

ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С БОРТА ВЫСОТНЫХ АЭРОСТАТОВ

Ю. П. Цветков, С. В. Филиппов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Рассмотрена новая методика выделения магнитных аномалий по данным аэростатных градиентных магнитных съёмок в стратосфере на длинномерной базе. Показано, что на измерительной базе длиной 6 км надёжно измеряются градиенты магнитных источников, расположенных вблизи подошвы земной коры. Сделан вывод, что аэростатные градиентные магнитные съёмки имеют важнейшее значение в изучении и моделировании структуры аномального магнитного поля в околоземном пространстве и открывают новые пути исследования глубинного строения земной коры.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00204).

Ключевые слова: стратосферные аэростаты, градиентные магнитные съёмки, аномальное магнитное поле, главное геомагнитное поле.

1. ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования магнитного поля Земли с использованием высотных аэростатов были начаты доктором физико-математических наук Ю. П. Цветковым по предложению доктора физико-математических наук А. Н. Пушкова. С 1980 г. отрабатывалась аппаратура, методика аэростатных градиентных магнитных съёмок и исследовались вопросы интерпретации их результатов. В этих работах принимали действенное участие Н. М. Ротанова, В. Д. Кузнецов, Т. Н. Бондарь, С. В. Филиппов, В. Г. Петров, Л. И. Яковлева, А. В. Пчелкин, О. П. Цветков и др., а также ряд организаций: Воздухоплавательный испытательный центр (Вольск), Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики (ДКБА), Специальное конструкторское бюро физического приборостроения (СКБ ФП) ИЗМИРАН, Московский авиационный институт (МАИ), Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Азово-Черноморский инженерный институт Донского государственного аграрного университета (Зерноград), ЗАО «Авгурь», ЗАО «Циркон», Научно-производственное предприятие «Тексма», ЗАО «ГлобалТел» и др.

2. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей фундаментальной проблемой геофизики является изучение внутреннего строения твёрдой оболочки Земли, служащей источником резервов для жизнедеятельности человечества, так и генератором природных

Цветков Юрий Павлович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, tsvetkov@izmiran.ru

Филиппов Сергей Витальевич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, sfilip@izmiran.ru

катастроф. Для решения этой проблемы успешно применяются методы, основанные на использовании естественных полей земной коры, в частности, аномального (корового) 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 съёмок, выполняемых, в основном, на высотах до трёх километров, а также спутниковых магнитных съёмок на высотах ~500 км. На первый взгляд, казалось бы, чем ближе к земной поверхности выполнены магнитные измерения, (маловысотные аэромагнитные съёмки), тем они несут более полную информацию о составе аномального МПЗ и свойствах магнитных источников. Но это справедливо для приповерхностных магнитных источников. Однако, имея в виду вертикальную мощность земной коры ~40 км, присутствие в данных аэромагнитных съёмок создаваемых самыми верхними частями земной коры локальных магнитных аномалий, величины которых вблизи поверхности Земли могут достигать 1500 нТл и более, являются помехой при интерпретации поля глубинных источников и эти аномалии необходимо исключать. При их исключении (фильтрации) математическими методами искажается не только амплитуда выделяемой региональной аномалии, но и смещается её местоположение. Аэромагнитные съёмки территории СССР, в основном, были завершены в середине 1970-х гг., когда не было надёжных глобальных аналитических моделей нормального МПЗ. Это отрицательно сказалось на выделении аномального МПЗ из аэромагнитных съёмок, в результате чего допущенные искажения нормального поля в выделенном аномальном МПЗ не оценены. Карта аномального МПЗ территории СССР [Карта..., 1974], построенная из аэромагнитных съёмок, по ряду причин (влияние локальных аномалий, неучтённого остатка нормального МПЗ, а также пренебрежение полями глубинных источников малоинтенсивных на поверхности Земли, но заметных и значимых в отсутствии локальных магнитных аномалий) приводит к искажениям региональной компоненты аномального МПЗ. Основными составляющими, формирующими магнитное поле земной коры в целом, являются региональные и длинноволновые магнитные аномалии, энергетический спектр которых включает длины волн от 50 до 3000 км.

