новые взгляды на подобные аномалии возникли с появлением первых карт магнитных аномалий, полученных со спутников *Pogo* [*Regan*, *Cain, Davis*, 1975], *Magsat* [*Langel, Ousley, Berbert*, 1982; *Cain et al.*, 1989; *Пашкевич и dp.*, 1990; *Arkani-Hamed, Langel, Purucker*, 1994; *Ravat et al.*, 1995; *Sabaka, Olsen, Langel*, 2000] и Ørsted [Olsen et al., 2000]. Интерпретация карт спутниковых коровых аномалий над континентальными областями основывалась на их прямом сравнении с региональными геологическими или тектоническими картами [*Frey*, 1982; *Achache, Abtout, Le-Moue*, 1987]. Эти исследования показали, что крупномасштабные структуры – щиты, кратоны, зоны субдукции и подобные им – связаны с положительными аномалиями, а бассейны и абиссальные равнины – с отрицательными. Положительные аномалии связывались с повышенной магнитной восприимчивостью объектов; отрицательные объяснялись утончением коры и поднятием изотермы Кюри.

Уникальная возможность анализа параметров геомагнитного поля, полученных на искусственных спутниках Земли *Magsat*, Ørsted и CHAMP и дополненных данными наземных наблюдений, активно используется в последние годы при геологотектонической и геофизической интерпретации. Миссия искусственного спутника Земли *СНАМР* обеспечивает надежные измерения скалярных и векторных параметров геомагнитного поля; при этом с достаточно высоким разрешением и точностью может быть определен вклад литосферного поля. Возможность использования этих данных открывает перспективу изучения литосферного аномального магнитного поля (АМП) Земли на высотах спутниковых измерений, получения новых сведений о структуре и свойствах региональных аномалий и проведения геолого-тектонической интерпретации полученных результатов.

Основная задача настоящей работы – анализ распределения региональных литосферных аномалий, выявленных по результатам спутниковых измерений над территорией Евразии. Для ее решение было необходимо, во-первых, собрать, обобщить параметры геомагнитного поля, измеряемые спутником в околоземном пространстве, и привести их к удобной для дальнейшей обработки форме; во-вторых, разработать подходы к обработке этих огромных массивов данных и технологии, обеспечивающие выделение составляющей, наиболее адекватно характеризующей именно литосферное аномальное магнитное поле, и, наконец, провести интерпретацию выделенных магнитных аномалий и сопоставить полученные результаты с имеющимися для исследуемых регионов геологическими данными.

## Выбор экспериментальных данных

Экспериментальные данные, полученные со спутников *Pogo* (1965–1971 гг.), *Magsat* (1979–1980 гг.), *Ørsted* (1999–2002 гг.) и *CHAMP* (с 2000 г. по настоящее время), активно используются магнитологами при изучении свойств геомагнитного поля и его пространственного распределения [*Cohen, Achache,* 1990; *Ravat et al.,* 1995; *Порохова, Абрамова, Порохов,* 1996; *Maus et al.,* 2002; *Reigber, Luhr, Schwintzer,* 2002; *Taylor et al.,* 2002; *Pomaнoвa u dp.,* 2005; *Hemant, Maus, Haak,* 2005].

Данные спутника Ørsted оказались малопригодными для исследования аномального магнитного поля из-за большой (около 700 км над поверхностью Земли) высоты его орбиты. На этой высоте аномальное поле даже такой мощной магнитной аномалии, как Курская, имеющая на земной поверхности амплитуду порядка двух десятков тысяч нанотеслов, не превышает 3–5 нТл. Для большинства же регионов земного шара величина аномального поля на орбите спутника Ørsted составит доли нанотеслов.

Первые глобальные карты литосферного магнитного поля компилировались по данным скалярных измерений. После признания факта, что магнитное поле литосферы недостаточно хорошо описывается исключительно скалярными данными [*Backus*, 1970], спутник *Magsat* был оборудован в дополнение к скалярному векторным магнитометром и специальным блоком для точного определения координат точки измерения.

Сейчас наиболее эффективно используются данные спутников *Magsat* и *CHAMP*, поскольку и скалярные, и векторные измерения геомагнитного поля на них произведены с высокой точностью. К тому же, оба спутника имеют околополярную орбиту, благодаря чему получаемые с их помощью ряды высококачественных данных равномерно покрывают поверхность всего земного шара. Однако результаты анализа поля, проведенного разными исследователями с использованием различных наборов данных, критериев их отбора и схем обработки, значительно различаются, особенно в полярных областях и в областях со слабой намагниченностью пород.

Нами для исследования аномального магнитного поля были использованы данные работающего поныне спутника *СНАМР* (Германия), который был запущен в июле 2000 г. Скалярные и векторные данные с этого спутника стали доступны спустя 3 недели после запуска – с 08.08.2000 г. Приведем краткое описание спутника.

