

## Изучение глубинного строения земной коры по геомагнитным полям и их градиентам на стратосферных высотах

Ю.П. Цветков, С.В. Филиппов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В.Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия  
E-mail: tsvetkov@izmiran.ru*

Рассматриваются аномальное (литосферное) магнитное поле Земли (аномальное МПЗ) и его вертикальные градиенты на высотах стратосферы, анализируются вопросы внутреннего строения земной коры по магнитным стратосферным данным. Задача изучения внутреннего строения земной коры дистанционными методами надежно может быть решена по данным аномального МПЗ, полученным на двух высотах космического пространства – 500 км и 30 км. Рассматривается предложенная идея аэростатных градиентных магнитных съемок в стратосфере на длинномерной (6 км) измерительной базе. Разработана методика и приборы для аэростатных градиентных магнитных измерений. Анализируются результаты аэростатных градиентных магнитных съемок, выполненных на высотах около 30 км. Доказано, что на измерительной базе длиной 6 км надежно измеряются градиенты поля магнитных источников, расположенных вблизи подошвы земной коры. Обосновывается новый метод исправления глобальных аналитических моделей главного МПЗ при выделении магнитных аномалий из съемок по протяженным маршрутам. Показан процесс формирования спутниковой магнитной аномалии (H=400 км) из магнитных аномалий, полученных на аэростате (H=30 км). Сделан вывод, что модель постоянного МПЗ, развитую до 720 сферической гармоники, следует строить по спутниковым и аэростатным градиентным магнитным данным. Такая модель будет нести надежную информацию о литосферном магнитном поле, следовательно, и о глубинной магнитной структуре земной коры.

**Ключевые слова:** градиентные геомагнитные съёмки, аномальное (литосферное) магнитное поле Земли, глобальные аналитические модели магнитного поля Земли, стратосферные аэростаты.

### Введение

За время эволюции Земли непрерывно идет радиальный процесс выплавления вещества мантии под действием радиоактивного тепла. Этот процесс первоначально привел к образованию первичной серогнейсовой земной коры за счет выплавления легких фракций вещества мантии, практически не содержащей металлогенических комплексов. Рудоносность архея остается крайне бедной. Продолжающийся процесс эволюции земной коры приводит к образованию континентов, горных сооружений, опусканий и подъема платформ, образованию геосинклинарий (Виноградов, 1962). Интенсивный магматизм и метаморфические преобразования горных пород в протерозое приводят к образованию крупнейших месторождений полезных ископаемых. Образуются за счет вещества мантии особые магматические комплексы, неизвестные ни для предшествующего, ни для более поздних геологических периодов. Удельный вес полезных ископаемых этой эпохи намного больше, чем образовавшихся в последующие эпохи (Лазько, 1971). В результате вертикальных и горизонтальных движений блоков земной коры временная принадлежность таких блоков во многом не соответствует их местоположению в земной коре. В большей части земные слои протерозойской эры перекрыты бедными на металлические месторождения слоями. В результате жизнедеятельности человечества полезные ископаемые при-

поверхностного залегания исчерпываются. Необходимо добычу сырья проводить на более глубоких горизонтах земной коры, чему способствует разработка новых методов геолого-разведки. На сегодня известны примеры рентабельной добычи минерального сырья на глубинах до 4 - 5 км. В геологической службе Франции (BRGM) создана лаборатория, ведущая поиск глубокозалегающих месторождений минерального сырья, которые могут быть гигантскими. Поиск ведется по аномалиям земной коры, проявляющимся в современных геофизических полях. Предлагаемый подход к изучению глубинного строения земной коры способен улучшить достоверность поиска глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых. Решениям этих вопросов с использованием данных аномального магнитного поля, может эффективно служить аэростатный магнитный градиентометр (АМГ), впервые в мировой практике предложенный и внедренный в ИЗМИРАН.

Применение АМГ, помимо вышесказанного, служит также решению ряда фундаментальных задач геофизики и ряда прикладных задач, например, трассирование разломов и поиск других нарушений сплошности земной коры, позволяющие оценить возможность нахождения в них очагов природных катастроф. Использование данных, получаемых с помощью АМГ, может найти прикладное применение в деле освоения Арктики для систематического изучения строения земной коры арктического бассейна и его шельфа, при поиске полезных ископаемых на глубоких горизонтах земной коры. Известными методами выполнять такие исследования в полярных областях малоэффективно. При соответствующей доработке, АМГ может быть использован для измерения других геофизических полей, например, состава и параметров верхней атмосферы: температуры, плотности ионной концентрации, электрических полей, вещественного состава, аэрозолей и пр.

