

**ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ
(по измерениям спутника CHAMP)**

Д.Ю. Абрамова, Л.М. Абрамова*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,
142190, Московская область, Троицк, Калужское ш., 4, Россия*

** Центр геоэлектродинамических исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
142190, Московская область, Троицк, а/я 30, Россия*

По данным спутника CHAMP выделены магнитные литосферные аномалии модуля полного вектора и вертикальной компоненты магнитного поля Земли для территории Сибири. Описана методика обработки спутниковых данных и способы выделения региональных литосферных магнитных аномалий из измеренных на спутнике значений полного геомагнитного поля, являющегося суммой нескольких источников — внешних и внутренних по отношению к поверхности Земли.

Для нескольких регионов Сибири построены карты литосферных аномалий магнитного поля различных масштабов и в зависимости от способа осреднения поля по площади. Рассмотрена возможная геологическая и физическая природа магнитных литосферных аномалий, их связь с глубокопогруженными структурами земной коры.

Предварительная интерпретация полученных карт литосферного магнитного поля показывает, что аномалии связаны с современными крупномасштабными геологическими и геофизическими элементами фундамента. Особенности литосферного магнитного поля как параметр, отражающий современное положение тектонических структур и их физические свойства, могут быть использованы для их выделения в комплексе с другими геолого-геофизическими методами.

Спутниковые измерения геомагнитного поля, длинноволновые литосферные магнитные аномалии, Сибирский кратон, Центрально-Азиатский складчатый пояс.

**LITHOSPHERIC MAGNETIC ANOMALIES IN THE TERRITORY OF SIBERIA
(from measurements by the CHAMP satellite)**

D.Yu. Abramova and L.M. Abramova

The position of lithospheric magnetic anomalies, detected in total magnetic intensity and the vertical component of the magnetic field, has been determined for Siberia using data from the CHAMP satellite. The paper describes the technique for the satellite data processing and the ways of recognition of regional lithospheric magnetic anomalies from satellite-measured values of the total geomagnetic field, which are obtained from several sources (external and internal with respect to the Earth's surface).

Maps of magnetic-field anomalies of different scales have been constructed for several regions of Siberia depending on the method of areal averaging. The possible geologic and physical nature of the magnetic anomalies and their relationship with deep-seated crustal structures are considered.

Preliminary interpretation of the magnetic-field maps shows that the anomalies are connected with the present-day large geologic and geophysical elements of the basement. The features of the lithospheric magnetic field, as a parameter reflecting the present position of tectonic structures and their physical properties, can be used for their contouring in combination with other geological and geophysical methods.

Satellite magnetic observations, long-wave lithospheric magnetic anomalies, Siberian craton, Central Asian Fold Belt

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 возни-

кает потребность глубинного картирования неоднородностей коры и верхней мантии, связанная с проблемой формирования глубинных прогностических критериев (нефть, газ, твердые полезные ископаемые) и создания нового поколения карт прогноза скрытых месторождений [Щукин, 2005].

В последнее время возрос интерес к изучению крупномасштабных магнитных аномалий протяженностью в сотни километров, которые проявляются при региональных обобщениях данных аэромагнитных съемок. Однако 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.

Проблема связи коровых и мантийных неоднородностей земной коры и верхней мантии с поверхностными структурами является одной из центральных проблем современной геологии. В тектоносфере не существует изолированных друг от друга (региональных или локальных) структурных неоднородностей и аномалий геофизических полей, все они взаимосвязаны и взаимообусловлены динамически взаимодействующими системами глубинных геосфер [Нургалиев, 2008]. Неоднородности литосферы на различных ее глубинных уровнях проявляются разночастотными гравитационными и магнитными аномалиями, поэтому выявление и типизация их природы является актуальной задачей в изучении тектоносферы Земли. Пространственные изменения этих длинноволновых аномалий отражают характеристики магнитных свойств и мощности намагниченных слоев на больших глубинах.

К тому же трудно увязывать между собой данные съемок, проводимых в разное время на ограниченных площадях и на неодинаковых уровнях, принимая во внимание нестационарность геомагнитного поля и его вековой ход.

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 Ørsted (1999—2002 гг.) [Olsen, 2000].

Анализ пространственного распределения магнитного поля показывает [Nemant, Maus, 2005; Nemant et al., 2005], что на спутниковых высотах высокочастотные аномалии сглаживаются, а низкочастотные региональные аномалии с размерами пространственных периодов 300—500 км (примерно эквивалентных высоте полета спутника) и интенсивностью порядка первых десятков нанотесла остаются. Спутниковые наблюдения малочувствительны к мелкомасштабным структурам, и это позволяет выделять региональные литосферные аномалии, не осложненные локальной компонентой. 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 июля 2000 г. возможность анализа параметров геомагнитного поля серьезно расширилась в связи с запуском германского искусственного спутника Земли CHAMP, поставившего высокоточные данные практически в масштабе реального времени. Миссия продолжалась более 10 лет, обеспечивая измерения скалярных и векторных параметров МП. По прошествии пяти лет с момента запуска высота полета спутника снизилась с 460 до 330 км. После двукратных маневров по увеличению высоты его миссия была продлена. Изменение высоты CHAMPa за все время работы спутника иллюстрирует рис. 1, а.

По сравнению с предыдущими спутниками CHAMP имел следующие преимущества: на порядок улучшена точность измерений, возросла длительность съемки, выбрана более удачная конфигурация орбиты. Околополярная круговая орбита CHAMPa с углом наклона 87.3° позволяла проводить измерения в каждой точке пространства в разное локальное время, а более низкая высота полета обеспечивала лучшее разрешение измеряемых параметров. Благодаря такой конфигурации орбиты 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].

На спутнике были установлены два магнитометра: скалярный магнитометр OVM, регистрировавший амплитуды модуля полного вектора геомагнитного поля (T) и феррозондовый магнитометр FGM, измерявший три ортогональных векторных компоненты (X , Y , Z). Точность измерений модуля полного вектора геомагнитного поля составила ± 0.5 нТл, компонент ± 3 нТл [Reigber et al., 2002].