Спутник *CHAMP* имеет круговую орбиту с углом наклона 87.3°; средняя высота полета около 460 км [*Reigber, Luhr, Schwintzer,* 2002]. По прошествии 5 лет с момента запуска высота полета спутника снизилась до 360 км. После двух маневров, предпринятых для увеличения высоты, миссия спутника была продлена.

На спутнике установлены два магнитометра и специальная система, обеспечивающая ориентацию датчиков. Один из магнитометров – магнитометр OVM – регистрирует амплитуды скалярных значений модуля полного вектора геомагнитного поля (*T*) с точностью ~1 нТл; второй – трехкомпонентный феррозондовый магнитометр *FGM* – измеряет три ортогональных векторных компоненты (*X*, *Y*, *Z*) с точностью ~6 нТл.

За одни сутки спутник *СНАМР* делает около 14 витков, каждый из которых охватывают все часы суток. (Напомним, что витки спутника *Magsat* делились на восходящие и нисходящие и всегда приходились на 6 и 18 ч местного времени). Получаемые данные имеют секундное разрешение по времени, что составляет в пространстве примерно 7 км.

#### Методика обработки данных спутниковых измерений

Анализ спутниковых данных с целью выделения из полных значений геомагнитного поля аномальных магнитных составляющих основывается на том, что измеренное на спутниковых высотах поле есть сложная функция пространства и времени, состоящая из частей, обусловленных различными – внешними и внутренними по отношению к поверхности Земли – источниками. Основная проблема при анализе состоит в корректном разделении суммарного магнитного поля на составляющие, связанные с различными физическими источниками.

Измеренное на спутнике геомагнитное поле является суперпозицией следующих составляющих:

 – главного магнитного поля, создаваемого источниками магнитогидродинамической природы, которые расположены в жидкой части земного ядра;

– внешних полей, произведенных магнитосферно-ионосферными токовыми системами;

 аномального поля, связанного с намагниченностью горных пород, слагающих земную литосферу;

– индукционных полей, возникающих вследствие проводимости различных структур земной коры и верхней мантии Земли.

Аномальные магнитные поля остаются после последовательного исключения всех остальных составляющих, что, естественно, ставит надежность их выделения в зависимость от методик, выбранных для характеристик удаляемых частей.

Такой подход к выделению "литосферных" данных, называемый физическим, стал практически классическим. Он был существенно усовершенствован авторами в части вычитания из суммарного поля главного магнитного поля, обычно представляемого международной аналитической моделью (*IGRF*).

В основе *IGRF* лежит сферический гармонический анализ среднегодовых значений геомагнитного поля. Заданные специальным образом параметры орбиты спутника *CHAMP* дают возможность получать измерения геомагнитного поля ежесуточно в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли [*Головков, Зверева, Чернова,* 2007]. Это позволяет с помощью разложения компонент поля для векторных данных спутника *CHAMP*, полученных с секундным разрешением в течение одного дня, по сферическим гармоникам вплоть до степени и порядка 14 построить среднесуточную сферическую гармоническую модель (ССГМ) главного магнитного поля отдельно для каждого дня:

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

где U – геомагнитный потенциал в точке с географическими координатами  $(r, \theta, \lambda)$ ; 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.

При вычислении разностных полей из значений, измеренных на каждом витке, исключалось не поле, усредненное за длительный интервал времени, а модельное поле, относящееся к данному конкретному дню.

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

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 со спутника *СНАМР* отобраны и обработаны для спокойных в магнитном отношении ( $k_p \le 2$ , *Dst*-индекс – до 20 нТл) дней осени–зимы 2003 г. Для уменьшения искажающего влияния на результаты анализа спокойной солнечносуточной вариации к рассмотрению принимались только витки, совершенные спутником в ночное время (*LT* от 22.00 ч до 6.00 ч).

Таким образом, в пределах рассматриваемой территории были отобраны и обработаны спутниковые витки, равномерно покрывающие два сектора – от 10° до 50° в.д. на европейской части и от 50° до 80° в.д. на азиатской. По широте рассматриваемые регионы были ограничены 25° и 60° с.ш.

Следует отметить, что в работе были использованы данные, имеющие пятисекундное разрешением по времени, что соответствует разрешению в пространстве примерно 35 км.

## Результаты и их обсуждение

#### Пространственное распределение аномального магнитного поля

С использованием вышеописанных технологий по данным спутника *CHAMP* были построены карты пространственного распределения литосферного аномального магнитного поля (АМП) на высоте полета спутника. Для повышения надежности построений и исследования воспроизводимости полученных результатов для каждой из исследуемых областей карты АМП строились с использованием нескольких независимых наборов спутниковых данных. Сравнение построенных таким образом карт показало, что пространственная структура аномального магнитного поля воспроизводится достаточно адекватно.

