

УДК 550.34.09

## МОРФОЛОГИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И ОКРУЖАЮЩИХ ЕЁ ТЕРРИТОРИЙ

© 2018 г. Д.Ю. Абрамова<sup>1</sup>, Л.М. Абрамова<sup>2</sup>, Ив.М. Варенцов<sup>2</sup>, С.В. Филиппов<sup>1</sup>

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

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

В регионе Байкальской рифтовой зоны и окружающих ее территорий рассмотрено распределение аномального магнитного поля на двух высотах наблюдения – 290 и 4 км. С помощью специально разработанной оригинальной технологии выделения аномальных частей поля из общего объема записей спутника *CHAMP* создана база экспериментальных данных модуля полного вектора и компонент литосферного магнитного поля на спутниковых высотах.

Для анализа поведения аномального поля на высоте 4 км над геоидом использована версия *EMAG2* мировой базы данных, скомпилированная из материалов наземных, спутниковых, морских и аэромагнитных наблюдений. Построены карты аномального поля разного масштаба и степени осреднения; рассмотрено положение отдельных аномалий и проанализирована их связь с геолого-тектоническими и геофизическими особенностями строения территорий Байкальской рифтовой зоны и Монголии. Отмечается хорошая согласованность аномального магнитного поля литосферы с данными сейсмической томографии.

**Ключевые слова:** геомагнитные региональные аномалии, спутниковые измерения, база данных *EMAG2*, Байкальская рифтовая зона, астеносферный выступ, плюмы.

### Введение

Изучение так называемых литосферных магнитных аномалий, протяженность которых составляет сотни километров, с применением спутниковых измерений в последние десятилетия вызывает большой интерес [*Hemant, Maus, Haak, 2005*]. Преимуществом исследований такого рода является возможность использования огромных массивов данных модуля полного вектора и компонент магнитного поля над труднодоступными территориями Земли. К сожалению, получить региональную карту, отображающую поля глубинных источников, используя экспериментальный материал наземных и аэромагнитных съемок, сложно. Принимая во внимание нестационарность геомагнитного поля и присущий ему вековой ход, бывает трудно увязать данные съемок, выполненных на ограниченных площадях, на разных уровнях и в разное время.

Применение непосредственно измеренных параметров аномального магнитного поля для изучения аномалий, связанных с глубоко залегающими слоями литосферы в конкретных регионах, несомненно, предпочтительнее использования его модельных отражений (например, Международной литосферной магнитной модели *NGDC-720*). Данными моделей удобно пользоваться для расчетов геофизических параметров, но зачастую они недостаточно адекватно отражают картину аномального поля литосферы. Материалы, получаемые при непосредственных измерениях в конкретных регионах, характеризуют реальное аномальное магнитное поле и позволяют корректировать имеющиеся модели.

В последние годы запуск низколетающих спутников, оснащенных специальной аппаратурой, которая предоставляет информацию о параметрах геомагнитного поля Земли, обеспечил возможность изучения подобных аномалий по экспериментальным данным. Авторы настоящей работы для анализа литосферных магнитных аномалий в разных регионах использовали материалы, полученные при измерениях компонент и модуля магнитного поля на спутнике *CHAMP* [Абрамова и др., 2011, 2015; Филиппов и др., 2017]. В разные годы высота полета спутника лежала в интервале 480–250 км над поверхностью геоида, что позволяет использовать градиентные данные для исследования затухания поля магнитных аномалий.

В настоящее время в мире существует значительное количество открытых баз геолого-геофизических данных. Наиболее полным источником информации о глобальном распределении аномального магнитного поля Земли сегодня является созданная коллективом авторов база данных *EMAG2 WDMAM* [Maus et al., 2009], которая скомпилирована из материалов наземных, спутниковых, морских и аэромагнитных наблюдений по всему земному шару. Разрешение сетки составляет 2 угловые минуты, высота полета над геоидом – 4 км. В настоящей работе данные базы *EMAG2* были использованы для изучения аномалий магнитного поля Байкальской рифтовой зоны и прилегающих к ней территорий.

Задача работы – анализ распределения параметров региональных магнитных аномалий над территорией Байкальской рифтовой зоны и Монголии с привлечением наземных измерений, выполненных с использованием спутника *CHAMP*, и данных базы *EMAG2*, а также установление их связей с другими геофизическими полями.

### **Связь длинноволновых магнитных аномалий с физическими свойствами и геологическим строением литосферы**

Источники аномалий магнитного поля континентальной литосферы сконцентрированы в так называемом магнитоактивном слое, который по современным представлениям снизу ограничен разделом Мохоровичича либо изотермической поверхностью Кюри магнетита [Tanaka, Okubo, Matsubayashi, 1999]. Вопрос о проникновении магнитоактивного слоя в верхнюю мантию до сих пор остается открытым. Литосферные магнитные аномалии могут быть вызваны как изменением средней эффективной намагниченности блоков крупных участков литосферы, так и изменением мощности ее магнитоактивного слоя. При этом наибольшую роль играет степень намагниченности именно нижней части земной коры.

В пределах древних платформ наблюдается низкий фон теплового потока. Это в сочетании с большой мощностью коры и глубоким положением изотермической поверхности Кюри магнетита приводит к тому, что магнитоактивный слой древних платформ значительно мощнее, чем в молодых регионах. Магнитные аномалии позволяют обнаруживать закономерности распределения магнитных неоднородностей в глубинной структуре земной коры, как бы “просвечивая” древние платформы [Hemant, Maus, 2005].

Как показано в [Hemant, Maus, 2005; Hemant, Maus, Haak, 2005], в некоторых регионах земного шара отмечается значительное несоответствие величин магнитного поля, рассчитанных для глобальной геологической модели, магнитным аномалиям, наблюдаемым на спутнике *CHAMP*. Это обстоятельство вызывает вопросы, для решения которых необходимы серьезные исследования, особенно в контексте изучения подповерхностных дорифейских областей и их мощности.

### Методика обработки спутниковых данных

Измеренное на спутнике геомагнитное поле представляет собой сумму вкладов нескольких источников, являющихся внешними и внутренними по отношению к поверхности Земли. Методика выделения региональных литосферных магнитных аномалий с использованием спутниковых наблюдений включает следующие шаги:

1) подбор экспериментальных данных, относящихся к изучаемой территории, их обобщение и приведение к удобной для дальнейшей обработки форме;

2) выделение из полученных массивов данных с использованием специально разработанных технологий составляющей, наиболее адекватно характеризующей именно литосферное аномальное магнитное поле;

3) построение карт пространственного распределения компонент аномального магнитного поля над заданной территорией.