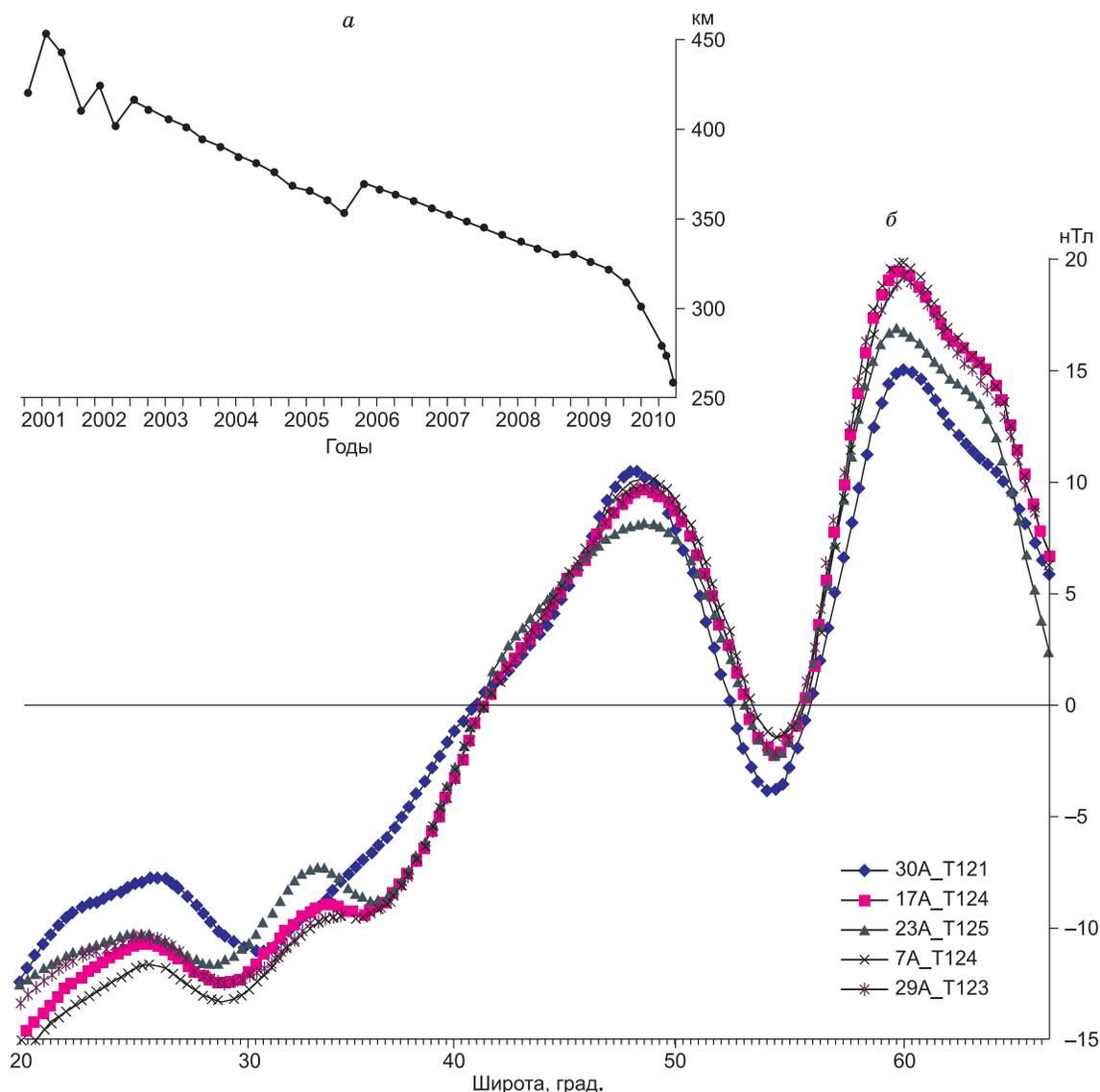


Рис. 1. Пространственная диспозиция спутника CHAMP.

a — изменение высоты полета спутника за весь период работы; *б* — пример изменения модуля полного вектора литосферного магнитного поля (T_{θ}) вдоль витков спутника CHAMP.

Авторы настоящей работы получили положительный опыт исследований литосферного МП с использованием спутниковых геомагнитных данных, измеренных CHAMPом над различными территориями [Абрамова и др., 2009, 2010, 2011, 2012]. Задача настоящей работы — анализ распределения региональных литосферных магнитных аномалий, выявленных по результатам спутниковых измерений над территорией Сибири. Регион представляется интересным в связи с присутствием здесь различных по своей природе крупных геолого-тектонических единиц.

Для решения поставленной задачи необходимо:

- собрать, обобщить и привести к удобной для дальнейшей обработки форме данные геомагнитного поля, измеряемые спутником в околоземном пространстве;
- используя специально разработанные технологии, выделить из огромных массивов данных составляющие, наиболее адекватно характеризующие литосферное МП;
- построить карты распределения аномального МП в рассматриваемом регионе;
- провести интерпретацию выделенных магнитных аномалий, сопоставить полученные результаты с имеющимися для этих регионов геофизическими и геолого-тектоническими данными.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЛИТОСФЕРНЫХ АНОМАЛИЙ

Физическая природа литосферных аномалий. К настоящему времени признается, что главным источником магнитных аномалий любых уровней являются наиболее распространенные на Земле магнитные минералы — магнетиты, титаномагнетиты, гемойльмениты и пирротины — магматические поверхностные и близповерхностные породы, погружившиеся в дальнейшем на большие глубины. Вторым вероятным источником обогащения пород магнитными минералами являются флюиды, богатые железом [Печерский, Геншафт, 2001].