Кроме того, построенные авторами карты АМП сопоставлялись с опубликованными ранее аналогичными картами, основанными на данных спутника Magsat [Пашкевич и др., 1990; Cohen, Achache, 1990; Ravat et al., 1995; Taylor et al., 2002]. Результаты этого сопоставления свидетельствуют о четком выделении основных крупномасштабных аномалий по данным обоих спутников. Существующие различия приурочены, главным образом, к областям, где значения выделяемого аномального поля близки к уровню шума.

Анализ литосферного магнитного поля показывает, что на спутниковых высотах аномальная часть поля существенно уменьшается – высокочастотные аномалии сглаживаются, остаются низкочастотные региональные аномалии с размерами пространственных периодов 400–500 км и интенсивностью порядка первых десятков нанотеслов. Модельные расчеты, приведенные в [*Пашкевич и др.*, 1990], показали, что на высоте 350 км и выше единичные аномалии даже очень высокой интенсивности (порядка тысяч нанотеслов) затухают практически полностью. В той же работе сделан вывод о существовании на высоте полета спутника суммарного эффекта от сильно намагниченных поверхностных источников в случае большой насыщенности ими верхней части коры и повышенной намагниченности вмещающей среды.

Спутниковые наблюдения малочувствительны к мелкомасштабным структурам, что позволяет выделять по ним региональные литосферные аномалии, не осложненные локальной компонентой.

## Природа литосферных аномалий

Аномальное магнитное поле континентальной литосферы характеризуется большим разнообразием. Источники аномалий сконцентрированы в некотором объеме литосферы, который принято называть 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 изотермическая поверхность Кюри для магнетита, либо раздел Мохоровичича [*Arkani-Hamed, Strangway*, 1986; *Пашкевич и др.*, 1990]. Вопрос о том, находится ли этот слой полностью в коре или же проникает и в верхнюю мантию, до сих пор остается открытым. Принципиальная возможность намагниченности верхов мантии некоторых регионов (с низкими глубинными температурами) подтверждается геотермическими расчетами. В ряде случаев [*Бурьянов и др.*, 1983] изотерма Кюри для магнетита (580°) оказывалась на глубинах до 100 км. Однако детальный анализ магнитного поля нескольких регионов Европы показал, что вклад мантийной составляющей в региональные аномалии при правильном подборе значений намагниченности мантийных пород незначителен.

Попытки физико-геологической интерпретации спутниковых аномалий 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 аномалий могут быть латеральные изменения температуры однородного слоя литосферы и, соответственно, изменение глубины до изотермической поверхности Кюри для магнетита. Другим, не менее важным источником спутниковых магнитных аномалий, являются латеральные вариации состава магнитных минералов. Наибольшую роль здесь играет степень намагниченности нижней части земной коры, значительная интенсивность и изменчивость которой в настоящее время не вызывает сомнений [Пашкевич и др., 1994]. По всей видимости, источником большинства выявленных аномалий, является совместное действие обоих вышеназванных факторов.

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

Аномальное магнитное поле, полученное по спутниковым данным, можно рассматривать лишь как некоторую региональную характеристику крупных тектонических единиц. Размеры магнитных сегментов близки к размерам тектонических структур, однако не всегда они совпадают пространственно. Магнитные сегменты скорее указывают на закономерности распределения различных типов магнитных неоднородностей в структуре земной коры, свидетельствуют о "просвечивании" древних структур. Зоны сочленения магнитных сегментов, по-видимому, являются глубинными и долгоживущими разломами, на которых развивались авлакогены и депрессии.

#### Курская магнитная аномалия (КМА)

На первом этапе для отладки и тестирования предложенной авторами методики обработки данных спутника *СНАМР* были построены карты пространственного распределения аномального магнитного поля для хорошо изученной территории Курской магнитной аномалии (КМА) и прилегающих к ней регионов.

Расширенный массив, включающий данные около ста витков, был детально обработан в рамках "физического" подхода; было построено пространственное распределение аномального магнитного поля, используемое в качестве основы для изучения магнитоактивного слоя земной коры. Распределение вертикальной компоненты  $Z_a$  литосферного магнитного поля на высоте спутника 400 км для региона КМА показано на рис. 1.



**Рис. 1**. Распределение вертикальной компоненты литосферного аномального магнитного поля *Z*<sub>a</sub> на высоте спутника *СНАМР* для региона Курской магнитной аномалии

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2009. Том 10. № 4

В середине представленного фрагмента карты АМП четко выделяется положительная аномалия с максимальной интенсивностью более +25 нТл, центр которой расположен около 50° с.ш. и 37° в.д. Сопоставление этой аномалии с геолого-тектоническими схемами исследуемого региона свидетельствует об отсутствии однозначной связи спутниковой аномалии с основными морфоструктурами земной коры, имеющими разный возраст консолидации. Однако 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.