Спутниковые же магнитные съёмки содержат в своём составе магнитные аномалии размером 500 км и больше, и они относятся к крупным региональным и длинноволновым магнитным аномалиям, которые предпочтительней использовать при решении задач глобальной тектоники Земли.

Но в патенте [Цветков и др., 2011а] показано, что для решения ряда геофизических задач принципиально необходимы магнитные съёмки на высотах 20...40 км, численно сопоставимыми с вертикальной мощностью земной коры. Аномальное МПЗ на этих высотах формируется с естественным осреднением локальных аномалий. Высота 20...40 км освоена стратосферными аэростатами. Выше велопаузы (~18 км) в атмосфере существуют устойчивые регулярные зональные воздушные течения, вместе с которыми стратосферный аэростат может совершать кругосветные полёты вдоль географических параллелей.

В ИЗМИРАН впервые предложена идея аэростатных градиентных магнитных съёмки на длинномерной измерительной базе, вертикально ориентированной по полю силы тяжести, для этого создан прибор — аэростатный магнитный градиентометр (АМГ), выполнен ряд градиентных магнитных измерений на аэростатах, данные которых использованы в решении задач геомагнетизма. При этом данные аэростатных магнитных измерений используются как эталон при анализе других магнитных данных. Это следует из того, что АМГ состоит из трёх независимых, разнесённых друг от друга в пространстве магнитометров, данные которых идентичны и отличаются только лишь на ожидаемую величину пространственного градиента.

Реализация наших предложений имеет большое значение для совершенствования моделей аномального АМП, оценки погрешности аналитических глобальных моделей главного МПЗ, уточнения глубинного строения земной коры и глубин залегания магнитоактивных источников, магниторазведки месторождений полезных ископаемых на глубоких горизонтах земной коры, и пр. Всё вышесказанное имеет наибольшую ценность для арктических регионов Земли, для которых вопросы внутреннего строения земной коры и характеристики поля внутриземного происхождения, изучены недостаточно полно. Это объясняется присутствием в арктической среде больших величин вариаций внеземного магнитного поля. Но градиентные измерения малочувствительны к этим вариациям, что существенно ухудшает результат съёмки.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Важным параметром аномального МПЗ, служащим для изучения структуры земной коры являются его градиенты [Hood, Teskey, 1989] и особенно вертикальные градиенты как наиболее чувствительные к глубинам залегания магнитных источников [Цирульский, Майер, 1986]. Однако получение вертикальных градиентов аномального МПЗ от источников, расположенных на нижних горизонтах земной коры, эффективных для изучения её глубинного строения, является мировой проблемой, до сих пор не решённой на практике [Nelson et al., 1992]. Градиенты магнитных аномалий, создаваемых глубинными источниками, с развитием методов интерпретации позволят более детально исследовать строение этих источников, определять нижнюю границу их залегания в земной коре.

Нами был выполнен ряд градиентных магнитных съёмок с борта стратосферных аэростатов, дрейфующих на высоте 20...40 км. Для получения вертикальных градиентов аномального МПЗ от глубинных источников используется аэростатный магнитный градиентометр (АМГ) с длинномерной (6 км) измерительной базой, ориентированной вдоль вертикали по полю силы тяжести [Цветков, 1993, Цветков и др. 2007] (рис. 1).

Как будет отмечено в конце настоящего раздела, этим решается проблема измерения градиентов поля глубинных источников. Тросонакопитель системы развёртывания градиентометра ячеистого типа вмещает 6 км троса диаметром 3...4 мм, выполняет функцию распределения магнитометров в пространстве.