Аномальное магнитное поле континентальной литосферы характеризуется большим разнообразием. Источники аномалий сконцентрированы в некотором объеме литосферы, называемом магнитоактивным слоем. Верхняя граница этого слоя может совпадать с земной поверхностью или находиться в закрытых и складчатых районах на глубинах более 10 км [Arkani-Hamed, Strangway, 1986; Tanaka et al., 1999]. Вопрос о том, находится ли магнитоактивный 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) подтверждалась геотермическими расчетами: изотерма Кюри магнетита оказывалась в ряде случаев на глубинах до 100 км [Artemieva, Mooney, 2001]. Однако детальный анализ магнитного поля ряда регионов Европы показал, что вклад мантийной составляющей в региональные аномалии при правильном подборе значений намагниченности мантийных пород достаточно незначителен.

Попытки физико-геологической интерпретации спутниковых аномалий приводят к выводу об их связи с несколькими равновероятными источниками. По мнению большинства авторов [Arkani-Hamed, Strangway, 1986; Пашкевич, Печерский, 1994], 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. Наибольшую роль здесь играет степень намагниченности именно нижней части земной коры, значительная интенсивность и изменчивость которой в настоящее время не вызывает сомнений [Пашкевич, Печерский, 1994]. По всей видимости, источником большинства выявленных аномалий является совместное действие обоих вышеназванных факторов.

Причинами образования аномалий могут быть латеральные изменения температуры однородного слоя литосферы и, соответственно, изменение глубины до изотермической поверхности Кюри магнетита. 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. Кроме того, в молодых тектонических провинциях, даже при благоприятном температурном режиме, земная кора в целом обладает слабой намагниченностью, что принято связывать с ее более кислым составом.

ИСТОЧНИКИ ЛИТОСФЕРНОГО АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СВЕТЕ ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Хорошо известно, что имеются существенные различия между дорифейскими 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, так и захороненные под более поздними отложениями области, называемые дорифейскими основаниями. Большая часть дорифейских областей земной коры сосредоточена в девяти дорифейских платформах, лежащих в центрах главных континентальных масс [Goodwin, 1996]. В их число входит Сибирский кратон.

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, 1996].

Частичная согласованность наблюдаемых магнитных карт с картами геологических провинций показывает, что источники магнитных аномалий действительно являются по происхождению геологическими и лежат в коре Земли. Однако несоответствия между предсказанными и наблюдаемыми аномалиями в некоторых регионах земного шара вызывают вопросы, для решения которых необходимы дальнейшие исследования, особенно в контексте изучения подповерхностных дорифейских областей, состава более глубоких частей коры и мощности коры в регионах [Nemant, Maus, 2005].

Магнитные аномалии и тектонические структуры не всегда совпадают пространственно. Аномалии скорее указывают на закономерности распределения различных типов магнитных неоднородностей в земной коре, свидетельствуют о «просвечивании» древних структур. Зоны сочленения магнитных об-

ластей, по-видимому, являются отражением глубинных и долгоживущих разломов, на которых развивались авлакогены и депрессии. Аномальное магнитное поле, полученное по спутниковым данным, можно рассматривать лишь как некоторую региональную характеристику крупных тектонических единиц.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Спутниковые данные представляют собой огромные массивы информации.

Для решения задачи, поставленной в настоящей работе, были выбраны измерения компонент геомагнитного поля вдоль порядка 200 витков орбиты спутника, полученные в 2008 г., когда высота полета CHAMPa была минимальной, 310—320 км.

Методика выделения региональных литосферных магнитных аномалий, выявленных по результатам спутниковых измерений над различными территориями, состоит в следующем:

- сбор, обобщение и приведение к удобной для дальнейшей обработки форме измеренных данных;
- выделение из полученных огромных массивов данных составляющих, наиболее адекватно характеризующих литосферное МП, используя специально разработанные технологии;
- построение карт распределения компонент аномального МП.

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;
- внешних полей, произведенных магнитосферно-ионосферными токовыми системами;
- аномального поля, связанного с намагниченностью горных пород, слагающих земную литосферу;
- индукционных полей, обусловленных токами в проводящих слоях земной коры и верхней мантии Земли.

Литосферное магнитное поле остается после последовательного исключения из измеренных значений всех «лишних» составляющих, что, таким образом, ставит надежность его выделения в зависимость от методик, выбранных для описания удаляемых частей. Такой, так называемый физический подход к выделению «литосферных» данных стал практически классическим. Он был усовершенствован авторами в части вычитания из суммарного поля главного магнитного поля, обычно представляемого международной аналитической моделью (IGRF).

В основе IGRF лежит сферический гармонический анализ (СГА) 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 (спутниковыми, аэромагнитными, морских съемок). Для получения более точной модели главного поля проводят тщательную селекцию исходных данных, чтобы избавиться от полей внешних источников. При этом значительная часть данных теряется и преимущество (например, спутниковых измерений: их однородность в пространстве и во времени) рукотворно нарушается. Проводимая селекция вызывает определенные проблемы, состоящие в том, что количество отброшенных данных для разных дней различное, и их положение в пространстве также оказывается весьма неравномерным. В результате строятся несколько моделей-кандидатов, из которых на каждые 5 лет отбирается лучшая, которая должна с минимальной средней погрешностью описывать главное магнитное поле в каждой точке всего земного шара.

Заданные специальным образом параметры орбиты германского спутника CHAMP дают возможность получать измерения геомагнитного поля ежесуточно в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли. 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 конкретного дня, а не усредненные за длительный (годовой) интервал времени, как это делается обычно [Головков и др., 2007]. Коэффициенты ССГМ используются нами в специально созданной программе для решения задачи удаления главного поля из экспериментальных значений.

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

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

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 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. В работе [Головков и др., 2007] показано, что модели имеют одинаковый порядок точности, преимуществом является простота и полное отсутствие субъективизма, неизбежного при селекции данных. Здесь речь идет о чисто техническом преимуществе использования в данном конкретном случае среднесуточных сферических гармонических моделей поля.