Построенная карта была сопоставлена с аналогичными результатами других авторов [*Taylor, Frawley,* 1987; *Пашкевич и др.,* 1990; *Taylor et al.,* 2002]. Отмечено, что основные особенности аномалии определены достаточно надежно, имеющиеся отличия приурочены к участкам карты, где значения выделяемого аномального поля близки к уровню шума (2–4 нТл). Полученное авторами пространственное распределение аномального магнитного поля для рассматриваемой территории было сопоставлено с данными наземных наблюдений – магнито- и гравиметрических, сейсмического зондирования, изучения теплового потока. Установлено, что в пределах изучаемой территории фактически по данным всего комплекса геофизических наблюдений определяются одни и те же тектонические структуры.

#### Европа

По отработанной на территории КМА методике обработки данных спутника *СНАМР* были построены скалярные и векторные карты магнитных аномалий для территории Европы.

Карта вертикальной компоненты аномального магнитного поля  $Z_a$  на высоте спутника 400 км приведена на рис. 2. Представляется интересным сравнить полученный результат со схемой региональных магнитных аномалий той же территории, полученной по приземным съемкам [Бурьянов и др., 1987].



**Рис. 2**. Магнитные аномалии вертикальной составляющей аномального магнитного поля  $Z_a$  по данным спутника *СНАМР*: положительные – Курская (КМА), Балтийская (Б), Камско-Эмбенская (КЭ), Уральская (У); отрицательные – Ленинградская (Л), Центрально-Европейская (ЦЕ), Прикаспийская (П), Восточно-Средиземноморская (ВС)

Обращает на себя внимание тот факт, что положительным спутниковым аномалиям отвечает максимальная концентрация региональных "наземных" аномалий; в минимумах же спутниковых аномальных полей региональные аномалии встречаются значительно реже и относятся к краевым их частям.

При анализе наземных карт магнитных аномалий Восточно-Европейской платформы, прежде всего, обращает на себя внимание разная степень насыщенности ими краевых и центральной частей платформы. Подавляющее большинство аномалий приурочено к краевым частям Восточно-Европейской платформы, что определяется распределением теплового потока. В пределах древней платформы магнитоактивный слой значительно мощнее, чем в более молодых регионах, что обусловлено низким средним фоном теплового потока на древних платформах в сочетании с большой мощностью коры и глубоким положением изотермической поверхности Кюри магнетита. Почти полное отсутствие региональных аномалий магнитного поля за пределами Восточно-Европейской платформы связано с более горячим режимом литосферы, сокращением ее мощности и уменьшением мощности магнитоактивного слоя.

Центральную часть Восточно-Европейской платформы представляет так называемый Ленинградский сегмент (Л на рис. 2), охватывающий Балтийскую моноклиналь и Московскую синеклизу. В аномальных полях, полученных по данным спутника *СНАМР*, сегмент Л характеризуется отрицательной аномалией. Мощность магнитоактивного слоя в нем сокращена снизу в связи с наличием в его центральной части интенсивной положительной аномалии теплового потока. Отмеченный факт в сочетании с меньшей концентрацией в сегменте Л глубинных магнитных неоднородностей дает основание полагать, что средняя намагниченность магнитоактивной части коры незначительна.

Вокруг сегмента Л, описанного выше, располагаются положительные аномалии магнитного поля различной интенсивности, относящиеся к краевым частям платформы. Положительные аномалии, установленные по данным спутника СНАМР, отвечают областям максимальной насыщенности региональными магнитными аномалиями, полученными по данным наземной магниторазведки. Согласно этим данным, при переходе от южного склона Украинского щита к собственно щиту увеличивается степень дифференцированности аномального магнитного поля [Литосфера..., 1988]. Сегмент КМА (см. рис. 2) характеризуется максимальными для платформы мощностями земной коры и "базальтового" слоя. На картах спутникового АМП достаточно хорошо прослеживаются известные по наземным съемкам региональные аномалии – отрицательная Кировоградская и положительные Одесская и Западно-Ингулецкая. В их центральных частях, как правило, пересекаются трансрегиональные разломы, выходящие за пределы платформы. На северо-востоке региона (см. рис. 2) выделяется узкая, лежащая между 30° и 32° в.д. субмеридиональная зона, которая трассируется в пределы Русской плиты, Украинского щита (до южной границы Восточно-Европейской платформы) и далее вплоть до Восточно-Африканского рифта. Субмеридиональное простирание этой зоны подтверждается материалами дешифрирования космических фотоснимков высокого уровня генерализации в виде Лапландско-Нильского трансконтинентального линеамента.