Поскольку геомагнитное поле на спутниковых высотах представляет собой сложную функцию пространства и времени, то основная проблема при проведении его анализа состоит в корректном разделении измеренного суммарного магнитного поля на составляющие, связанные с разными физическими источниками. Измеряемое на спутнике поле является суперпозицией следующих составляющих: главного геомагнитного поля, генерируемого источниками магнитогидродинамической природы, расположенными в жидкой части земного ядра; поля магнитных аномалий, связанного с намагниченностью горных пород, слагающих земную литосферу; внешних полей, источниками которых служат магнитосферно-ионосферные токовые системы; индуцированных полей, обусловленных токами, возникающими в проводящих слоях земной коры и верхней мантии планеты.

Таким образом, для выделения части, связанной с полем литосферных магнитных аномалий, необходимо исключить из измеренных значений все остальные составляющие, по возможности максимально адекватно описывая их с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей. Этот подход к выделению литосферных данных, называемый “физическим” и ставший практически классическим, был усовершенствован авторами в части удаления из суммарного поля составляющей главного магнитного поля. Общепринятым для решения такого рода задач является представление главного магнитного поля Международной аналитической моделью *IGRF*, в основе которой лежит сферический гармонический анализ среднегодовых значений геомагнитного поля. В этом случае для построения точной пространственной модели поля принципиальное значение имеет равномерное заполнение данными узлов расчетной сетки. Однако базовым массивом экспериментальных данных для построения моделей *IGRF* остаются наблюдения мировой сети магнитных обсерваторий, которые распределены по поверхности Земли крайне неравномерно. В связи с последним в тех областях, где обсерватории отсутствуют, сетка заполняется дополнительными экспериментальными данными спутниковых, аэромагнитных и морских съемок, имеющих разную точность измерений.

Для получения более точной модели главного поля проводят тщательную селекцию используемых экспериментальных данных, что приводит к потере их значительной части. Таким образом, можно говорить, что первоначальное, относительно равномерное распределение данных в пространстве и времени рукотворно нарушается. В результате, предлагается несколько моделей-кандидатов, из которых для каждого 5 лет выбирается лучшая, описывающая главное магнитное поле Земли с минимальной среднеквадратической погрешностью.

Заданные специальным образом параметры орбиты спутника *CHAMP* позволяют выполнять измерения геомагнитного поля ежесуточно с секундным разрешением в узлах практически равномерной сетки над всей поверхностью Земли. Это дает возможность с помощью разложения полученных в течение суток компонент поля по сферическим гармоникам до степени и порядка  $n=m=14$  построить среднесуточную сферическую гармоническую модель главного магнитного поля для каждого конкретного дня, а не усредненную за длительный (годовой) интервал времени [Головков, Зверева, Чернова, 2007]. При этом для построения модели берутся все данные за сутки, включая зарегистрированные в области высоких широт, что значительно повышает равномерность покрытия сферы исходными данными. Далее на каждые конкретные сутки по полученным коэффициентам среднесуточной сферической гармонической модели синтезируются модельные значения главного поля, которые и используются для удаления соответствующей составляющей из измеренных в эти сутки значений суммарного магнитного поля. При решении задачи выделения значений аномального магнитного поля мы рассматриваем главное поле Земли как некую составляющую, постоянную в конкретный промежуток времени, которую необходимо удалить из измеренных значений. В связи с этим использование коэффициентов среднесуточной сферической гармонической модели для синтеза значений главного поля в каждые конкретные сутки является предпочтительным. В работе [Головков, Зверева, Чернова, 2007] показано, что среднесуточные сферические гармонические модели не уступают по точности традиционным моделям *IGRF*; при этом их существенное преимущество – простота расчета и полное отсутствие субъективизма, неизбежного при селекции данных.

Для редукции вклада внешнего электромагнитного поля, аппроксимируемого обычно первой зональной гармоникой в сферическом гармоническом разложении для магнитосферных токовых систем и линейными (или параболическими) трендами для ионосферных, применялся упрощенный подход, связанный с тщательным отбором экспериментальных данных. Для анализа использовались измерения только для ночных витков спутника ( $LT$  от 22.00 до 6.00 ч) и только в спокойные в магнитном отношении дни ( $k_p \leq 1$  и  $D_{st} \leq 20$ ). Проведенные оценки показали, что такой подход не снижает точности определения значений аномального поля, значительно сокращая время обработки.

Для анализа распределения поля магнитных аномалий на спутниковых высотах над Байкальским регионом и прилегающими территориями были отобраны спутниковые геомагнитные данные, равномерно покрывающие сектор 90–125 °в.д. и 40–60 °с.ш.; количество использованных значений по каждой компоненте составило ~5000. Получение столь значительного объема высококачественных данных для анализа стало возможным благодаря использованию спутника *CHAMP* – околополярная круговая орбита спутника имела угол наклона 87.3°, что позволяло проводить измерения в каждой точке пространства в разное локальное время, а более низкая (по сравнению с прежними спутниками) высота полета обеспечивала хорошее разрешение измеряемых компонент и модуля полного вектора магнитного поля. При такой конфигурации орбиты спутник равномерно покрывал поверхность всего земного шара качественными высокоточными измерениями секундного разрешения по времени, что составляет в пространстве около 7 км. За сутки спутник совершал около 14 витков, охватывая весь интервал локального времени [Reigber, Lühr, Schwintzer, 2002].

Для проверки надежности построений пространственных распределений поля расчет выполнялся для нескольких независимых наборов спутниковых данных. Сопоставление полученных вариантов подтвердило достаточно надежное воспроизведение пространственной структуры поля магнитных аномалий.

### Основные черты геолого-геофизического строения Байкальской рифтовой зоны

Изучаемая территория представляет собой часть Центрально-Азиатского складчатого пояса и имеет чрезвычайно сложную литосферу, составленную группами складчатых поясов и террейнов и рядом кристаллических массивов (микроконтинентов) с докембрийским фундаментом [Диденко и др., 2010; Добрецов, Кулаков, Полянский, 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 исследуемого региона, природа которой приписывается межплитному взаимодействию и (или) мантийным процессам, проявляется до сих пор.