В стратосфере выше велопаузы (~18 км) существуют зональные воздушные течения (Школьный, Майборода, 1973), вместе с которыми стратосферные аэростаты способны совершать кругосветные полеты вдоль географических параллелей.

Только в последние десятилетия были созданы предпосылки для получения качественных данных аэростатных магнитных съемок. Это создание:

- глобальной навигационной системы (GPS, ГЛОНАСС);
- глобальной системы передачи данных из любой точки земного шара на FTP сервера сети Интернет (GlobalStar, IRIDIUM);
- глобальных аналитических моделей МПЗ по спутниковым магнитным измерениям (IGRF, MF8 и др.);
- аэростатного магнитного градиентометра с измерительной базой длиной в 6 км.

Россия занимает уникальное положение в мире для полетов стратосферных аэростатов – протяженность ее территории с запада на восток составляет 10 000 км и практи-

чески нет препятствий для кругосветных полетов российских аэростатов над Северным Ледовитым океаном.

Ниже рассмотрено обоснование нового подхода в получении научных данных об МПЗ, основанного на использовании градиентных магнитных измерений в стратосфере, обладающего мировой новизной, подтвержденной патентами на изобретения (Цветков и др., патент №2437125.20.12.2011).

### **Измерение градиента геомагнитного поля на аэростатных высотах**

Важнейшей фундаментальной проблемой геофизики является изучение внутреннего строения твердой оболочки Земли. Для решения этой проблемы успешно применяются подходы, основанные на использовании естественных полей земной коры, в частности, аномального (литосферного) магнитного поля Земли (МПЗ). Но с использованием аномального МПЗ проблема не может быть исчерпывающе решена на уровне возможностей этого подхода, если не будут досконально известны все сведения о магнитных аномалиях. Аномальное МПЗ обычно выделяют из аэромагнитных съемок, выполняемых, в основном, на высотах до трех километров, а также спутниковых магнитных съемок на высотах ~500 км. На первый взгляд, казалось бы, чем ближе к земной поверхности выполнены магнитные измерения, (маловысотные аэромагнитные съемки), тем они несут более полную информацию о составе и свойствах аномального МПЗ. Однако, имея в виду вертикальную мощность земной коры ~40 км и присутствие в данных аэромагнитных съемок локальных магнитных аномалий, создаваемых самыми верхними частями земной коры, значения которых вблизи поверхности Земли могут достигать 1500 нТл и более, что является помехой при интерпретации полей глубинных источников, эти аномалии необходимо исключать. При их исключении (фильтрации) математическими методами искажается не только амплитуда выделяемой региональной аномалии, но и смещается ее местоположение. Аэромагнитные съемки территории СССР, в основном, были завершены в середине 1970-х годов, когда не было надежных глобальных аналитических моделей нормального МПЗ. Это отрицательно сказалось на выделении аномального МПЗ из аэромагнитных съемок, в результате чего допущенный остаток нормального поля в выделенном аномальном МПЗ не оценен. Карта аномального МПЗ территории СССР (карта аномального МПЗ, маш. 1:2500000, 1974), построенная из аэромагнитных съемок, по ряду причин (влияние локальных аномалий, пренебрежение полями глубинных источников, малоинтенсивных на поверхности Земли, но заметных и значимых в отсутствии локальных магнитных аномалий на стратосферных высотах, а также неучтенного остатка нормального МПЗ), приводит к искажениям региональной компоненты аномального МПЗ, которая в основном, создается глубинными источниками.

В 60–70-ые гг. прошлого века не было качественных моделей нормального МПЗ и для каждого района съемок использовалось субъективно выбранное нормальное МПЗ. При этом было взято во внимание известное из теории поля положение — интеграл по площади положительных значений магнитного поля должен быть равен интегралу отрицательных значений. «Квадраты» аэромагнитных съемок обычно имеют стороны длиной 100 км. Все это сказалось на уровне нормального МПЗ, выбранного для выделения магнитных аномалий. Это часто и приводило к тому, что профили магнитных аномалий, снятые с карт даже по не очень протяженным участкам, ложно центрированы по значениям положительных и отрицательных аномалий. По нашему мнению это и есть основная погрешность карт аномального МПЗ.

Основными составляющими, формирующими литосферное магнитное поле, являются региональные и крупные региональные магнитные аномалии, пространственный спектр которых включает длины волн от 50 км до 3000 км. Спутниковые же магнитные съемки содержат в своем составе магнитные аномалии размером 500 км и больше, и они относятся к крупным региональным аномалиям, которые предпочтительней использовать при решении задач глобальной тектоники Земли.