Региональные магнитные аномалии платформенных областей Центральной Европы менее интенсивны по сравнению с Восточно-Европейской платформой, что обусловлено, по-видимому, относительно тонкой корой на всей платформенной части Центральной и Западной Европы; насыщенность региона этими аномалиями незначительна. В тектоническом отношении аномалии, тяготеют, главным образом, как и на древней платформе, к краевым частям крупных тектонических образований, например, Альпийского складчатого пояса, который характеризуется достаточно спокойным слабо отрицательным спутниковым аномальным полем. Вдоль восточной границы Восточно-Европейской платформы прослеживается положительный сегмент – Камско-Эмбенская магнитная аномалия (КЭ на рис. 2). Сегмент КЭ охватывает Волго-Уральскую антеклизу, восточную часть Прикаспийской впадины, Предуральский краевой прогиб и Уральскую складчатую зону. Спутниковая аномалия над этим сегментом состоит из нескольких максимумов. Регион представлен разновозрастными структурами с чрезвычайно разнообразными температурным режимом, плотностью и составом земной коры.

В центральной части Прикаспийской впадины по данным спутника *CHAMP* отмечается отрицательная аномалия магнитного поля (П на рис. 2). Здесь, судя по сейсмическим данным, осадки залегают непосредственно на "базальтовом" слое, который имеет мощность 6–9 км. Раздел Мохоровичича 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. Прикаспийский прогиб находится в пределах широкой полосы относительно молодых геологических образований Средиземноморского пояса альпийской складчатости, которые занимают весь юг Европы. При сопоставлении спутниковых магнитных аномалий со схемой распределения температур на глубине 50 км в Европе [*Бурьянов и др.*, 1987] можно видеть, что зоны повышенных градиентов изменения температур, в целом, отвечают уменьшению магнитного поля в южном направлении, а Прикаспийская отрицательная магнитная аномалия соответствует положительной аномалии теплового потока.

## Урал и Западная Сибирь

По данным спутника *СНАМР* построены скалярные и векторные карты магнитных аномалий для территории Урала. Вертикальная компонента  $Z_a$  аномального магнитного литосферного поля Уральской зоны на спутниковой высоте отчетливо выражена в общей структуре поля Европы (см. рис. 2). Карта компоненты  $Z_a$  для Южного Урала приведена на рис. 3, *a*. Как отмечалось выше, высокомагнитный сегмент охватывает Волго-Уральскую антеклизу, восточную часть Прикаспийской впадины, юг Предуральского краевого прогиба, собственно Урал и часть Зауральской зоны. Большей части Зауральской зоны и прилегающей к ней Западно-Сибирской платформе отвечает область отрицательных и слабоположительных значений спутникового литосферного АМП.

Присутствие протерозойских областей на территории Уральской зоны незначительно, однако положительные спутниковые магнитные аномалии занимают достаточно большую площадь, что, по-видимому, указывает на существование обширных намагниченных слоев в глубоких частях коры. Некоторым подтверждением этого предположения являются результаты сейсмических исследований, проведенных на профиле "Уралсейс-95" [Берзин, Аккуратова, Керимова, 2000].

Профиль протяженностью 500 км проходит через Южный Урал и пересекает с запада на восток Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральскую зону складчатости, Центральноуральское поднятие, Тагильско-Магнитогорский прогиб, Восточно-Уральское поднятие, Восточно-Уральский прогиб, Зауральское поднятие (рис. 3, *б*). Построенная по результатам этих исследований геолого-геофизическая модель глубинной части земной коры может объяснить значения амплитуд аномального магнитного поля на спутниковых высотах.

По мнению авторов работы [Берзин, Аккуратова, Керимова, 2000], земная кора представляет собой систему тектонических нарушений, погружающихся почти симметрично к югу – Авзянский, Главный Уральский и Карталинский разломы. По этим разломам в результате действующих сжимающих усилий происходят "срывы" целых блоков и слоев с погружением их в "мягкую" мантию в Центральной части Магнитогорской зоны.