Байкальская рифтовая зона состоит из разветвленной цепи позднекайнозойских полуграбенов и протягивается по территории Сибири примерно на 1500 км, гранича на северо-западе с кратоном Сибирской платформы, а на юго-востоке с Монгольским складчатым поясом. Около трети всей территории рифтовой зоны занимает оз. Байкал.

Байкальская рифтовая зона характеризуется высоким уровнем поверхностного теплового потока. Так, непосредственно в районе оз. Байкал он составляет порядка 75–120 мВт/м<sup>2</sup>, в его складчатом обрамлении – 40–60 мВт/м<sup>2</sup>, а на Сибирской платформе – 38–42 мВт/м<sup>2</sup> [Lysak, 1978; Dorofeeva, Lysak, Duchkov, 1995; Лысак, Дорофеева, 2003; Lysak, Sherman, 2002].

Для Байкальской рифтовой зоны характерны пониженные скорости сейсмических волн в верхней мантии [Gao et al., 2003; Zorin et al., 2003]. Глубинные сейсмические зондирования с применением ядерных взрывов [Егоркин и др., 1996] и детальные томографические исследования по профилю, секущему Южный Байкал [Zhao et al., 2006; Zorin et al., 2003], подтвердили существование в мантии непосредственно под рифтовой зоной куполообразной области пониженных скоростей.

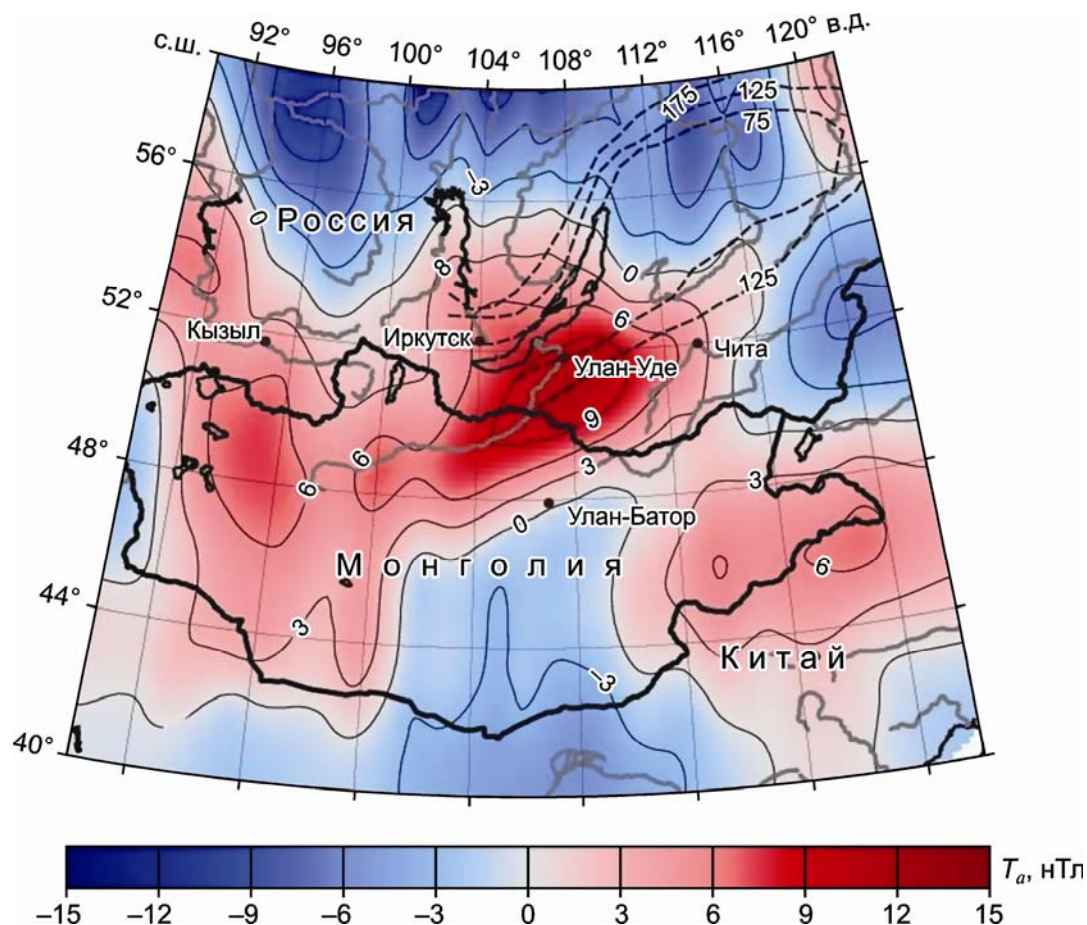
Результаты ряда исследований, выполненных другими геофизическими методами (см., например, [Крылов и др., 1979; Бердичевский, Ваньян, Кошурников, 1999; Кулаков, 1999]), подтверждают, что кору под оз. Байкал подстилает астеносферный выступ с более низкими по сравнению с наблюдаемыми на периферии рифтовой системы значениями скоростей продольных волн.

### Структура поля литосферных магнитных аномалий по данным спутника CHAMP

Далее будут рассмотрены карты аномального литосферного магнитного поля для Байкальской рифтовой зоны и ее окружения. При построении карт использовались полученные в 2010 г. данные измерений компонент геомагнитного поля вдоль ~200 витков спутника CHAMP (альтитуда CHAMP на уровне 290 км), которые были отобраны, систематизированы и преобразованы в подходящую для дальнейшей обработки форму.

Поскольку при анализе измерений вертикальной компоненты  $Z_a$  и модуля полного вектора  $T_a$  литосферного магнитного поля карты для рассматриваемых территорий оказываются достаточно близкими (на этих широтах основной вклад в полный вектор вносит вертикальная компонента), в данной статье мы будем анализировать только карты  $T_a$ .

В качестве примера на рис. 1 приведена карта магнитных аномалий  $T_a$  на высоте наблюдений 290 км, построенная в масштабе 1:12500000; медианное осреднение результатов более чем пяти тысяч измерений выполнено по ячейкам 30×30 мин.