Для изучения глубинного строения земной коры по магнитным данным необходимо надежно выделить региональные компоненты аномального МПЗ из съемок. Проблема состоит в достоверности нормального МПЗ, используемого для выделения магнитных аномалий. В случае протяженных (аэростатных) магнитных съемок практически единственной возможностью выделения аномального МПЗ могут служить современные глобальные аналитические модели нормального МПЗ. Однако такие модели могут иметь ряд погрешностей, зависящих от тщательности учета вековой вариации МПЗ на момент съемок, остаточных явлений внешних геомагнитных вариаций и др. причин. Напомним, что магнитное поле, которое регистрируется с помощью магнитометров на Земле или над Землей — это сумма полей различных физических источников, расположенных внутри и за пределами нашей планеты. Поле, связанное с внутренними источниками обычно называют внутренним магнитным полем Земли, связанное с внешними источниками — внешним магнитным полем. Основной вклад в поле вносят источники, размещенные в жидком ядре планеты (так называемое — главное или нормальное поле). Литосферная намагниченность отвечает за литосферное или аномальное поле. Ионосферные и магнитосферные токовые системы создают внешнее магнитное поле Земли. Наведенные внешним магнитным полем токи, текущие в проводящей Земле, наряду с главным и аномальным полями, можно отнести к внутреннему магнитному полю Земли. Отметим, что при вычислении вертикальных градиентов из результата исключаются внешнее МПЗ и систематические погрешности используемых при

этом аналитических моделей МПЗ. Основываясь на этих свойствах градиентов, измерение вертикальных градиентов МПЗ позволяет контролировать погрешности аналитических моделей и при необходимости исключать их. Контроль погрешности аналитических моделей можно сделать в том случае, если вдоль трассы съемки существуют места, протяженностью не менее 100 км, где нет магнитных аномалий. Мы полагаем, что в таких местах вертикальные градиенты измеряемого магнитного поля малы или равны нулю.

В этих местах на профиле разностей измеренного и модельного полей можно определить величину отклонения профиля от нуля как погрешность или поправку модели. Используя эту поправку, можно скорректировать поле модели вдоль всего изучаемого профиля. Таким образом, по измеренным вертикальным градиентам МПЗ определяются места, в которых отсутствуют значимые магнитные аномалии (градиенты малы или равны нулю), определяется поправка модели нормального магнитного поля и далее с учётом этой поправки определяется профиль аномального МПЗ вдоль всей трассы полёта аэростата (Цветков и др., 2011).

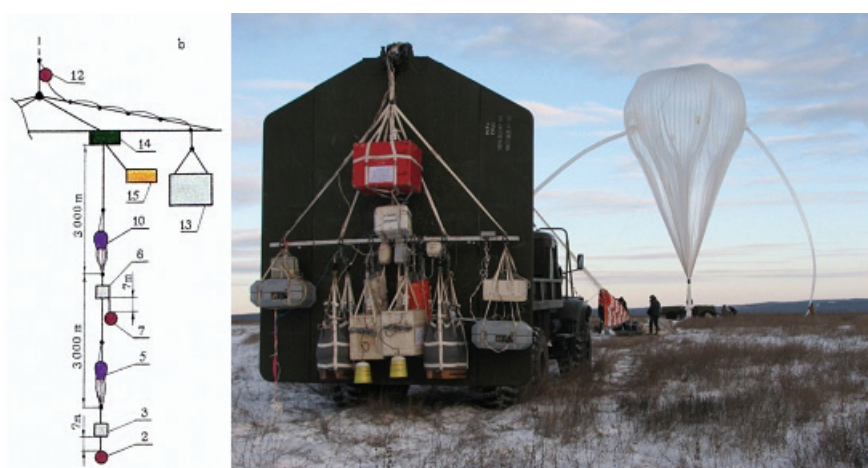
Однако получение вертикальных градиентов аномального МПЗ от источников, расположенных на нижних горизонтах земной коры, необходимых для изучения ее глубинного строения, является мировой проблемой, до сих пор не решенной на практике (Nelson et al., 1992). Для поиска ее решения нами, в течении последних примерно 20 лет, были осуществлены градиентные магнитные съемки с борта стратосферных аэростатов, дрейфующих на высотах 20-40 км. Указанная проблема измерения градиентов была решена за счет длинномерной (до 6 км) измерительной базы аэростатного магнитного градиентометра (АМГ).