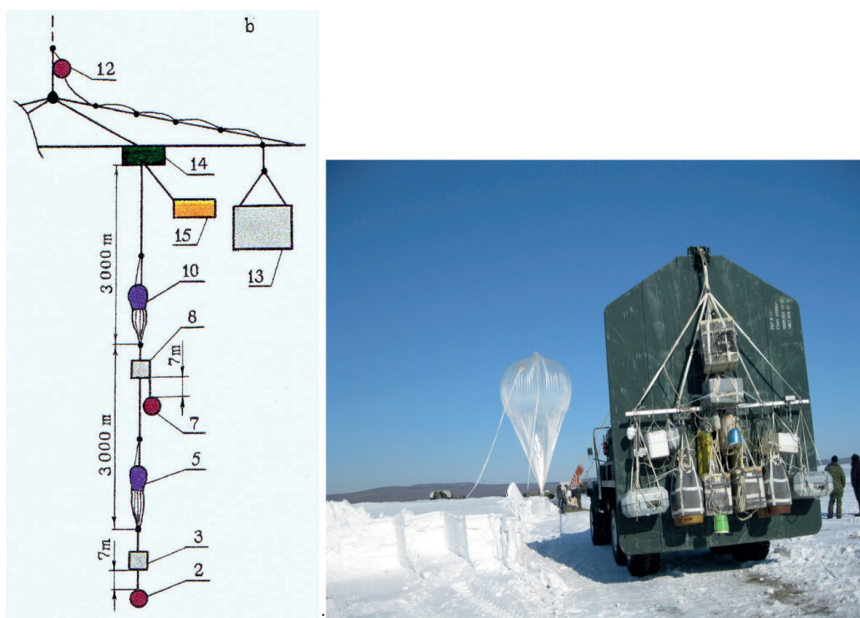


Рис. 1. Аэростатный магнитный градиентометр перед стартом в стратосферу: 3, 8, 13 — магнитометры; 2, 7, 12 — датчики магнитометров; 5, 10, 15 — парашюты

При этом разработана компьютерная модель процесса развёртывания градиентометра, позволившая оптимизировать параметры системы [Черников и др., 2009]. Развёртывание осуществляется автоматически в два этапа — на высоте 3 и 6 км. Измерительная система размещается в трёх контейнерах, равномерно распределяемых в пространстве вдоль вертикали. Каждый контейнер включает протонный магнитометр, навигационный GPS-приёмник (Global Positioning System), бортовую цифровую вычислительную машину (ЭВМ) сбора и пакетирования информации, модем ГлобалТел для передачи научной информации в сеть Интернет [Николаев и др., 2008; Цветков, Беликова, 2002]. Необходимую точность измерения магнитных градиентов при использовании тросовой системы обеспечивают протонные магнитометры, датчики которых нечувствительны к своему азимутальному положению. Приборная точность измерения индукции скаляра МПЗ составляла 0,5 нТл, вертикального градиента — 0,17 нТл/км. В случаях отклонений измерительной базы градиентометра от вертикали при дрейфе в возмущённых воздушных течениях (зафиксированы отклонения от вертикали до 1500 м при шестикилометровой длине базы градиентометра), вводится поправка, вычисляемая по данным навигационных GPS-приёмников и аналитической модели главного МПЗ [Цветков и др., 2007]. Измерения МПЗ, выполняемые тремя разнесёнными в пространстве магнитометрами, позволяют получать из дифференциалов истинные градиенты МПЗ. По сути, на длиномерной измерительной базе мы измеряем дифференциалы поля, но методика с использованием трёх магнитометров позволяет преобразовывать дифференциалы в градиенты, и в тексте статьи мы не делаем различия между этими понятиями. Аэростатный маг-

нитный градиентометр прошёл комплекс испытаний на обеспечение безопасной его эксплуатации. Первоначально были проведены испытания на привязном аэростате, а затем на свободном аэростате с имитацией обрыва несущего троса на высоте 15 км. Испытания прошли успешно, после чего Генеральным конструктором ДКБА (ведущая организация по аэростатам) было дано официальное разрешение на эксплуатацию АМГ на отечественных аэростатах, оригинал разрешения хранится в Воздухоплавательном испытательном центре. Аэростатные градиентные магнитные съёмки преимущественно были проведены в районе простирания Камско-Эмбенской спутниковой магнитной аномалии и по маршруту: Камчатка-Поволжье. Выполненные аэростатные градиентные магнитные съёмки на длинномерной измерительной базе обладают мировой новизной.