**Рис. 3.** Карта вертикальной компоненты литосферного аномального магнитного поля  $Z_a$  для Южного Урала на высоте спутника *СНАМР* (*a*) и геолого-геофизическая модель земной коры по профилю "Уралсейс-95" (*б*) [*Берзин, Аккуратова, Керимова*, 2000]. *a*: АА – линия, соответствующая положению профиля "Уралсейс-95". *б*: *1*– зона субдукции, *2* – поверхность базальтового слоя, *3* – поверхность протерозойских отложений, *4* – разрывные нарушения, *5* – граница Мохоровичича, HVZ – зона повышенных скоростей. Над разрезом кривая аномального магнитного поля по линии АА (данные спутниковых измерений)

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2009. Том 10. № 4

Как видно на рис. 3,  $\delta$ , нижний самый мощный слой коры (предположительно архейский) в центральной части профиля залегает на глубинах 22–40 км и ниже. Граница Мохоровичича находится на глубине ~40 км. Центральная часть разреза имеет вид "чаши", которая с запада и востока ограничена крупными субмеридиональными разрывными нарушениями. Приведенная над разрезом на рис. 3,  $\delta$  кривая спутникового аномального магнитного поля по линии АА качественно соответствует модели: наблюдается увеличение значений аномального поля над областью погружения границы Мохоровичича и ослабление поля в местах, где присутствуют субмеридианальные нарушения.

По мнению авторов геолого-геофизической модели [Берзин, Аккуратова, Керимова, 2000], для Зауральской зоны характерно отсутствие признаков докембрийского фундамента, что подтверждается обширной зоной отрицательных значений Z<sub>a</sub> на карте литосферного аномального магнитного поля (см. рис. 3, *a*).

Магнитные аномалии консолидированной коры над Западно-Сибирской платформой обусловлены дорифейским и послерифейским этапами развития, современным строением и состоянием вещества литосферы. Перед началом формирования в этом регионе сплошного осадочного чехла плита пережила стадию авлакогенов, подобную той, которая предшествовала формированию чехла на древней Восточно-Европейской платформе. Авлакогены шириной до 15 км и длиной до 250 км рассеяны по всей Западной Сибири, простираясь в меридиональном направлении.

По результатам сейсмических исследований большая часть платформы имеет мощность консолидированной коры 30–35 км, а имеющиеся данные о тепловом потоке свидетельствуют о ее существенном разогреве. Таким образом, можно предположить, что интенсивность и характер аномального магнитного поля, полученного для рассматриваемого региона по данным спутника, определяются верхними 10–15 км консолидированной части земной коры.

## Причерноморье

Попытка более детальной интерпретации спутниковых карт литосферного магнитного поля сделана на примере Причерноморской зоны и Черноморской впадины. Карта вертикальной компоненты литосферного магнитного поля для этого региона приведена на рис. 4, *a*.

Основные геотектонические области рассматриваемого региона – южная часть дорифейской Восточно-Европейской платформы и северо-восточная часть Средиземноморского геосинклинального пояса. В строении региона важная роль принадлежит разломам, определяющим конфигурацию основных геоструктурных элементов [Байдов и др., 1974]. Входящий в пределы рассматриваемого региона участок Украинского массива – это пологая моноклиналь, ступенчато погружающаяся в южном направлении. Глубина залегания кристаллического фундамента на юге (у границы со Скифской платформой) изменяется от 1.5–2 км в Азовском море до 3–4 км и более в северо-западном секторе Черного моря.

Считается установленным, что южная граница Восточно-Европейской платформы представляет собой краевой шов, т.е. глубинный разлом, вдоль которого докембрийский фундамент сочленяется непосредственно с палеозойским комплексом.

Резкое изменение характера гравитационного и магнитного полей, а также данные электро- и сейсморазведки КМПВ свидетельствуют о наличии вдоль рассматриваемой границы уступа, по которому фундамент древней платформы резко погружается в сторону Скифской платформы, перекрываясь мощным комплексом палеозойских и раннемезозойских дислоцированных образований (рис. 4,  $\delta$ ). На карте литосферного поля по данным спутника *СНАМР* погружение фундамента древней платформы характеризуется

плавным изменением регионального АМП с севера на юг от 14 до 0 нТл. Южная граница платформы отчетливо прослеживается на карте по переходу к отрицательным значениям поля (см. рис. 4, *a*).



**Рис. 4.** Карта вертикальной компоненты литосферного аномального магнитного поля  $Z_a$  на высоте спутника *СНАМР* для Причерноморской зоны и Черноморской впадины (*a*) и схема тектонического районирования Причерноморской зоны (*б*). *a*: ODS – Одесса, KHRS – Херсон, KRVG – Кировоград, PLTV – Полтава. *б*: структуры центральной области (зоны отсутствия гранитного слоя) – Центрально-Черноморское поднятие (1), антиклинорий Горного Крыма (2), Западно-Черноморская (*3*) и Восточно-Черноморская (*4*) впадины. Серая заливка – периферийная область геоструктур, вовлеченных в опускание Черноморской впадины. Сплошные линии – шовные зоны и основные глубинные разломы, разделяющие главные тектонические области, штриховые – то же, предполагаемое

На схеме тектонического дешифрования космических снимков западной части альпийского Средиземноморского пояса этой границе соответствует Атласско-Азовский трансконтинентальный линеамент.