Экспериментальным путем показано (Цветков и др., 2011), что места вдоль трассы полета, где отсутствуют значимые магнитные аномалии, чередуются примерно через 1000 км. Следовательно, применение нового метода выделения аномального МПЗ возможно для территории всего земного шара.

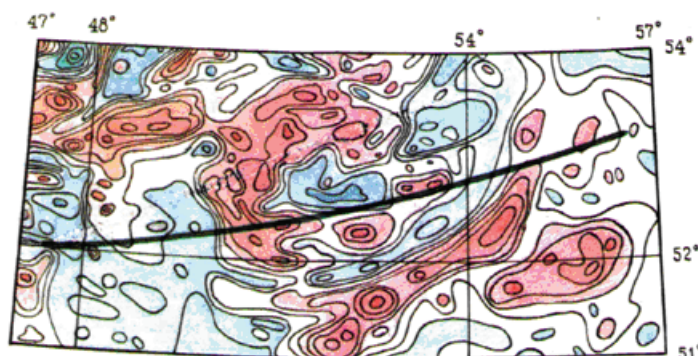
### **Аэростатный магнитный градиентометр**

В основу заявленных решений положены данные, полученные с помощью АМГ, разработанного в ИЗМИРАН (Николаев и др., 2008; Цветков и др., 2007; Черников и др., 2009). АМГ состоит из трех приборных контейнеров, в каждом из которых находится скалярный магнитометр (ядерно-прецессионный протонный магнитометр с чувствительностью  $\sim 0,5$  нТл), GPS-приемник глобальной навигационной системы, бортовая ЭВМ для сбора и пакетирования научной информации, модем спутниковой передачи данных «GlobalStar» и система автоматического развертывания градиентометра на заданной высоте при взлете аэростата. В состав АМГ входят также тросонакопители, вмещающие несущий трос длиной

6 км, тормозные парашюты, барореле, пирозамки и пр. При взлете аэростата с помощью системы разворачивания градиентометра приборные контейнеры на несущем тросе один за другим через 3 км друг от друга выстраиваются вдоль вертикальной линии по направлению поля силы тяжести. Необходимую точность измерения магнитных градиентов при использовании тросовой системы, выполняющей функцию распределения магнитометров в пространстве, обеспечивают только скалярные ядерно-прецессионные магнитометры с датчиками, нечувствительными к их азимутальному положению. Научные и траекторные данные по спутниковым каналам радиосвязи с борта аэростата транслируются на FTP сервер сети Интернет, из которого данные считываются на компьютер пользователя. За отклонения измерительной базы градиентометра от вертикали вводится поправка согласно статье (Цветков и др., 2007). На *рис. 1* приведена схема размещения АМГ на борту аэростата.



*Рис. 1.* 3, 8, 13 – контейнеры с измерительно-регистрирующей аппаратурой; 2, 7, 12 – датчики магнитного поля; 5, 10, 15 – парашюты; 14 - пирозамок отсоединяющий спускаемую часть АМГ при посадке аэростата



*Рис. 2.* Карта магнитных аномалий и траектория полета аэростата в 2013 г.

Карта магнитных аномалий и траектория полета аэростата в марте 2013 г. приведена на *рис. 2*. Расчет глубин залегания источников магнитных аномалий вдоль трассы полета выполнялся по методике, изложенной в статье (Цветков и др., 2004) для изменчивости аномального МПЗ в диапазонах высот 0–24 км и 24–30 км. По трассе полета аэростата,

используя карту (Карта аномального МПЗ, маш. 1:2500000, 1974), были выбраны две магнитные аномалии с центрами:  $A_1 - \varphi \approx 52,2^\circ \text{ N}; \lambda \approx 50,26^\circ \text{ E}$  и  $A_2 - \varphi \approx 53,38^\circ \text{ N}; \lambda \approx 55,8^\circ \text{ E}$ . Глубины залегания источников этих аномалий составили 8 км и 38 км. Найденные, по сути, по вертикальным градиентам МПЗ, глубины залегания источников, расположенных близко к подошве земной коры, доказывают, что вертикальные градиенты поля магнитных аномалий от глубинных источников уверенно измеряются при длине измерительной базы градиентометра, равной 6 км и при использовании протонных магнитометров.

Выполненный анализ экспериментальных данных 2013 г. показал, что с использованием предлагаемой методики оценки и учета погрешностей моделей нормального МПЗ можно надежно выделить из аэростатных съемок аномальное МПЗ. При этом уровень нормального МПЗ определялся по последней глобальной аналитической модели главного МПЗ (IGRF 2010, с поправкой на вековую вариацию) и дополнительно анализировался согласно вышеизложенной методике по ранее выполненным аэростатным градиентным магнитным съемкам (профили Камчатка-Урал). Выделенное аномальное МПЗ по маршруту аэростатной съемки было сравнено с магнитными аномалиями, снятыми с карты (Карта аномального МПЗ, масштаб 1:2500000, 1974).