**Рис. 1.** Карта магнитных аномалий модуля полного вектора магнитного поля  $T_a$  по данным спутника *CHAMP* (высота полета над геоидом ~290 км). Штриховые линии – изолинии толщины литосферы, км

**Fig. 1.** Contour map of the full vector magnetic anomalies module  $T_a$  according to the data of the *CHAMP* satellite. The altitude above the geoid is ~290 km; dashed lines are contours of lithosphere thickness (km)

Как можно видеть на рис. 1, крупные аномалии имеют сглаженную форму, что представляется вполне логичным, поскольку геомагнитная съемка на больших высотах фактически является пространственным фильтром низких частот, который подавляет локальные аномалии и сохраняет региональные. Затухание амплитуды аномалии с высотой зависит от параметров ее источника – чем больше глубина залегания и размеры намагниченного тела, тем медленнее убывает амплитуда. Таким образом, на большой высоте в сглаженном виде сохраняются в основном аномалии, обусловленные крупными глубокозалегающими структурами. Соответственно, эффект от неглубоко залегающих и небольших по размерам магнитоактивных тел, заметный на высоте 4 км, на высоте орбиты спутника, как это будет показано ниже, оказывается в значительной мере подавленным.

Над Байкальской рифтовой зоной на приводимой карте (см. рис. 1) фиксируется положительная аномалия, свидетельствующая о наличии магнитоактивной области в самых низах коры. Эта аномалия выделяется как обособленная зона положительных значений аномального магнитного поля, главным образом, в Забайкалье (к юго-востоку от Байкальского рифта) и включает в себя всю южную часть рифтовой зоны.

На магнитных картах, построенных для области к северо-востоку от Байкальской рифтовой зоны, наблюдается обширная область пониженных значений магнитного поля, непосредственно приуроченная к территории астеносферного выступа, к его так называемой “купольной части”, что согласуется с другими геофизическими полями. Литосферный нагрев в этой области, по-видимому, выражается увеличением значений температуры астеносферы, что вызывает подъем изотермы Кюри магнетита и уменьшение мощности магнитоактивного слоя.

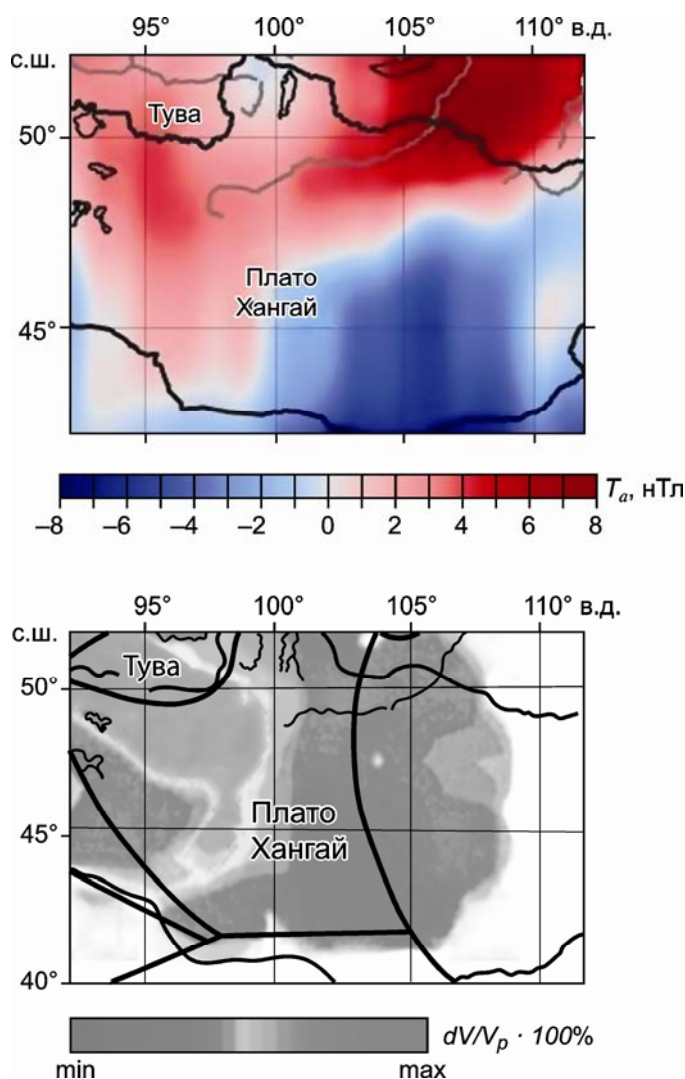
По знаку  $T_a$  литосферное магнитное поле территории Монголии (рис. 2, *вверху*) делится по меридиану  $100^\circ$  в.д. примерно на две части: западная характеризуется в основном положительными значениями  $T_a$ , восточная – отрицательными, что, по-видимому, связано с термальным состоянием самых нижних горизонтов земной коры.

**Рис. 2.** Образы магнитных аномалий  $T_a$  и скоростей сейсмических волн для территории плато Хангай, Монголия

*Вверху* – магнитные аномалии  $T_a$  на высоте над геоидом  $\sim 290$  км по данным спутника CHAMP; *внизу* – скоростные аномалии сейсмических  $P$ -волн на глубине 30 км (по [Бушенкова, Тычков, Кулаков, 2003])

**Fig. 2.** Images of magnetic anomalies  $T_a$  and seismic wave velocities on the Hangai Plateau territory

(*Top*) magnetic anomalies of  $T_a$  at the altitude above the geoid  $\sim 290$  km according to CHAMP satellite data; (*bottom*) velocity anomalies of seismic  $P$ -waves at a depth of 30 km (after [Bushenkova, Tychkov, Kulakov, 2003])



На рис. 2, *внизу* приведены образы аномалий скоростей сейсмических  $P$ -волн на глубине 30 км для той же территории, взятые из работы [Бушенкова, Тычков, Кулаков, 2003]. Сопоставление двух карт демонстрирует хорошее соответствие структуры аномального магнитного поля результатам сейсмических томографических наблюдений.

Анализируя рис. 2, можно видеть, что магнитное литосферное поле плато Хангай состоит из двух участков, противоположных по знаку (см. рис. 2, *вверху*), а в восточной

половине плато наблюдается устойчивая отрицательная аномалия скоростей сейсмических волн (см. рис. 2, *внизу*).

Область пониженных сейсмических скоростей, по мнению авторов, может быть объяснена следующим образом. Наличие повышенных значений теплового потока на плато Хангай [Лысак, Дорофеева, 2003] и его топография в виде характерного сводового поднятия свидетельствуют, что под земной корой может находиться современный мантийный плюм [Zorin et al., 1990; Dobretsov et al., 1996; Windley, Allen, 1993]. Существование в этой области верхнемантийного плюма следует также из сейсмической модели верхней мантии, полученной с помощью томографической технологии ITS [Kulakov, Tychkov, Keselman, 1995].