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

Геомагнитные данные отобраны только для витков, совершаемых спутником в ночное время (LT от 22.00 до 6.00 ч) и только в спокойные в магнитном отношении ($k_p \leq 1$ и $D_{st} \leq 20$) дни.

На рисунке 1, б, показан пример изменения магнитного литосферного поля, выделенного из общих измеренных данных, вдоль широты. Представлены несколько витков за время пролета спутника над Алдано-Саянской областью и Амурской плитой. Параметр каждой кривой — индекс витка, компонента (здесь T_a) и округленное (для простоты восприятия рисунка) значение долготы орбиты спутника.

С помощью специально разработанной программы выделения геомагнитных полей из общего объема записей спутника CHAMP для региона Сибири создана база экспериментальных данных модуля полного вектора и компонент аномального литосферного магнитного поля.

Итак, в пределах рассматриваемой территории были выделены и обработаны спутниковые витки, равномерно покрывающие сектор от 75° до 140° в.д. и 40 — 65° с.ш. Количество измерений магнитного поля, включенных в базу данных для построения карт, составило порядка 10 тыс.

С использованием программы GMT [Wessel, Smith, 2007] по данным спутника CHAMP построены карты пространственного распределения модуля (T_a) и вертикальной компоненты (Z_a) аномального литосферного магнитного поля на высоте полета спутника порядка 300 км для территории Сибири.

Чтобы повысить надежность построений и исследовать воспроизводимость полученных результатов, поле было рассчитано по нескольким независимым наборам спутниковых данных. Сравнение построенных вариантов карт показало, что пространственная структура поля воспроизводится достаточно надежно.

Поскольку при анализе данных измерений вертикальной компоненты и модуля полного вектора литосферного магнитного поля карты рассматриваемых территорий оказываются достаточно близкими (на этих широтах основной вклад в полный вектор дает вертикальная компонента), в качестве иллюстрации будут использоваться карты Z_a . В зависимости от размеров изучаемых территорий карты строились для различных масштабов и различных методов осреднения поля по площади.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Карта масштаба 1:25 000 000 аномального литосферного магнитного поля вертикальной компоненты Z_a обширной территории Сибири практически от побережья Арктики до ее южного горного обрамления, Монголии и севера Китая представлена на рис. 2. Используются данные за 6 мес. 2008 г., в это время высота полета менялась от 310 до 330 км. Представленное спутниковое поле имеет гладкую структуру, обусловленную медианным осреднением результатов более чем 10 тыс. измерений по ячейкам 2×2 градуса.

Как видно из рисунков, карта литосферных магнитных аномалий областей Сибири демонстрирует мозаичную структуру чередующихся крупных областей положительных и отрицательных аномалий.

Ниже будет рассмотрено положение отдельных аномалий и их связь с зонно-блоковым строением Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Северная часть региона включает в себя мезозойскую Западно-Сибирскую плиту и докембрийскую Сибирскую платформу вместе с обрамляющими ее миогеоклинальными складчатыми сооружениями.

Южная часть территории, часто называемая Центрально-Азиатским складчатым поясом [Хаин, 2001], простирается до Тихоокеанского пояса, между Сибирью и Таримом — Сино-Кореей.

Поскольку спутниковые магнитные аномалии Западно-Сибирской платформы подробно обсуждены в работе [Абрамова и др., 2010], здесь мы их не рассматриваем.