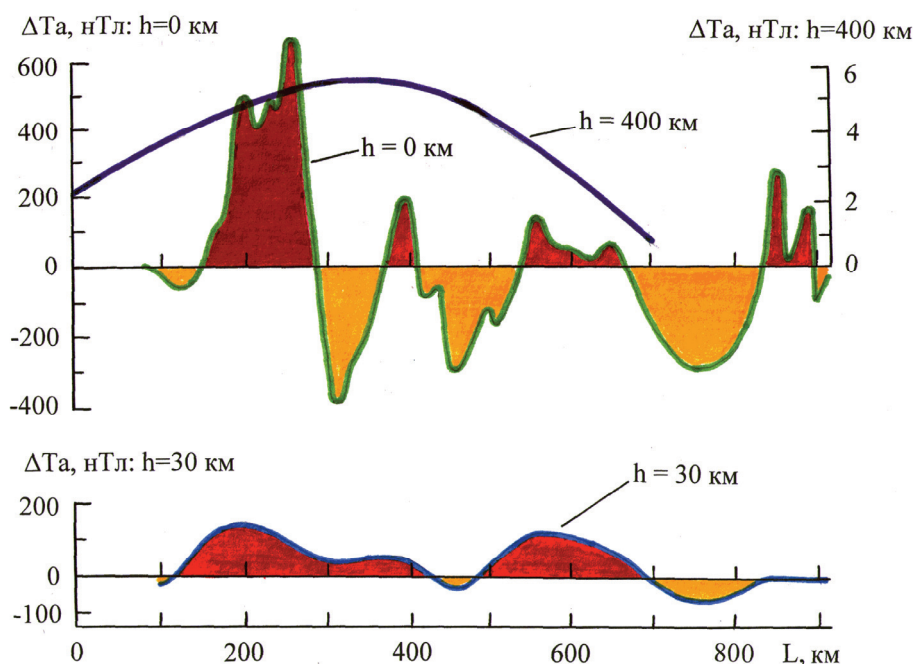


Рис. 3. Профили магнитных аномалий вдоль трассы полета аэростата

Выше было отмечено, что основная погрешность карт аномального МПЗ, построенных в 60–70-ые гг., связана с субъективным выбором уровня нормального МПЗ. Это может привести даже для непротяженных профилей к близким значениям положительных и отрицательных магнитных аномалий. Этим, с нашей точки зрения, объясняется причина того,

что отношение средних значений положительных и отрицательных магнитных аномалий для аэромагнитных профилей оказалось в 4 раза меньше, чем для аэростатных профилей на высоте 30 км (см. *рис. 3*). По нашему мнению, именно по вышеназванным причинам предшественникам не удалось правильно пересчитать аномальное МПЗ, полученное из маловысотных съемок, в верхнее полупространство (а не по причине ограниченности размеров территории предоставления исходных данных, как принято считать, хотя в какой-то мере и это имеет место). Известно, что пересчет аномалий в верхнее полупространство эквивалентен осреднению по площади исходных данных. Следовательно, осреднение наземных данных не приводит к выделению предполагаемых аномалий, а приводит к их аннигиляции. Этот важнейший результат, полученный экспериментальным путем, по-видимому, объясняет многие тупиковые вопросы, возникающие при изучении феномена аномального МПЗ.

Магнитные аномалии на высотах  $H=30$  км,  $H=400$  км и на поверхности Земли ( $H=0$  км) (Карта аномального МПЗ, маш. 1:2500000, 1974) приведены на *рис. 3*. На этом рисунке виден процесс формирования спутниковой Камско-Эмбенской магнитной аномалии из данных, полученных на аэростате. Этот процесс не обеспечивается наземными данными, что связано с предполагаемой нами аннигиляцией положительных и отрицательных аномалий по профилю.