## Источники литосферного аномального магнитного поля в свете геолого-тектонических представлений

С точки зрения тектоники, европейский континент – сложный регион, для которого достаточно трудно выполнить однозначную геофизическую и геолого-тектоническую интерпретацию наблюдаемых магнитных аномалий. Следует подчеркнуть наличие существенных различий между дорифейскими образованиями, которые являются главным источником магнитных аномалий, и обычно менее магнитными более молодыми, такими как фанерозойская кора. Бо́льшая часть дорифейских областей Земли сосредоточена в девяти дорифейских платформах, лежащих в центрах главных континентальных масс [Goodwin, 1996].

Дорифейские платформы включают в себя как поверхностные щиты, которые называют кратонами, так и захороненные под более поздними отложениями области, так называемые дорифейские основания.

Более молодая (<570 млн. лет) фанерозойская кора включает кайнозойские, мезозойские и палеозойские пояса.

Разным Европейским платформам отвечает разная природа аномальных магнитных полей. Наиболее сложными по составу и дифференцированности являются аномальные поля Восточно-Европейской дорифейской платформы. Например, Московская синеклиза, занимающая бо́льшую часть центра Восточно-Европейской платформы, почти полностью перекрывает 23 малых и больших архейских блока с разделяющими их раннепротерозойскими складчатыми поясами [Goodwin, 1991]. Следовательно, фундамент под Московской синеклизой должен рассматриваться как архейский.

Частичная согласованность наблюденных магнитных карт с картами геологических провинций говорит о том, что источники магнитных аномалий действительно имеют геологическое происхождение и лежат в земной коре. Однако существующие расхождения между предсказываемыми и наблюдаемыми аномалиями в некоторых регионах земного шара вызывают вопросы, для решения которых необходимы дальнейшие исследования, особенно в контексте изучения приповерхностных 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]. Это указывает на то, что существенная часть дорифейской коры на континентах лежит под более молодым фанерозойским покровом.

#### Выводы

Показана эффективность применения для выделения аномального поля из полученных на спутнике геомагнитных данных технологии, использующей среднесуточную сферическую гармоническую модель главного поля, а не усредненную за длительный интервал.

С использованием описанной методики по данным экспериментальных измерений, выполненных спутником *СНАМР* на высоте около 400 км, построены карты вертикальной компоненты  $Z_a$  и проведена оценка аномального литосферного магнитного поля для Европейской платформы, Урала и Западной Сибири.

Магнитные и тектонические сегменты близки между собой по размерам, однако, пространственно они не всегда совпадают. Магнитные сегменты указывают на общие

закономерности распределения различных типов магнитных неоднородностей в структуре земной коры, свидетельствуют о "просвечивании" древних структур. Зоны сочленения магнитных сегментов, по-видимому, являются глубинными и долгоживущими структурами.

Описанные как магнитные сегменты области глубинных магнитных неоднородностей зачастую не представляют собой единых тектонических структур в современной структуре литосферы, не наблюдается прямой корреляционной связи между спутниковыми аномалиями и геологическими структурами. В то же время, их местоположение не противоречит схемам тектонического дешифрирования космических снимков, совпадая с сейсмическими данными и данными о тепловом режиме литосферы.

Следующим шагом исследований могло бы стать моделирование на базе совместного использования данных спутниковых измерений и поверхностных морских и аэромагнитных съемок, что позволило бы значительно улучшить точность представления аномального магнитного поля на поверхности Земли.

#### Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории А.Х. Фрунзе и Н.И. Волковой за помощь в проведении расчетов. Карты магнитного аномального поля построены с использованием программ GMT [*Wessel, Smith*, 1998].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-05-64890).

#### Литература

- Байдов Ф.К., Гаркаленко И.А., Гончаров В.П. и др. О глубинном строении Черноморской впадины и смежных областей Причерноморья // Тектоника и сейсмичность Причерноморья и Черноморской впадины. Кишинев: Штиница, 1974. С.3–50.
- Берзин Р.Г., Аккуратова Л.Л., Керимова И.К. Предварительные результаты анализа геологогеофизических данных по Международному геотраверсу "Уралсейс-95" // Геофизика. 2000. № 6. С.25–29.
- Бурьянов В.Б., Гордиенко В.В., Кулик С.Н. и др. Комплексное геофизическое изучение тектоносферы континентов. Киев: Наук. думка, 1983. 176 с.
- Бурьянов В.Б., Гордиенко В.В., Завгородняя О.В. и др. Геофизическая модель тектоносферы Европы. Киев: Наук. думка, 1987. 184 с.
- 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.

Литосфера Центральной и Восточной Европы. Киев: Наук. думка, 1993. 203 с.