По данным натурных экспериментов, используя методику [Цветков и др., 2004] были вычислены глубины залегания источников поля. По одному из маршрутов полёта аэростата таким путём были вычислены глубины залегания источников АМП, оказавшиеся лежащими в пределах 8...39 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.

4. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ИЗ АЭРОСТАТНЫХ СЪЁМОК ПО ПРОТЯЖЁННЫМ МАРШРУТАМ

Полученные на аэростатах и спутниках магнитные данные позволяют использовать их при разработке строгой модели аномального МПЗ для всего околоземного пространства, необходимой для изучения строения земной коры в целом. Здесь встаёт вопрос о точности выделения аномального МПЗ из съёмок по протяжённым маршрутам.

Стратосферные аэростаты являются летательными аппаратами разового применения, поэтому для их рационального использования желательно иметь траектории полётов максимально возможной протяжённости. В связи с этим возникает проблема выделения аномального МПЗ из съёмок по протяжённым маршрутам (возможно, кругосветным). Решение этой проблемы будет способствовать получению характеристик аномального МПЗ, позволяющих реализовать метод построения адекватной магнитной модели земной коры. Задача выделения магнитных аномалий из магнитных съёмок по протяжённым маршрутам может быть решена с использованием глобальных аналитических моделей главного (нормального) МПЗ. Однако решение задачи таким путём требует оценки погрешности применённых для этого моделей главного МПЗ и разработки методов учёта этих погрешностей в случае их обнаружения. В последние годы векторные магнитные съёмки на ИСЗ, по которым строятся модели главного МПЗ, выполнялись практически непрерывно (спутники Oersted, CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), Swarm и др.). Однако генерируемые модели по спутниковым данным могут иметь ошибки за счёт неучтённого

влияния магнитного поля внеземного происхождения, недоучёта изменчивости векового хода геомагнитного поля и прочими причинами, вклад которых досконально учесть не удаётся, хотя процесс снижения погрешностей непрерывно совершенствуется. Следовательно, глобальные аналитические модели главного МПЗ требуют оценки погрешностей этих моделей независимыми методами. Использование для этого магнитных обсерваторий малоэффективно ввиду присутствия в их данных плохо контролируемых магнитных полей коровых источников, которые являются помехой для оценки погрешности модели. Задача решается путём применения предложенного авторами нового способа внесения поправок за погрешности применяемых моделей [Цветков, 2011б]. Предложенная оценка погрешностей моделей основывается на сравнении измеренного МПЗ (с контролируемым внешним МПЗ) в местах, где нет значимых магнитных аномалий, с величинами главного МПЗ, синтезированными по коэффициентам проверяемой модели. Найти такие места по имеющимся материалам, например, картам аномального МПЗ [Карта..., 1974], весьма проблематично, так как эти карты построены в основном по аэромагнитным съёмкам и, ввиду недостатков, отмеченных во введении, в них заметно искажена региональная составляющая магнитных аномалий. Но найти такие места можно в случае измерения вертикальных градиентов МПЗ на стратосферных аэростатах, где датчики магнитометров можно разносить вдоль вертикали на расстояние в несколько километров. Нами на профиле градиентов такие места были найдены по методике, приведённой в статье [Цветков и др., 2015]. Результаты расчётов показали, что если на профиле градиентов, полученного на высоте 30 км на протяжённостях 100 км нет, на базе 6 км дифференциалов, более чем 1,5 нТл, то такие места следует считать неаномальными. Для разности магнитных полей: измеренное – синтезированное по модели главного МПЗ, в найденных местах с отсутствием значимых магнитных аномалий отклонения ординат от нулевого уровня показывают величины ошибок модели главного МПЗ. Так как данные вертикальных магнитных градиентов не содержат значимых полей внешних источников [Учёт..., 1984], то влиянием внешнего поля на результат измерения градиентов можно пренебречь. Следовательно, дифференциалы нормального МПЗ, получаемые по аналитическим моделям для точек, разнесённых на расстояние 6 км, не содержат заметной систематической погрешности этих моделей, как и моделей вековой вариации МПЗ. Это следует из того, что для источников, расположенных на глубинах свыше 3000 км, на таком относительно малом расстоянии между датчиками градиометра (6 км) эти погрешности практически идентичны и исключаются при вычислении дифференциалов. Данные вертикальных магнитных градиентов не содержат и значимых полей внешних источников, то вертикальный градиент исходного поля состоит из суммы градиентов нормального и аномального МПЗ. Вычитая из анализируемого профиля градиент главного МПЗ, синтезированного по модели, получаем профиль вертикальных градиентов аномального МПЗ.