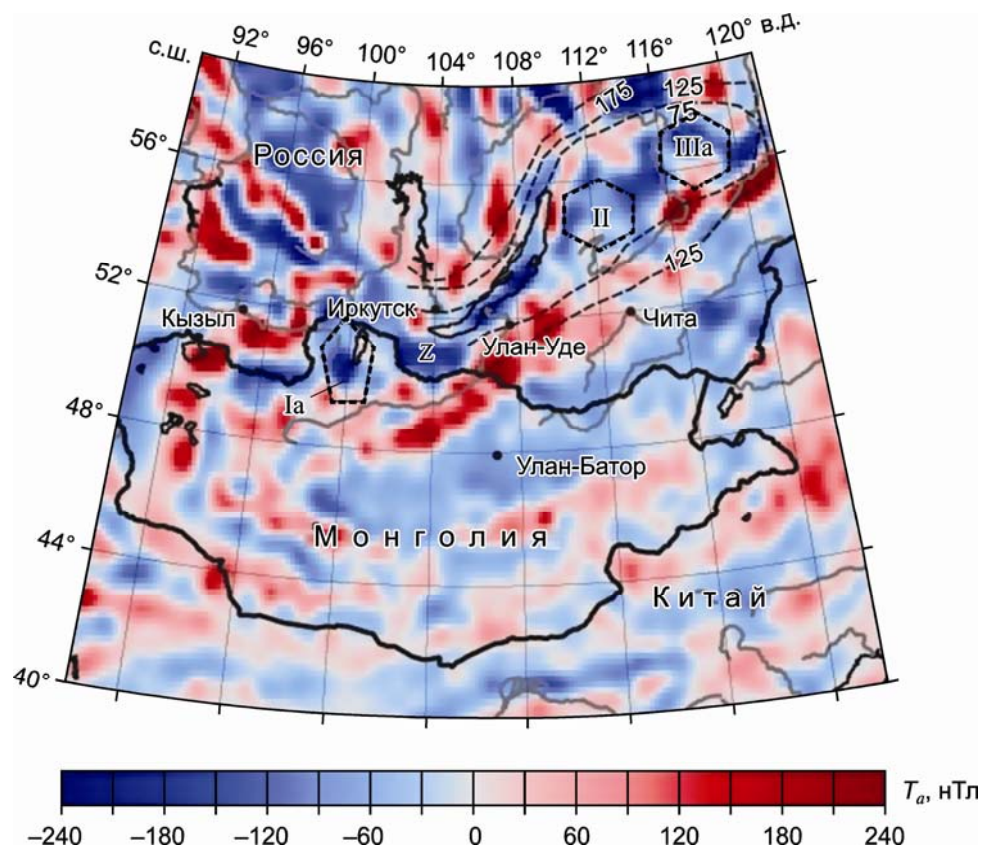
В качестве возможных причин отрицательной аномалии скоростей сейсмических волн, а также выявленных по спутниковым наблюдениям пониженных значений аномального магнитного поля, могут рассматриваться разогрев недр современными мантийными процессами и изначальная пластичность континентальной литосферы, приобретенная в процессе ее образования в этой области [Dobretsov et al., 1996]. В то же время в западной части плато Хангай отмечаются положительные значения магнитного поля. Граница между аномалиями разного знака протекает примерно по меридиану 100 °в.д. Аналогичным образом ведут себя и аномалии скоростей сейсмических волн (см. рис. 2, *внизу*). Повышенные значения сейсмических скоростей и аномального магнитного поля в пределах плато, возможно, отражают особенности вещества его литосферы, представленного древним докембрийским деплетированным материалом [Zorin et al., 1990] с высокой магнитной восприимчивостью.

### Магнитные аномалии по данным базы EMAG2

Представленная на рис. 3 карта пространственного распределения магнитных аномалий модуля полного вектора  $T_a$  на высоте 4 км над геоидом для территории Байкальской рифтовой зоны и прилегающих к ней территорий построена по данным базы EMAG2 [Maus et al., 2009]. Географические границы этой карты аналогичны границам карты, представленной на рис. 1. Карта на рис. 3 представляет собой мозаичный набор областей положительных и отрицательных аномалий разной формы и размеров, что отличает ее от карты, приведенной на рис. 1. Можно считать, что две эти карты, представляющие магнитные аномалии на разных высотах – 4 и ~300 км – отражают пространственное распределение магнитных масс в поверхностных и глубинных слоях земной коры.

Аномальное магнитное поле конкретно зоны Байкальского рифта на высоте 4 км (см. рис. 3) характеризуется в основном пониженными значениями  $T_a$  с вкраплениями более мелких локальных аномалий разного знака и интенсивности. В части общего фона это хорошо согласуется с повышенными значениями теплового потока и пониженными значениями сейсмических скоростей, выявленными томографическими исследованиями.

Рассмотрим соответствие образов магнитных аномалий томографическим особенностям отдельных участков Байкальской рифтовой зоны, которые были детально изучены методами сейсмической томографии. Для этого будет использовано предложенное в [Zhao et al., 2006] томографическое изображение мантии в продольных волнах под Байкальской рифтовой зоной, которое было получено методом телесеismicской томографии по данным сейсмостанций, развернутых вблизи оз. Байкал.