- Пашкевич И.К., Марковский В.С., Орлюк М.И. и др. Магнитная модель литосферы Европы. Киев: Наук. думка, 1990. 168 с.
- *Пашкевич И.К., Печерский Д.М. и др.* Петромагнитная модель литосферы. Киев: Наук. думка, 1994.
- Порохова Л.Н., Абрамова Д.Ю., Порохов Д.А. Модели электропроводности мантии, построенные методом эффективной линеаризации по глобальным наземным и спутниковым данным // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 34, № 5. С.137–146.
- Ротанова Н.М., Харитонов А.Л., Фрунзе А.Х., Филиппов С.В., Абрамова Д.Ю. Аномальные магнитные поля из измерений на спутнике *СНАМР* для территории Курской магнитной аномалии // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 5. С.712–719.
- Achache J., Abtout A., LeMoue J.L. The downward continuation of Magsat crustal anomaly field over Southeast Asia // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P.11584–11596.

- *Arkani-Hamed J.* Thermoremanent magnetization of the oceanic lithosphere inferred from a thermal evolution model: Implications for the source of marine magnetic anomalies // Tectonophysics. 1991. V. 192. P.81–96.
- 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.
- 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.
- Backus G.E. Non-uniqueness of the external geomagnetic field determined by surface intensity measurements // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P.6339–6341.
- *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.
- *Cohen Y., Achache J.* New global vector magnetic anomaly maps derived from Magsat data // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P.10,783–10,800.
- *Frey H*. Magsat scalar anomalies and major tectonic boundaries in Asia // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. P.299–302.
- Goodwin A.M. Precambrian Geology. Elsevier, New York, 1991.
- Goodwin A.M. Principles of Precambrian Geology. Elsevier, New York, 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.
- Langel R.A., Ousley G., Berbert J. The Magsat Mission // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. P.243-245.
- Maus S., Rother M., Holme R., Luhr H., Olsen N., Haak V. First scalar magnetic anomaly map from CHAMP satellite data indicates weak lithospheric field // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29 (14), doi: 10.1029/2001GL013.685 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.
- *Taylor P.T., Frawley J.J.* Magsat anomaly data over the Kursk region, USSR // Phys. Earth Planet. Int. 1987. V. 45. P.5–15.
- *Taylor P.T., Frawley J.J., Kim H.R., Frese R., Kim J.W.* Comparing Magsat, Orsted and *CHAMP* crustal magnetic anomaly data over the Kursk Magnetic Anomaly, Russia // Proc. of the 1st *CHAMP* International Science Team Meeting. Potsdam-Springer, 2002.
- Wessel P., Smith W.H.F. New, improved version of the Generic Mapping Tools Released // EOS, Trans. AGU. 1998. V. 79. 579 p.

#### Сведения об авторах

**АБРАМОВА** Дарья Юрьевна – старший научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, г. Троицк, Московской обл. Тел.: 8-985-782-73-79. E-mail: abramova@izmiran.ru

**ФИЛИППОВ Сергей Витальевич** – заведующий лабораторией спутниковых геомагнитных исследований, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН г. Троицк, Московской обл. Тел.: 8-495-334-01-29. E-mail: sfilip@izmiran.ru

АБРАМОВА Людмила Мамиконовна – ведущий научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, г. Троицк, Московской обл. Тел.: (495)-334-09-06. E-mail: labramova@igemi.troitsk.ru

## THE LONG WAVELENGHT MAGNETIC ANOMALIES OVER THE TERRITORY OF RUSSIA FROM CHAMP SATELLITE MEASUREMENTS

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

 <sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Troitsk, Moscow Region, Russia,
<sup>2</sup> Geoelectromagnetic Research Center of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Troitsk, Moscow Region, Russia

Abstract. Data from the CHAMP satellite have allowed a study of the steady magnetic field caused by sources in the lithosphere. Interpretation of satellite anomalies maps had shown, that large-scale features such as shields, cratons and subduction zones are connected to positive anomalies (as caused by enhanced magnetic susceptibility) while basins and abyssal plains are marked by negative anomalies. Authors of the present work analyze the regional lithospheric anomalies distribution revealed by results of satellite measurements above the East European craton territory and adjoining to it Alpine folded zone. Parameters of the satellite CHAMP orbits enable to receive geomagnetic field date in practically uniform grid above all surface of the Earth every day. It allows constructing daily average spherical harmonious model (DSHM) of the main magnetic field for each separate day. Using specified technologies of experimental data processing maps of the anomaly magnetic field distribution at the satellite altitude have been constructed for territory East European craton, the Black Sea depression and adjacent regions.

Keywords: satellite magnetic observations, lithosphere field, crustal field, magnetization.