Дополнительно для оценки качества представления магнитных аномалий современными моделями путем сопоставления модельных данных с полученными на аэростатах, была проанализирована современная глобальная аналитическая модель EMM/720 постоянного МПЗ (Manoj C. Nair, Stefan Maus. Enhanced Magnetic Model. <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM>), построенная по спутниковым и наземным данным и развитая до степени и порядка  $n=m=720$ . Минимальный размер магнитных аномалий, полученных на высоте 30 км, примерно соответствует 720-ой гармонике ее спектра. В идеале модельные для высоты 30 км и измеренные на этой же высоте магнитные поля должны быть идентичными. Аномальное МПЗ, выделенное вдоль маршрута аэростатной съемки имеет среднеквадратическое значение равное 54,8 нТл, а разность полученного на аэростате поля и синтезированного по коэффициентам модель EMM/720 составила 39,2 нТл (см. *рис. 4*). Это подтверждает, что модель EMM/720 во многом ошибочно представляет аномальное МПЗ на высоте  $\sim 30$  км. К сожалению, существенно лучших моделей на данный момент нет. Для получения репрезентативной модели, развитой до 720 сферической гармоники, необходимо использовать вместо наземных аэростатные магнитные данные. Принципы создания таких моделей заложены в (Webers, Tsvetkov, 2007). Методика векторных измерений на аэростатах разработана в (Kogepanov, Tsvetkov, 2005). Использование предложенных методик (при наличии экспериментальных аэростатных данных) позволяет построить улучшенную векторную модель МПЗ.



Итак, аэростатные магнитные данные могут быть рекомендованы к использованию вместо наземных данных для создания улучшенной модели постоянного МПЗ в околоземном пространстве. Предпосылки к построению такой модели заложены в настоящей работе. Построенная таким образом модель постоянного МПЗ, развитая до степени и порядка  $m=n=720$ , будет нести надежную информацию о литосферном магнитном поле, следовательно, и о глубинной магнитной структуре земной коры.

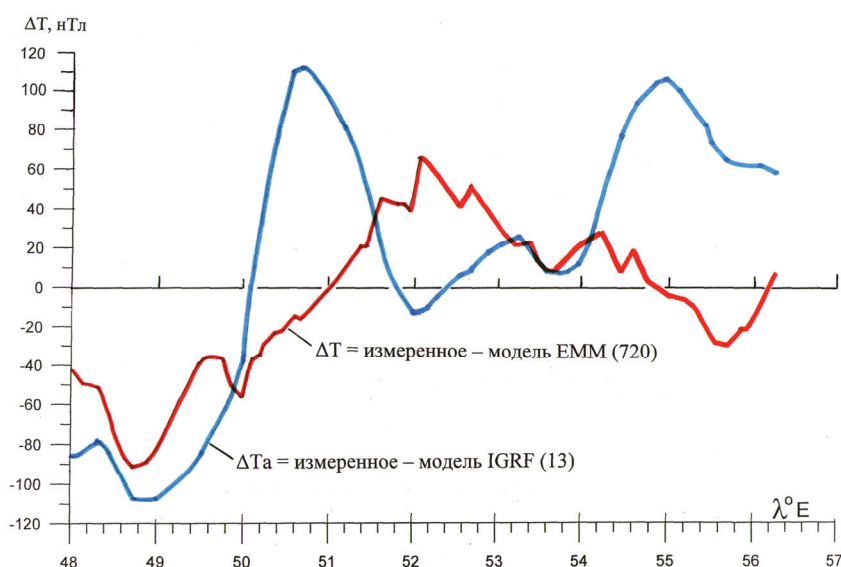


Рис. 4. Разности магнитных полей на высоте 30 км: измеренных и смоделированных по модели EMM/720 (720 сферических гармоник)

### Выводы

1. В аэростатном полете с магнитным градиентометром на борту, имеющим измерительную базу длиной 6 км, впервые в мировой практике получены вертикальные градиенты магнитного поля от источников, расположенных на нижних горизонтах земной коры и выполнено доказательство принадлежности полученных градиентов к полю глубинных источников. С использованием этих градиентов оценены глубины залегания магнитных источников вдоль трассы, изменяющиеся от 8 до 38 км.
2. Существующие современные аналитические модели постоянного МПЗ, построенные по спутниковым и наземным магнитным данным (например, модель EMM/720) неудовлетворительно представляют аномальное МПЗ на высоте 30 км.
3. Аэростатные градиентные магнитные съемки позволяют надежно выделить аномальное МПЗ для любого региона земного шара, в том числе в полярных областях Земли.
4. Глобальная аналитическая модель постоянного МПЗ для околоземного космического пространства, построенная по данным спутниковых (~500 км) и аэростатных (~30 км)

магнитных съемок будет содержать надежные данные о главном и аномальном МПЗ, следовательно, и о глубинной магнитной структуре земной коры.

5. Новые подходы, основанные на высокоточных измерениях градиентов МПЗ на аэростатах, позволяют создать современную технологию томографии внутреннего строения земной коры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 11-05-00182-а, №12-05-00817-а.