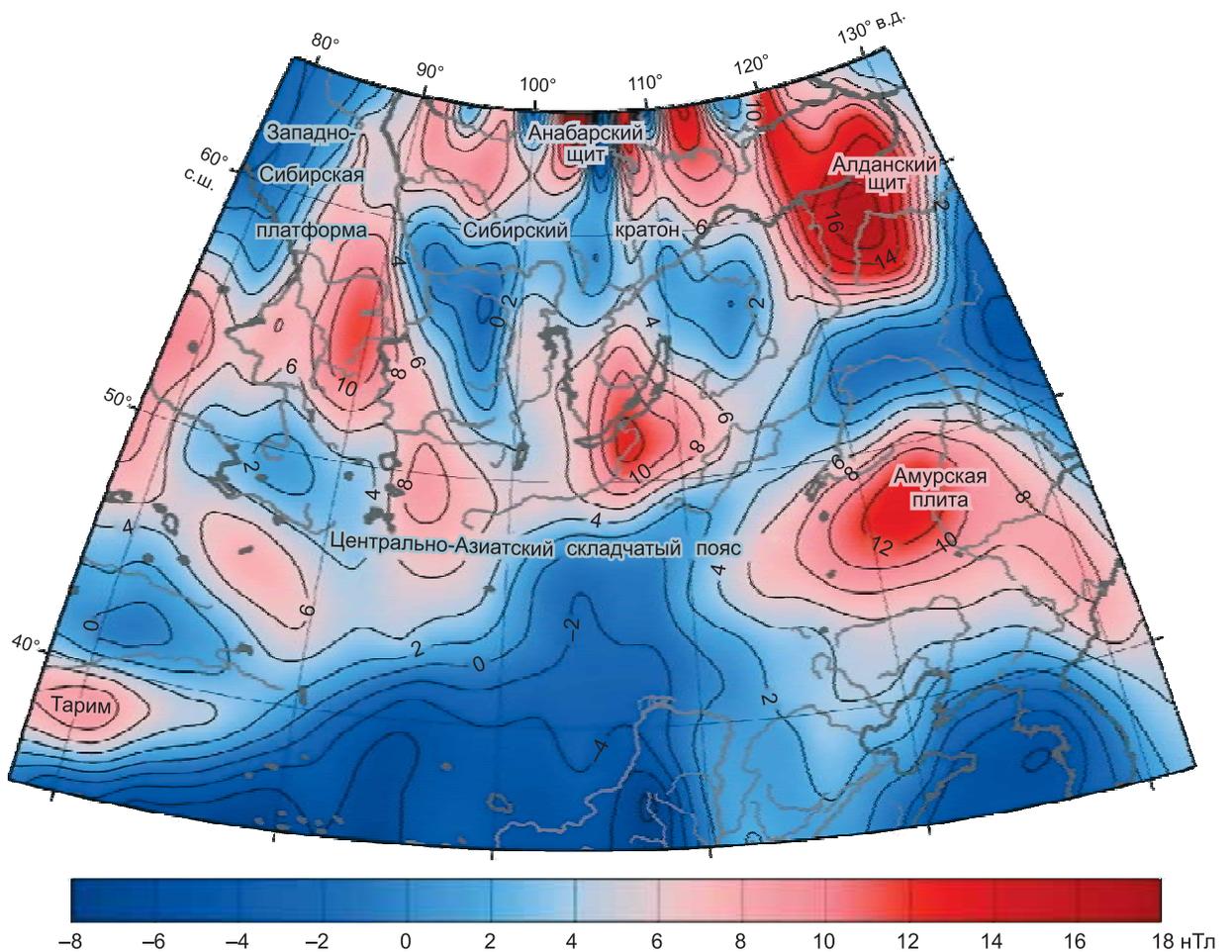


Рис. 2. Карта вертикальной компоненты (Z_a) аномального литосферного магнитного поля на высоте спутника CHAMP порядка 300 км для Сибирского региона.

Сибирский кратон. На рис. 3 приведена более мелкомасштабная карта вертикальной компоненты аномального литосферного поля Сибирского кратона Z_a на высоте 300 км полета спутника CHAMP. Масштаб карты 1:15 000 000, данные спутника использованы с меньшим медианным осреднением 1×1 градус. Расчлененность магнитного поля здесь выражена более существенно.

Географическое распределение аномального литосферного поля на территории кратона, как видно из рис. 3, носит мозаичный характер.

Сибирский кратон занимает значительную часть Северо-Восточной Азии и характеризуется мощной корой континентального типа. На настоящее время считается, что современная интегральная структура Сибирского кратона представляет собой систему блоков, разделенных долгоживущими и ортогонально ориентированными в пространстве линейными элементами.

По мнению авторов [Розен, 2003; Розен и др., 2005, 2007], консолидированная кора Сибирского кратона представляет собой палеопротерозойскую мозаику разновозрастных архейских гранулит-гнейсовых и гранит-зеленокаменных террейнов, залегающую в основании Восточно-Сибирской платформы, включающей также и рифей-фанерозойский чехол. Прежде чем объединиться в структуру кратона, террейны, по-видимому, группировались в крупные геологические тела (тектонические провинции или супертеррейны), столкновение и слипание которых привело позднее к возникновению кратона [Розен и др., 2005].

Сибирский кратон большей частью перекрыт отложениями чехла мощностью 1—8 км, в среднем — около 4 км. В связи с этим картирование кристаллического фундамента базируется исключительно на геофизических данных и данных по глубоким скважинам.

В северной части Сибирского кратона в области 58° — 68° с.ш. и 85° — 118° в.д. наблюдается цепочка изометричных амeboобразных положительных аномалий с амплитудами от 8 до 18 нТл, разделенных

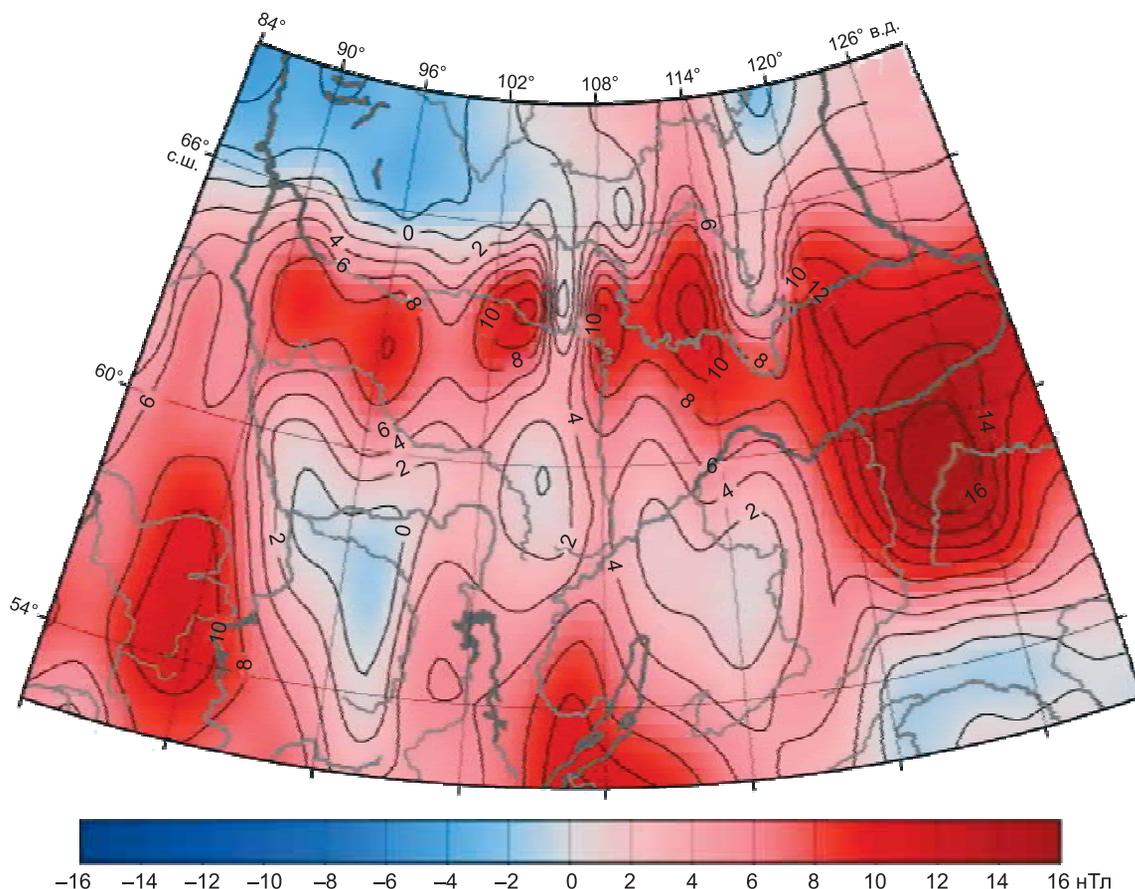


Рис. 3. Карта вертикальной компоненты (Z_a) литосферного аномального магнитного поля на высоте спутника CHAMP над территорией Сибирского кратона.