Для получения профиля аномального МПЗ, из измеренного магнитного профиля полного поля вычитаем главное поле с внесёнными выше поправками, и поле внешнего источника, находим искомый профиль.

5. АНАЛИЗ ПЕРЕСЧЁТОВ АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПРИЗЕМНОГО УРОВНЯ ВВЕРХ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Рассмотрим вопрос — достаточно ли иметь значения аномального МПЗ на поверхности Земли, чтобы синтезировать аномальное МПЗ на любом высотном уровне относительно земной поверхности?

Наземные данные и методы анализа потенциальных полей позволяют получить значения аномального МПЗ на любой высоте $h > 0$ околоземного пространства, но такой пересчёт поля вверх от поверхности Земли до сих пор не увенчался успехом. Для выяснения причин неудачи было выполнено сравнение исходных данных аномального МПЗ, представленного картой [Карта..., 1974] (как и все аналогичные карты, в основном, построены по данным маловысотной аэромагнитной съёмки и их данные обычно используются для пересчёта поля вверх), с данными, полученными из аэростатных съёмок. Анализ исходных данных основывался на том, что на каком-либо высотном уровне аномальное МПЗ является суперпозицией полей источников, поэтому осреднение приземных данных действует на поле примерно так же, как пересчёт на высоту. Сравнились результаты осреднения наземных и аэростатных данных аномального МПЗ. В стратосферных профилях аномального МПЗ, экспериментально полученных в 2007, 2008 и 2013 гг., средние величины положительных магнитных аномалий на высоте 30 км в пределах профиля оказалось в четыре раза больше отрицательных, чем аналогичное соотношение для аэромагнитных профилей, полученных для малых высот. Таким образом, при осреднении данных взаимная компенсация положительных и отрицательных аномалий на маловысотном профиле в его пределах проявляется значительно сильнее, чем для случая стратосферного профиля. Следовательно, карты аномального МПЗ не несут полной информации об источниках, расположенных во всей мощности земной коры, а главным образом отражают процессы, происходящие в приповерхностном слое и в меньшей мере глубинные процессы. В подтверждение этого положения был выполнен вейвлет-анализ наземного (карта) и аэростатного профилей аномального МПЗ. Анализ показал, что наземный профиль содержит гармоники аномального МПЗ максимально составляющие 130 км, а аэростатный — до 600 км при протяжённости профилей порядка 1000 км. Итак, наземные данные не несут информацию о крупных региональных аномалиях, как правило, формирующихся из поля глубинных источников. По нашему мнению, по вышеназванным причинам предшественниками не удалось правильно пересчитать аномальное МПЗ, полученное из маловысотных съёмок, 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). Этот важнейший результат, полученный экспериментальным путём, по-видимому, объясняет многие типовые вопросы, возникающие при изучении феномена аномального МПЗ.

Геомагнитные поля на высотах 30; 400 км и на поверхности Земли приведены на рис. 2. На этом рисунке виден процесс формирования спутниковой Камско-Эмбенской магнитной аномалии из аномального МПЗ, полученного на аэростате, и этот процесс не может быть объяснён наземными данными.