## Литература

1. *Виноградов А.* Происхождение оболочек Земли. // Изв. АН СССР, сер. геол. № 11, 1962.
2. *Карта аномального магнитного поля территории СССР.* Масштаб 1:2500000 / Отв. ред. Макарова З.А. М.: ГУГК. 16 л., 1974.
3. *Лазько Е.М.* Основы региональной геологии СССР. Том III // М.: Недра, 1971. 344 с.
4. *Николаев Н.С., Крапивный А.В., Баранов Я.В., Брехов О.М., Цветков Ю.П., Пчелкин А.В.* Высокоточный аэростатный градиометр со спутниковыми каналами связи. // Датчики и Системы, 2008. № 1. С. 16–20.
5. *Цветков Ю.П., Брехов О.М., Филиппов С.В., Бондарь Т.Н., Иванов А.А., Крапивный А.В., Николаев Н.С.* Экспериментальные оценки погрешности измерений вертикальных геомагнитных градиентов в стратосфере // Геомагнетизм и аэрномия, 2007. Т. 47. № 4. С. 543–547.
6. *Цветков Ю.П., Головков В.П., Кузнецов В.Д., Брехов О.М., Пелле В.А.* Способ выделения составляющих индукции аномального магнитного поля Земли // Патент на изобретение № 2437125. 20.12.2011. Бюл. № 35. Приоритет – 25.05.2010.
7. *Цветков Ю.П., Кузнецов В.Д., Головков В.П., Брехов О.М., Пелле В. А., Крапивный А.В., Николаев Н.С.* Выделение аномального магнитного поля Земли из аэростатных магнитных съемок на высотах 20–40 км. // Доклады Академии наук, 2011. Т. 436. № 2. С. 262–266.
8. *Цветков Ю.П., Ротанова Н.М., Харитонов А.Л.* Повысотная структура магнитных аномалий по градиентным измерениям в стратосфере. // Геомагнетизм и аэрномия, 2004. Т. 44. № 3. С. 412–418.
9. *Черников С.П., Цветков Ю.П., Брехов О.М., Крапивный А.В., Николаев Н.С.* Компьютерная модель динамики процесса автоматического развертывания аэростатного магнитного градиентометра. // Датчики и системы, 2009. № 6. С.20–23.
10. *Школьный Е.П., Майборода Л.А.* Атмосфера и управление движением летательных аппаратов. // Л.: Гидрометиздат, 1973. 307 с.
11. *Korepanov V., Tsvetkov Yu.* Gradient magnetometer system for balloons. // Proceedings of the 17<sup>th</sup> ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, ESA SP-590, Sandefjord, Norway, 2005. P. 443–448.
12. *Nelson J.B., Marcotte D.V., Hardwick C.D.* Comments on “Magnetic field gradients and their uses in the study of the Earth's magnetic field” of by Harrison and Southam. // J. Geomag. Geoelectr., 1992. Vol. 44. P. 367–370.
13. *Webers W.A., Tsvetkov Yu.* The role of magnetic field data from the Earth's surface and from different balloon and satellite altitudes for deriving high quality analytical models of the internal magnetic field. // Proceedings of the 18<sup>th</sup> ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research. ESA SP-647, Netherlands, 2007. P. 597–600.

## Studying the deep structure of the Earth's crust by geomagnetic fields and their gradients at stratospheric altitudes

Yu.P. Tsvetkov, S.V. Filippov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS  
Moscow, Troitsk 142190, Russia  
E-mail: tsvetkov@izmiran.ru*

Lithosphere magnetic field of the Earth and its vertical gradients at altitudes of the stratosphere are considered. The problem of the interior structure of the Earth's crust retrieval from magnetic stratospheric data is analyzed. It can be

reliably solved based on remote sensing of the anomaly lithosphere magnetic field of the Earth, received at two altitudes - 500 and 30 km. The idea of stratospheric balloon gradient magnetic surveys in the stratosphere on a lengthy (6 km) measuring base is considered. A technique for stratospheric balloon gradient magnetic measurements and instruments for this purpose are created. Results of stratospheric balloon gradients magnetic surveys conducted at altitudes of about 30 km are analyzed. It is proved, that on the measuring 6 km base gradients of the fields of magnetic sources located close to the sole of the Earth's crust are reliably measured. A new method is substantiated to correct global analytical models of the main geomagnetic field during extraction of magnetic anomalies from surveys at lengthy routes. The process of formation of satellite magnetic anomaly (H=400 km) from magnetic anomalies received aboard a balloon (H=30 km) is shown. We conclude that the model of the main geomagnetic field developed up to 720 spherical harmonics should be build based on satellite and stratospheric balloon gradient magnetic data. Such model will carry reliable information on the lithosphere magnetic field, and hence the deep magnetic structure of the Earth's crust.