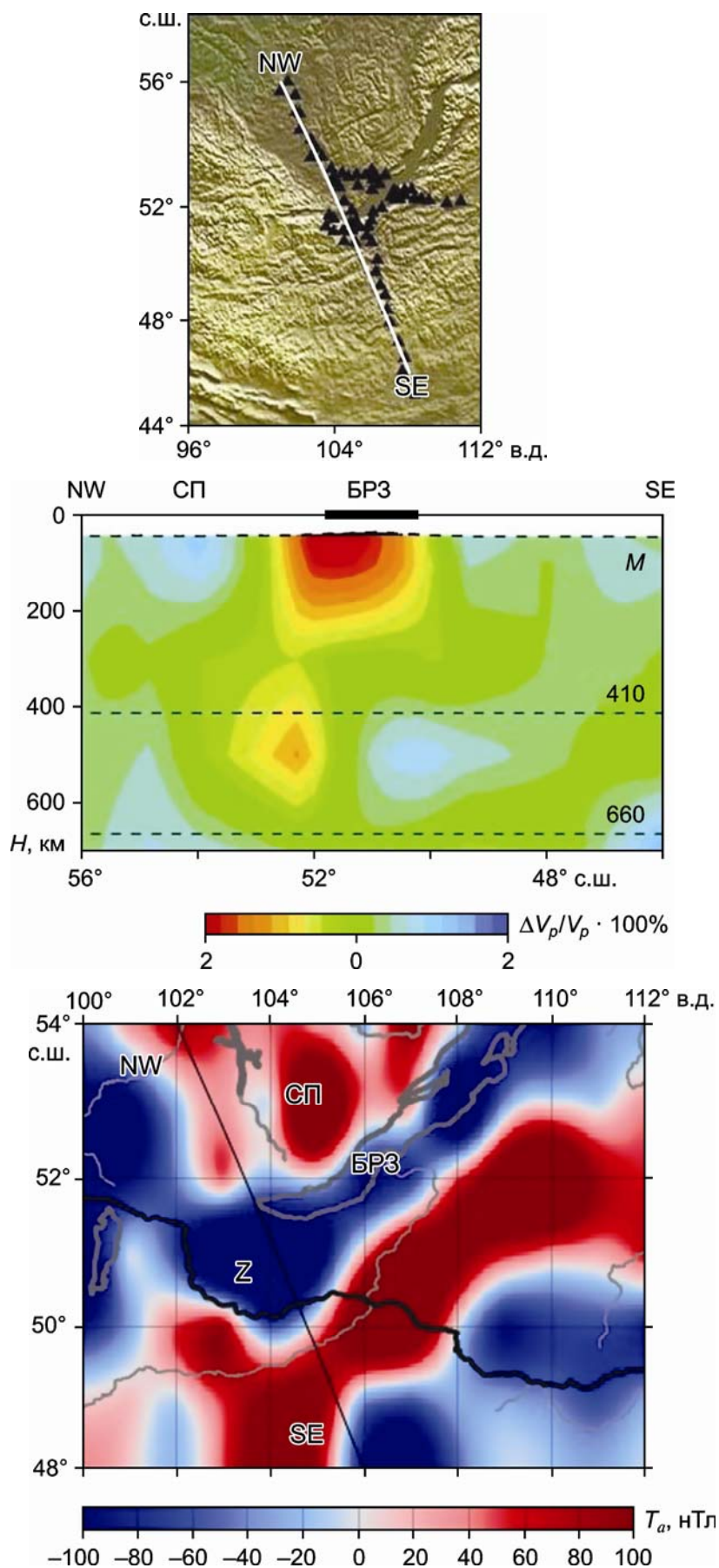
**Рис. 3.** Карта магнитных аномалий модуля полного вектора магнитного поля  $T_a$  на высоте 4 км над геоидом по данным базы EMAG2. Штриховые линии – изолинии толщины литосферы, км. Контуры с римскими цифрами – проекции на земную поверхность стволочных частей плюмов Ia, II, IIIa (по [Зорин, Турутанов, 2005])

**Fig. 3.** Contour map of the full vector magnetic anomalies module  $T_a$  according to the EMAG2 data-base at the altitude of 4 km above the geoid. Dashed lines are contours of the lithosphere thickness (in km) and contours with Roman numerals are surface projections of plumes Ia, II, and IIIa (data taken from [Zorin, Turutanov, 2005])

По результатам названных исследований под частью профиля NW–SE (положение профиля см. на рис. 4, *вверху*) была выявлена низкоскоростная аномалия, распространяющаяся до глубины 600 км; в литосфере под Сибирской платформой (СП) зафиксирована высокоскоростная аномалия (рис. 4, *по центру*).

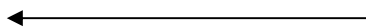
Низкоскоростная аномалия в верхней мантии интерпретируется в [Zhao *et al.*, 2006] как мантийный плюм, который играл важную роль в зарождении и эволюции Байкальской рифтовой зоны и развитии кайнозойского вулканизма в районе оз. Байкал. Формирование рифта могло контролироваться и другими факторами, например, наличием более древних (предрифтовых) линейных литосферных структур, расположенных соответствующим образом относительно положения плюма, а также дальнодействующими напряжениями, вызванными Индо-Азиатской коллизией [Zhao *et al.*, 2006].

На рис. 4, *внизу* показано распределение магнитного аномального поля по данным EMAG2 на исследованной томографическим методом территории. При сопоставлении приводимых карт можно видеть, что поведение аномального магнитного поля хорошо согласуется с распределением сейсмических скоростей – четкая отрицательная магнитная аномалия, обозначенная на нижнем фрагменте буквой Z, соответствует положению отрицательных значений сейсмической скорости на соответствующей части профиля NW–SE.



**Рис. 4.** Положение профиля томографических исследований NW-SE (*вверху*), томографический разрез мантии под Байкальской рифтовой зоной, построенный по  $P$ -волнам вдоль этого профиля (*по центру*), и карта магнитных аномалий  $T_a$  на высоте 4 км над геоидом по данным *EMAG2* (*внизу*). СП – Сибирская платформа, БРЗ – Байкальская рифтовая зона, Z – упоминаемая в тексте отрицательная магнитная аномалия, М – граница Мохоровичича

**Fig. 4.** (*Top*) Position of the tomographic NW-SE profile, (*center*) the mantle tomographic section along this profile constructed under the Baikal rift zone using  $P$ -waves and (*bottom*) magnetic anomaly map at the altitude of 4 km according to the *EMAG2* database



Пониженные значения аномального магнитного поля обусловлены, по-видимому, уменьшением толщины и снижением магнитных свойств магнитоактивного слоя ввиду высокого положения нагретой астеносферы, и, как следствие, подъемом изотермической поверхности Кюри магнетита.

На севере краевая часть Сибирской платформы (СП) характеризуется положительными значениями аномального поля в полном согласии с томографическими данными. К юго-востоку наблюдается протяженная положительная аномалия на территории складчатой зоны.

Роли плюмов – поставщиков горячего глубинного материала в астеносферный выступ Байкальской рифтовой зоны – посвящена работа [Зорин, Турутанов, 2005]. В ней показано, что стволы части плюмов расположены преимущественно под областью утоненной литосферы, т.е. под астеносферным выступом, на существование которого в рассматриваемом регионе указывает анализ многих геофизических данных (см., например, [Zorin et al., 1989; Logatchev, Zorin, 1992]). Непосредственно под рифтовой зоной авторы работы [Зорин, Турутанов, 2005] определяют положение трех плюмов (см. рис. 3), стволы части которых расположены под Хамар-Дабанской (плюм Ia), Баргузино-Икатской (плюм II) и Кодаро-Удоканской (плюм IIIa) топографическими кульминациями Саяно-Байкальского сводового поднятия, площадь которого отождествляется с рифтовой зоной. Проекция стволы части указанных плюмов, так же как и в случае с плюмом Z, хорошо совпадают с положением отрицательных магнитных аномалий, достаточно отчетливо выделяемых даже на общем пониженном фоне аномального магнитного поля.