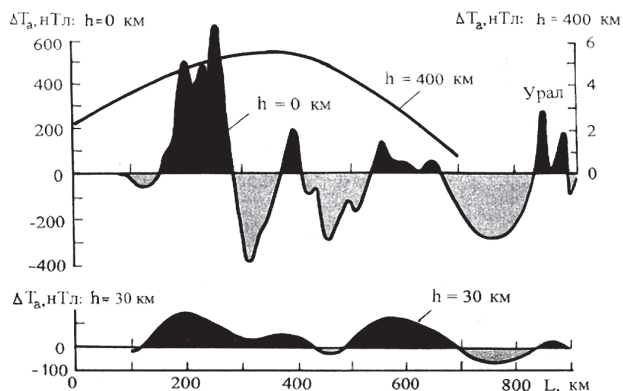


Рис. 2. Аномальное МПЗ на высоте 0; 30 и 400 км

В подтверждение сказанного проведём анализ глобальной аналитической модели постоянного МПЗ ЕММ/720 (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/EMM>), построенной по спутниковым и наземным данным и развитая до 720-й сферической гармоники. Очевидно, при таком количестве гармоник ($n = m = 720$), эта модель содержит и главное, и аномальное МПЗ и включает гармоники вплоть до длины волны, равной ~ 60 км. В идеальном случае модель ЕММ/720 для высоты 30 км должна представлять магнитное поле идентичное аэростатным магнитным данным, полученным на высоте ~ 30 км. Сопоставим синтезированные по этой модели значений постоянного МПЗ на высоте 30 км с аэростатными данными, что позволяет оценить качество аномального МПЗ на высоте 30 км, представленного моделью ЕММ/720 [Цветков и др., 2014] Аномальное МПЗ, выделенное вдоль маршрута аэростатной съёмки по методике [Цветков и др., 2011а, б] имеет среднеквадратическое значение, равное 54,8 нТл. Разность же на высоте 30 км модельного (ЕММ/720) и измеренного на аэростате магнитных полей (ошибки модели) имеет среднюю величину, составляющую 70 % от среднеквадратического значения аномального МПЗ по профилю. Итак, показана несостоятельность модели ЕММ/720, которая с недопустимыми ошибками представляет аномальное МПЗ на высоте ~ 30 км, по крайней мере, в районе проводимых аэростатных экспериментов.

Улучшенные модели могут быть построены при совместном использовании аэростатных градиентных и спутниковых магнитных данных. Построенная таким образом модель постоянного МПЗ, развитая до 720-й сферической гармоники, будет нести надёжную информацию об аномальном МПЗ, и о глубинной магнитной структуре земной коры.

ВЫВОДЫ

1. Доказано, что аэростатный магнитный градиентометр с измерительной базой длиной 6 км надёжно измеряет вертикальные градиенты магнитного поля Земли, источники которых расположены на всех глубинах земной коры вплоть до её нижней кромок.

2. Разработан новый метод определения ошибок глобальных аналитических моделей главного магнитного поля Земли.
3. Полученное низкое соотношение величин положительных и отрицательных магнитных аномалий приземной реализации по сравнению с аэростатной, показывает возможную причину неудач пересчёта наземного аномального магнитного поля Земли вверх от поверхности Земли и показывает неприемлемость такого пересчёта для получения повысотной структуры аномального магнитного поля Земли.
4. Аэростатные градиентные магнитные данные следует рекомендовать взамен наземных для создания улучшенных моделей постоянного магнитного поля Земли, развитых до $n = m = 720$ сферических гармоник.
5. Аэростатные градиентные магнитные съёмки на стратосферных высотах имеют важное значение в изучении и моделировании структуры аномального магнитного поля Земли в околоземном пространстве и открывают новые пути исследования глубинного строения земной коры.