**Keywords:** gradient geomagnetic surveys, lithosphere magnetic field of the Earth, global analytical models of the magnetic field of the Earth, stratospheric balloons.

## References

1. Vinogradov A. Proiskhozhdenie obolochek Zemli (The origin of the Earth covers), *Izv. AN SSSR. Ser. geology*, No. 11, 1962.
2. *Karta anomal'nogo magnitnogo polya territorii SSSR. Masshtab 1:2500000* (Map of the anomalous magnetic field of the USSR. Scale 1:2500000), Moscow: GUGK, 16 posters, 1974.
3. Laz'ko E.M. *Osnovy regional'noi geologii SSSR, Tom III* (Basis of regional geology of the USSR, Vol. III), Moscow: Nedra, 1971, 344 p.
4. Nikolaev N.S., Krapivnyi A.V., Baranov Ya.V., Brekhov O.M., Tsvetkov Yu.P., Pchelkin A.V. Vysokotochnyi aerostatnyi gradiometr so sputnikovymi kanalami svyazi (High-precision balloon gradiometer with satellite communication links). *Datchiki i Sistemy*, 2008, No. 1, pp. 16-20.
5. Tsvetkov Yu.P., Brekhov O.M., Filippov S.V., Bondar' T.N., Ivanov A.A., Krapivnyi A.V., Nikolaev N.S. Eksperimental'nye otsenki pogreshnosti izmerenii vertikal'nykh geomagnitnykh gradientov v stratosfere (Experimental evaluation of measurement errors of vertical geomagnetic gradients in the stratosphere). *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2007, Vol. 47, No. 4, pp. 543-547.
6. Tsvetkov Yu.P., Golovkov V.P., Kuznetsov V.D., Brekhov O.M., Pelle V.A. *Sposob vydeleniya sostavlyayushchikh induksii anomal'nogo magnitnogo polya Zemli. Patent na izobretenie № 2437125* (The way of separating the components of the anomalous magnetic field of the Earth. Russian Federation State Patent № 2437125). 20.12.2011, Official Bul. No. 35.
7. Tsvetkov Yu.P., Kuznetsov V.D., Golovkov V.P., Brekhov O.M., Pelle V. A., Krapivnyi A.V., Nikolaev N.S. Vydelenie anomal'nogo magnitnogo polya Zemli iz aerostatnykh magnitnykh s"emok na vysotakh 20-40 km (Selection of the anomalous magnetic field of the Earth from balloon magnetic surveys on the heights of 20-40 km). *Doklady akademii nauk*, 2011, Vol. 436, No. 2, pp. 262-266.
8. Tsvetkov Yu.P., Rotanova N.M., Kharitonov A.L. Povysotnaya struktura magnitnykh anomalii po gradientnym izmereniyam v stratosfere (Height structure of magnetic anomalies gradient measurements in the stratosphere). *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2004, Vol. 44, No. 3, pp. 412-418.
9. Chernikov S.P., Tsvetkov Yu.P., Brekhov O.M., Krapivnyi A.V., Nikolaev N.S. Komp'yuternaya model' dinamiki protsessa avtomaticheskogo razvertyvaniya aerostatnogo magnitnogo goradiometra (Computer model of the dynamics of the automated deployment process balloon magnetic gradiometer). *Datchiki i sistemy*, 2009, No. 6, pp. 20-23.
10. Shkol'nyi E.P., Maiboroda L.A. *Atmosfera i upravlenie dvizheniem letatel'nykh apparatov* (Atmosphere and the traffic control of aircrafts). Leningrad: Gidrometizdat, 1973, 307 p.
11. Korepanov V., Tsvetkov Yu. Gradient magnetometer system for balloons. *Proceedings of the 17th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, ESA SP-590, Sandefjord, Norway, 2005, pp. 443-448.
12. Nelson J.B., Marcotte D.V., Hardwick C.D. Comments on "Magnetic field gradients and their uses in the study of the Earth's magnetic field" of by Harrison and Southam. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1992, Vol. 44, pp. 367-370.
13. Webers W.A., Yu. Tsvetkov. The role of magnetic field data from the Earth's surface and from different balloon and satellite altitudes for deriving high quality analytical models of the internal magnetic field. *Proceedings of the 18th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, ESA SP-647, Netherlands, 2007, pp. 597-600.