узкими зонами пониженных значений поля. Это, по-видимому, вполне отвечает идее о существовании на этой территории мозаики разновозрастных архейских гранулит-гнейсовых и гранит-зеленокаменных террейнов [Розен и др., 2005].

В области этих блоков фиксируются пониженные значения теплового потока [Pollack, 1982; Дучков и др., 1987; Dorofeeva et al., 1995].

В восточной части кратона в верхах Ленского бассейна ярко выражена крупная положительная магнитная аномалия с центром 125° в.д. и 60° с.ш. с амплитудой более 18 нТл, географически приуроченная к Алдано-Становой области.

В разрезе земной коры, по материалам ГСЗ восточного фрагмента профиля Березово—Усть-Мая, пересекающего Алдано-Становую область, наблюдается подъем кровли кристаллического фундамента (Якутское поднятие) и сопутствующее ему опускание границы Мохо (утолщение кристаллической коры) [Павленкова, Солодилов, 1997; Egorkin, 1998; Стогний, Стогний, 2009]. В этой области зарегистрирована низкая поверхностная плотность теплового потока от 20 до 40 мВт/м² [Lysak, 1984; Дучков и др., 1987].

Аномальное магнитное поле южнее параллели 60° характеризуется пониженными по сравнению с северной частью значениями. Здесь наблюдается распадающаяся на отдельные зоны полоса слабоаномального магнитного поля. Область пониженных значений аномального магнитного поля в зоне, ограниченной примерно 55°—60° с.ш. и 92°—115° в.д. разделяется на две локальные зоны и достаточно хорошо согласуется с участком пониженных скоростей сейсмических волн [Бушенкова и др., 2003]. Это, вероятно, является результатом прогресса литосферы стационарной тепловой мантийной аномалией. Разогрев литосферы этой области выражен резким повышением значений теплового потока до 55 мВт/м² [Dorofeeva et al., 1995], что, в свою очередь, вызывает поднятие изотермической поверхности Кюри магнетита и приводит к уменьшению мощности магнитоактивного слоя.

Горное обрамление Сибири: Алтай, Саяны и смежные регионы Монголии и Китая. Область Центрально-Азиатского складчатого пояса имеет чрезвычайно сложную структуру литосферы, состав-