ЛИТЕРАТУРА

- [Карта..., 1974] Карта аномального магнитного поля территории СССР. Масштаб 1:2 500 000 / Отв. ред. З. А. Макарова. М.: ГУГК, 1974. 16 л.
- [Николаев и др., 2008] 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.
- [Учёт..., 1984] Учёт временных вариаций при проведении морской магнитной съёмки / Под. ред. В. Н. Луговенко. М.: ИЗМИРАН, 1984. 303 с.
- [Цветков, 1993] Цветков Ю. П. Исследование аномального магнитного поля Земли на стратосферных высотах // Геомагнетизм и аэронавигация. 1993. Т. 33. № 6. С. 159–164.
- [Цветков, Беликова, 2002] Цветков Ю. П., Беликова М. А. Устройство для получения магнитных градиентов поля глубинных источников земной коры // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 4. С. 570–572.
- [Цветков и др., 2004] Цветков Ю. П., Ротанова Н. М., Харитонов А. Л. Повысотная структура магнитных аномалий по градиентным измерениям в стратосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 44. № 3. С. 412–418.
- [Цветков и др., 2007] Цветков Ю. П., Брехов О. М., Филиппов С. В. и др. Экспериментальные оценки погрешности измерений вертикальных геомагнитных градиентов в стратосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47. № 4. С. 543–547.
- [Цветков и др., 2011а] 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. Оpubл. Бюл. № 35. 20.12.2011.
- [Цветков и др., 2011б] Цветков Ю. П., Кузнецов В. Д., Головков В. П., Брехов О. М. и др. Выделение аномального магнитного поля Земли из аэростатных магнитных съёмок на высотах 20...40 км // Доклады академии наук. 2011. Т. 436. № 2. С. 262–266.

- [Цветков и др., 2014] *Цветков Ю. П., Брехов О. М., Бондарь Т. Н., Филиппов С. В., Петров В. Г., Цветкова Н. М., Фрунзе А. Х.* Оценки точности некоторых глобальных аналитических моделей постоянного магнитного поля Земли с помощью данных градиентных магнитных съёмки на стратосферных высотах // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54. № 2. С. 283–288.
- [Цветков и др., 2015] *Цветков Ю. П., Брехов О. М., Бондарь Т. Н., Цветкова Н. М.* Особенности геомагнитного поля, выявленные по градиентным магнитным измерениям на стратосферных высотах // *Геомагнетизм и аэрономия* 2015. Т. 55. № 12. С. 130–138.
- [Цирульский, Майер, 1986] *Цирульский А. В., Майер В. И.* Об интерпретации повысотных аэромагнитных наблюдений // *Физика Земли*. 1986. № 5. С. 76–82.
- [Черников и др., 2009] *Черников С. П., Цветков Ю. П., Брехов О. М., Крапивный А. В., Николаев Н. С.* Компьютерная модель динамики процесса автоматического развёртывания аэростатного магнитного горадиентометра // *Датчики и системы*. 2009. № 6. С. 20–23.
- [Hood, Teskey, 1989] *Hood P. J., Teskey D. J.* Aeromagnetic Gradiometer Program of the Geological Survey of Canada // *J. Geophys.* 1989. No. 54. P. 1012–1022.
- [Nelson et al., 1992] *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. V. 44. P. 367–370.

GEOMAGNETIC FIELD INVESTIGATION FROM A BOARD OF HIGH-ALTITUDE BALLOONS

Yu. P. Tsvetkov, S. V. Filippov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

The new technique of magnetic anomalies determination on the base of balloon gradient magnetic measurement in a stratosphere is considered. It is shown that on 6 km measuring base, gradients of the magnetic sources located in the deep of a crust are reliably measured. The conclusion is drawn that balloons gradient magnetic survey is essential in studying and modeling of a structure of an abnormal magnetic field in near-earth space and open new ways of research of a deep structure of a crust.

Keywords: stratospheric balloons, gradient magnetic survey, abnormal magnetic field, main geomagnetic field.

Tsvetkov Yuriy Pavlovich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences, tsvetkov@izmiran.ru

Filippov Sergey Vitalievich — head of laboratory, PhD, sfilip@izmiran.ru