### Заключение

Магнитная съемка, выполняемая низколетающими околоземными спутниками, на сегодняшний день является наиболее дешевым и доступным геофизическим методом изучения внутреннего строения нашей планеты, что позволило к настоящему времени покрыть достаточно равномерной сетью данных о геомагнитном поле практически всю поверхность Земли.

Развитие технологий качественного выделения литосферной части магнитного поля из измеренного спутниковыми магнитометрами суммарного позволяет использовать эти данные для достаточно точного определения положения региональных магнитных аномалий, обусловленных намагниченностью глубоко погруженных слоев земной коры.

Карты аномального магнитного поля Байкальской рифтовой зоны и прилегающих к ней территорий, построенные с использованием новых технологий, позволяют рассматривать их как источник данных для комплексного изучения морфологии и геофизических свойств исследуемой области.

Аномалии литосферного магнитного поля на территории Байкальской рифтовой зоны и ее окружения достаточно адекватно согласуются с современными представлениями о геофизической структуре этого тектонически активного региона. В частности, выявлено, что положение отдельных аномалий хорошо коррелирует с областями развития плюмов, установленными методами сейсмической томографии.

Литосферное магнитное поле как параметр, отражающий современное положение тектонических структур и их физические свойства, может быть использовано в комплексе с информативными параметрами других геолого-геофизических методов.

Конкретные оценки параметров намагниченности отдельных структур планируется проводить при получении наиболее полных данных по затуханию поля с использованием максимального разнообразия величин альтитуд спутника *CHAMP*, которые могут быть получены в дальнейшем.

Авторы выражают благодарность рецензентам статьи за доброжелательное отношение и ценные замечания. Карты аномального магнитного поля построены с использованием программ *GMT* [Wessel, Smith, 2007].

### Литература

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов Ив.М., Филиппов С.В. Роль спутниковых литосферных магнитных аномалий при анализе геолого-геофизических данных в Центрально-Азиатской коллизионной зоне // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы VI международного симпозиума. Бишкек: НС РАН, 2015. С.45–54.
- 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.
- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кошурников А.В. Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. 1999. № 10. С.3–25.
- Бушенкова Н.А., Тычков С.А., Кулаков И.Ю. Исследование структуры верхней мантии Центральной Сибири и прилегающих районов на РР-Р-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., 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.
- 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.
- 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.
- Егоркин А.В., Павленкова Н.И., Романюк Т.В., Солодилов Л.Н. Структура верхней мантии по профилю Байкал-Ямал (РИФТ), полученная с применением мирных ядерных взрывов // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 9. С.66–76.
- Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х. Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 5. С.685–699.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Петрик Г.В., Селезнев В.С. О сейсмической модели верхов мантии в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика. 1979. Т. 19, № 5. С.117–129.

- Кулаков И.Ю. Трехмерные сейсмические неоднородности под Байкальским регионом по данным локальной и телесеismicческой томографии // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С.317–331.
- Лысак С.В., Дорофеева Р.П. Термальное состояние литосферы в Монголии // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 9. С.929–941.
- Филиппов С.В., Абрамова Д.Ю., Варенцов И.М., Абрамова Л.М. Анализ аномалий литосферного магнитного поля в рамках геолого-геофизического исследования корово-мантийных структур Карпато-Балканского региона // Геофизика. 2017. № 2. С.71–78.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V. Mezo- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: Effects of the lithosphere plates interactions and mantle plumes // Int. Geology Rev. 1996. V. 38. P.430–466.
- Dorofeeva R.P., Lysak S.V., Duchkov A.D. Terrestrial heat flow in Siberia and Mongolia // Terrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia / Ed. M.L. Gupta and M. Yamano. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., 1995. P.251–279.
- Gao S., Liu K., Davis P., Slack P., Zorin Y., Mordvinova V., Kozhevnikov V. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath Baikal rift zone // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P.2194.
- 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.
- Kulakov I.Yu., Tychkov S.A., Keselman S.I. Three-dimensional structure of lateral heterogeneities in P velocities in the upper mantle of the southern margin of Siberia and its preliminary geodynamic interpretation // Tectonophysics. 1995. V. 241. P.239–257.
- Logatchev N.A., Zorin Yu.A. Baikal rift zone: structure and geodynamics // Tectonophysics. 1992. V. 208. P.273–286.
- Lysak S.V. The Baikal rift heat flow // Tectonophysics. 1978. V. 45. P.87–93.
- Lysak S.V., Sherman S.I. Terrestrial heat flow in areas of dynamic influence of faults in the Baikal rift zone // EGU Stephan Mueller Special Publication Series. 2002. N 2. P.153–160. DOI: 10.5194/smsps-2-153-2002.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Müller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebaud E., Tontini F.C. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochem. Geophys. Geosyst. 2009. V. 10, N 8. P.3–12.
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // Adv. Space Res. 2002. V. 30, N 2. P.129–134.
- 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.
- Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao S. Deep structure and origin of the Baikal rift zone // Earth. Planet Sci. Lett. 2006. V. 243. P.681–691.
- Zorin Yu., Turutanov E., Mordvinova V., Kozhevnikov V., Yanovskaya T., Treussov A. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // Tectonophysics. 2003. V. 372. P.153–173.
- Zorin Yu.A., Kozhevnikov V.M., Novoselova M.R., Turutanov E.Kh. Thickness of the lithosphere beneath the Baikal rift zone and adjacent regions // Tectonophysics. 1989. V. 168. P.327–337.
- Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.K., Kozhevnikov V.M. Structure of the lithosphere in the Mongolia-Siberian mountainous province // J. Geodynam. 1990. V. 11. P.327–342.