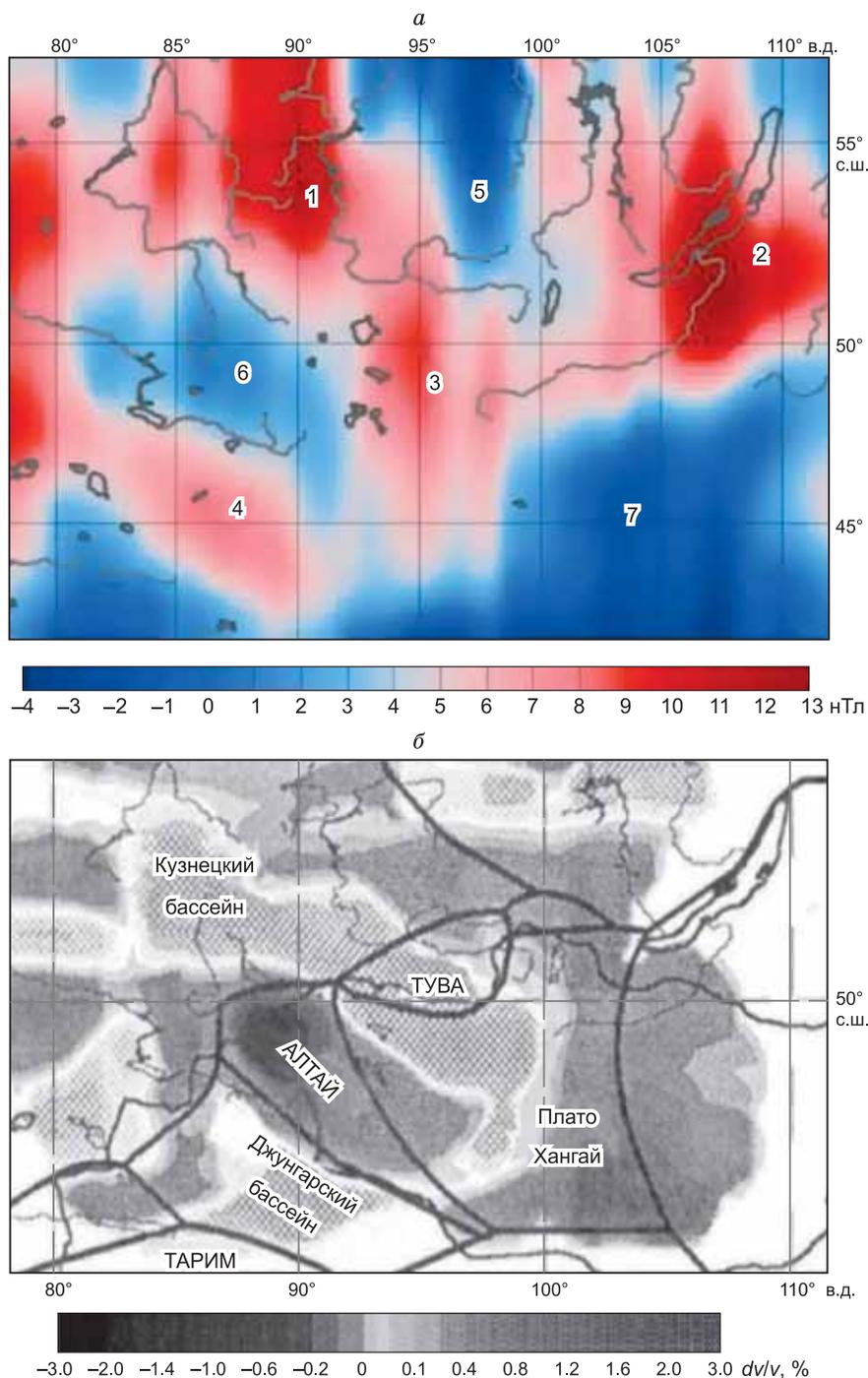


Рис. 4. Особенности распределения геофизических аномалий над частью территории Центрально-Азиатского складчатого пояса.

a — литосферные магнитные аномалии вертикальной компоненты (Z_a) литосферного аномального магнитного поля на высоте спутника CHAMP над частью территории Центрально-Азиатского складчатого пояса; 1—7 — пояснения см. в тексте. *б* — аномалии скорости продольных волн (dv/v) для этой же территории [Бушенкова и др., 2003].

ленную группами складчатых поясов и террейнов и ряда кристаллических массивов (микроконтинентов) с докембрийским фундаментом [Диденко и др., 2010; Добрецов и др., 2013]. Формирование региона связано, вероятно, с закрытием Палеозойского океана в середине мезозоя путем приращения субдукционно-аккреционных комплексов к границам докембрийского континентального блока Хангай [Диденко и др., 1994]. Тектоническая активность здесь проявляется до сих пор, а ее природа приписывается межплитному взаимодействию и(или) мантийным процессам.

Для этой тектонически-активной области Центрально-Азиатского складчатого пояса одной из актуальных, интенсивно обсуждающихся в настоящее время проблем, является определение границ жестких блоков (микроплит) и окружающих их зон пластических деформаций [Эпов и др., 2012].

Как указывалось выше, для этой территории имеются данные сейсмотомографических исследований, проведенных методом томографической инверсии. Метод основан на использовании отраженных от земной поверхности *PP*- или *SS*-лучей и соответствующих им рефрагированных *P*- или *S*-лучей в изучаемом регионе [Бушенкова и др., 2003].

На рис. 4 приведено распределение литосферного магнитного поля для части Центрально-Азиатского складчатого пояса (*a*) и взятые из работы [Бушенкова и др., 2003] сейсмические образы неоднородностей недр для этой же территории (*b*), которые качественно могут быть соотнесены с положением магнитных литосферных аномалий. На рис. 4, *a* видны четыре наиболее выраженные области положительных значений аномального поля (обозначены цифрами 1—4) и три отрицательных (цифры 5—7).

Рис. 4, *a*, равно как и южная часть карты магнитных аномалий рис. 2, относящаяся к Центрально-Азиатскому складчатому поясу, демонстрируют мозаичную структуру чередующихся крупных областей положительных и отрицательных аномалий.

Следует отметить, что общая вытянутость и чередование положительных и отрицательных магнитных аномалий в северо-западном направлении, хорошо видные на картах в полосе долгот от 78° до 100° в.д., соответствуют ориентации принципиальных структур литосферы региона.

Ориентация литосферных магнитных аномалий подобна положениям неоднородностей скоростей, полученных методом томографической инверсии, что иллюстрирует рис. 4. Две области пониженных значений литосферного МП приурочены к районам Алтая (6) и к восточной половине плато Хангай (7). В качестве возможных причин пониженных значений магнитного поля, а также отрицательной аномалии скоростей сейсмических волн обсуждаются разогрев недр современными мантийными процессами и изначальная пластичность литосферы, приобретенная в процессе образования континентальной литосферы области [Dobretsov et al., 1996].

Наличие повышенных значений теплового потока на плато Хангай [Лысак, 2009] и топографии в виде характерного сводового поднятия говорит о том, что под литосферой плато может существовать современный мантийный плюм [Windley, Allen, 1993; Добрецов, 2005]. В то же время в западной части плато Хангай наблюдаются положительные значения магнитного поля, граница между этими частями пролегает примерно по меридиану 100° в.д. Аналогично и поведение аномалий скоростей сейсмических волн [Бушенкова и др., 2003]. Повышенные значения магнитного поля и скоростей могут отражать характеристики вещества литосферы плато, представляющего собой древний деплетированный докембрийский материал [Zogin et al., 1990]. Положительные аномалии магнитного поля обнаруживаются в районах некоторых осадочных бассейнов, таких как Кузнецкий (1) и Джунгарский (4).

ВЫВОДЫ

Построенные карты и анализ регионального аномального магнитного поля по данным спутника СНАМР на территории Сибири показывают их согласованность с геологическими представлениями о зонно-блоковой структуре строения коры этой территории, свидетельствуют о том, что источники магнитных аномалий действительно имеют геолого-геофизическое происхождение и лежат в земной коре. Кроме того, их местоположение не противоречит геолого-тектоническим данным, измерениям теплового поля и поля скоростей сейсмических волн.

Работа показывает перспективность использования спутниковых наблюдений геомагнитного поля для изучения региональной тектоники, глубинного картирования неоднородностей коры и верхней мантии и создания нового поколения карт прогноза скрытых месторождений в комплексе с другими геофизическими методами.

Одной из целей использования спутниковых данных может стать поиск возможного распространения дорифейских областей под фанерозойским покровом и пересмотр скрытых границ этих областей. В условиях, когда территория исследуемого региона перекрыта осадочными отложениями различного состава и возраста, просматривается определенная перспектива использования таких данных при изучении особенностей древних тектонических процессов платформенной консолидации и современной активизации платформ. Литосферное магнитное поле как параметр, отражающий современное положение тектонических структур и их физических свойств, может быть использовано для их описания в комплексе с другими геолого-геофизическими методами.

Авторы выражают благодарность рецензентам статьи за ценные замечания и доброжелательное отношение.

ЛИТЕРАТУРА

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.

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. 1—11.

Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Куликов В.А., Лозовский И.Н., Рабочая группа KIROVOGRAD. Корреляция аномалий постоянного магнитного поля и коровых геоэлектрических структур на западном склоне Воронежского массива // Геофизический журнал, 2012, т. 34, № 4, с. 62—69.

Абрамова Л.М., Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В. Исследования литосферного спутникового поля Западной Сибири // Геофизика, 2010, № 6, с. 45—54.

Бушенкова Н.А., Тычков С.А., Кулаков И.Ю. Исследование структуры верхней мантии Центральной Сибири и прилегающих районов на *PP-P*-волнах // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (5), с. 474—490.

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.

Диденко А.Н., Моссаковский А.А., Печерский Д.М., Руженцев С.В., Самыгин С.Г., Хераскова Т.Н. Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (7—8), с. 59—75.

Диденко А.Н., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф., Шевченко Б.Ф. Структура литосферы и мезозойская геодинамика востока Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (5), с. 629—647.

Добрецов Н.Л. Крупнейшие магматические провинции Азии (250 млн лет): сибирские и эмейшаньские траппы (платобазальты) и ассоциирующие гранитоиды // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (9), с. 870—890.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (4), с. 469—499.

Дучков А.Д., Лысак С.В., Балобаев В.Т. Тепловое поле недр Сибири. Новосибирск, Наука, 1987, 197 с.

Лысак С.В. Термальная эволюция, геодинамика и современная геотермальная активность литосферы Китая // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (9), с. 1058—1071.

Нургалиев Д.К., Равилова Н.Н., Щукин Ю.К. Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов // Геофизический вестник, 2008, № 3, с. 5—10.

Павленкова Г.А., Солодилов Л.Н. Блоковая структура верхов мантии Сибирской платформы // Физика Земли, 1997, № 3, с. 11—20.

Пашкевич И.К., Печерский Д.М. Петромагнитная модель литосферы. Киев, Наук. думка, 1994.

Пашкевич И.К., Марковский В.С., Орлюк М.И. Магнитная модель литосферы Европы. Киев, Наук. думка, 1990, 168 с.

Печерский Д.М., Геншафт Ю.С. Петромагнетизм континентальной литосферы и природа региональных магнитных аномалий: обзор // Российский журнал наук о Земле, 2001, т. 3, № 2, <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v03/rje01059/rje01059.htm>

Розен О.М. Сибирский кратон: тектоническое районирование, этапы эволюции // Геотектоника, 2003, № 3, с. 1—19.

Розен О.М., Манаков А.В., Серенко В.П. Палеопротерозойская коллизионная система и алмазносный литосферный киль Якутской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (12), с. 1259—1272.

Розен О.М., Левский Л.К., Журавлев Д.З., Специус З.В., Ротман А.Я., Зинчук Н.Н., Манаков А.В. Анабарская коллизионная система: 600 млн лет сжатия в составе суперконтинента Колумбия (2.0—1.3 млрд лет) // ДАН, 2007, т. 417, № 6, с. 1—4.

Стогний Г.А., Стогний В.В. Региональные неоднородности литосферы Северо-Азиатского кратона // Геофизика, 2009, № 6, с. 59—65.

Щукин Ю.К. Проблемы глубинной геологии в региональных геофизических исследованиях // Вторая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли. М., МАКС ПРЕСС, 2005, с. 21—30.

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М., Научный мир, 2001, 606 с.

Эпов М.И., Поспеева Е.В., Витте Л.В. Особенности состава и строения земной коры краевой части Сибирского кратона (в зоне влияния рифтогенных процессов) по данным магнитотеллурических зондирований // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 380—398.

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.

Artemieva I.M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: a global study // J. Geophys. Res., 2001, v. 106, p. 16,387—16,414.

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.

Dorofeeva R.P., Lysak S.V., Duchkov A.D. Terrestrial heat flow in Siberia and Mongolia // Terrestrial heat flow and geothermal energy in Asia / Eds. M.L. Gupta, M. Yamano. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 1995, p. 251—279.

Egorkin A.V. Velocity structure, composition and discrimination of crustal provinces in the former Soviet Union // Tectonophysics, 1998, v. 289, p. 395—404.

Goodwin A.M. Principles of Precambrian geology. New York, Elsevier, 1996, 327 p.

Hemant K., Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophys. Res., 2005, v. 110, p. 1—23.

Hemant K., Maus S., Haak V. Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit, 2005, p. 249—254.

Langel R.A., Ousley G., Berbert J. The Magsat mission // Geophys. Res. Lett., 1982, v. 9, p. 243—245.

Lysak S.V. Terrestrial heat flow in the south of East Siberia // Tectonophysics, 1984, v. 103, p. 205—215.

Olsen N. Orsted initial field model // Geophys. Res. Lett., 2000, v. 27, p. 3607—3610.

Pollack J. The heat flow from the continents // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett., 1982, v. 10, p. 459—481.

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. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // Tectonophysics, 1999, v. 306, p. 461—470.

Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2., 2007, <http://gmt.soest.hawaii.edu>.

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.

Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.K., Kozhevnikov V.M. Structure of the lithosphere in the Mongolia-Siberian mountains province // J. Geodynam., 1990, v. 11, p. 327—342.

*Рекомендована к печати 10 июля 2013 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
19 февраля 2013 г.*