*Сведения об авторах*

**АБРАМОВА Дарья Юрьевна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. 108840, г. Москва, ТИНАО, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(926) 196-18-36. E-mail: abramova@izmiran.ru

**АБРАМОВА Людмила Мамиконовна** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 108840, г. Москва, ТИНАО, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(495) 851-09-06. E-mail: labramova@mail.igemi.troitsk.ru

**ВАРЕНЦОВ Иван Михайлович** – кандидат физико-математических наук, директор, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 108840, г. Москва, ТИНАО, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(495) 851-09-06. E-mail: ivan\_varentsov@mail.ru

**ФИЛИППОВ Сергей Витальевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. 108840, г. Москва, ТИНАО, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: +7(495) 851-02-95. E-mail: izmiran1@gmail.com

## MORPHOLOGY OF REGIONAL MAGNETIC ANOMALIES IN THE BAIKAL RIFT ZONE AND SURROUNDING TERRITORY

D.Y. Abramova<sup>1</sup>, L.M. Abramova<sup>2</sup>, Iv.M. Varentsov<sup>2</sup>, S.V. Philippov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

<sup>2</sup> *Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

**Abstract.** The distribution of the anomalous magnetic field is considered for the Baikal Rift Zone (BRZ) region and adjacent territories at two observation altitudes of 290 and 4 km. A database of experimental data of the absolute vector of the lithospheric magnetic field is created. Using the specially developed technology, the anomalous parts of the field are extracted from the CHAMP satellite records. To analyze the behavior of the anomalous field at an altitude of 4 km above the geoid, the EMAG2 version compiled from ground, satellite, marine, and aeromagnetic observations was used. Maps of anomalous field of various scales and averaging degrees were constructed, the position of individual anomalies and their relation to geological-tectonic and geophysical features of the structure of the Baikal rift zone and Mongolia was investigated. A good consistency of the anomalous magnetic field of the lithosphere and seismic tomography data is noted.

**Keywords:** regional geomagnetic anomalies, satellite measurements, EMAG2 database, Baikal rift zone, asthenospheric offset plumes.

### References

Abramova D.Yu., Abramova L.M. Varentsov Iv.M., and Filippov S.V. The role of satellite crustal magnetic anomalies in the analysis of geological and geophysical data in the Central-Asian collision zone, Problems of Geodynamics and Geoecology inland Orogens (Proceedings of the VI International Symposium). Bishkek: RS RAS, 2015, pp. 45-54.

- Abramova D.Yu., Abramova L.M., Filippov S.V., and Frunze A.Kh. On the prospects of the satellite data use for the analysis of regional magnetic anomalies, *Study of Earth from space*, 2011, no. 6, pp. 1-11.
- Berdichevski M.N., Vanyan L.L., and Koshurnikov A.V. Magnetotelluric soundings in Baikal rift zone, *Izv. Phys. Solid Earth*, 1999, no. 10, pp. 3-25.
- Bushenkova N.A., Tychkov S.A., and Kulakov I.Yu. Upper mantle structure beneath Central Siberia and neighboring regions, from PP-P tomography, *Russian Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 474-490.
- Didenko A.N., Kaplun V.B., Malyshev Yu.F., and Shevchenko B.F. Lithospheric structure and mezo- and cenozoic geodynamics of the Eastern central Asian fold belt, *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 1, no. 5, pp. 629-647.
- Didenko A.N., Mossakovski A.A., Pecherski D.M., Ruzhenntsev S.V., Samygin S.G., and Kheraskova T.N. Geodynamics of Central Asia Paleozoic oceans, *Russian Geology and Geophysics*, 1994, vol. 35, no. 7-8, pp. 59-75.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., and Ermikov V. Mezo- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: Effects of the lithosphere plates interactions and mantle plumes, *Int. Geology Rev.*, 1996, vol. 38, pp. 430-466.
- Dorofeeva R.P., Lysak S.V., and Duchkov A.D. Terrestrial heat flow in Siberia and Mongolia, *Terrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia*, ed. M.L. Gupta and M. Yamano, New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., 1995, pp. 251-279.
- Gao S., Liu K., Davis P., Slack P., Zorin Y., Mordvinova V., and Kozhevnikov V. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath Baikal rift zone, *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, pp. 2194.
- Hemant K. and Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique, *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, pp. 1-23.
- Hemant K., Maus S., and 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, pp. 249-254.
- Kulakov I.Yu., Tychkov S.A., and Keselman S.I. Three-dimensional structure of lateral heterogeneities in P velocities in the upper mantle of the southern margin of Siberia and its preliminary geodynamic interpretation, *Tectonophysics*, 1995, vol. 241, pp. 239-257.
- Logatchev N.A. and Zorin Yu.A. Baikal rift zone: structure and geodynamics, *Tectonophysics*, 1992, vol. 208, pp. 273-286.
- Lysak S.V. The Baikal rift heat flow, *Tectonophysics*, 1978, vol. 45, pp. 87-93.
- Lysak S.V. and Sherman S.I. Terrestrial heat flow in areas of dynamic influence of faults in the Baikal rift zone, *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 2002, no. 2, pp. 153-160. DOI: 10.5194/smssps-2-153-2002.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Müller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thebaud E., and Tontini F.C. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009, vol. 10, no. 8, pp. 3-12.
- Reigber C., Lühr H., and Schwintzer P. CHAMP mission status, *Adv. Space Res.*, 2002, vol. 30, no. 2, pp. 129-134.
- Tanaka A. and Okubo Y., Matsubayashi. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia, *Tectonophysics*, 1999, vol. 306, pp. 461-470.
- Wessel P. and Smith W.H.F. *The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2.2007*. <http://gmt.soest.hawaii.edu>.
- Windley B.F. and Allen M.B. Mongolian plateau: Evidence for the late Cenozoic mantle plume under Central Asia, *Geology*, 1993, vol. 21, pp. 295-298.
- Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., and Gao S. Deep structure and origin of the Baikal rift zone, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2006, vol. 243, pp. 681-691.
- Zorin Yu., Turutanov E., Mordvinova V., Kozhevnikov V., Yanovskaya T., and Treussov A. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure, *Tectonophysics*, 2003, vol. 372, pp. 153-173.
- Zorin Yu.A., Kozhevnikov V.M., Novoselova M.R., and Turutanov E.Kh. Thickness of the lithosphere beneath the Baikal rift zone and adjacent regions, *Tectonophysics*, 1989, vol. 168, pp. 327-337.
- Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.K., and Kozhevnikov V.M. Structure of the lithosphere in the Mongolia-Siberian mountainous province, *J. Geodynam.*, 1990, vol. 11, pp. 327-342.