

Отклонения положения измерительной базы градиентометра при его использовании на подспутниковых орбитах

Ю.П. Цветков¹, О.М. Брехов², Е.М. Тейменсон³, Н.С. Николаев²,
А.В. Крапивный², А.В. Пчелкин¹

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН). 142190, г.Троицк, М.О. ИЗМИРАН.*

E-mail: tsvetkov@izmiran.ru

² *Московский авиационный институт (МАИ). E-mail: obrekhov@mail.ru*

³ *Российско-американское совместное предприятие "Химия и информационные технологии" ("ХИМИТ", г. Череповец). E-mail: brothers@mail.tchercom.ru*

Предложено зондирование Земли проводить комплексно: и на спутниках, и ближе к Земле - на аэростатах (подспутниковые орбиты). Наиболее эффективны съемки градиентов геофизических полей на подспутниковых орбитах. В этом случае можно сепарировать поля по удаленности их источников от точки наблюдения и выполнить надежную их геофизическую интерпретацию. Для этого в ИЗМИРАН и МАИ разработан аэростатный градиентометр, который имеет двухступенчатую измерительную базу общей длиной 6 км, ориентированную вдоль вертикальной линии посредством действия силы тяжести. Градиентометр имеет три приборных контейнера, два из которых спущены вниз от корзины аэростата один за другим через 3 км. Такой градиентометр на высотах 20-40 км может быть использован в различных областях знаний в науках о Земле, например, в изучении физических полей Земли, исследованиях по физике и химии высоких слоев атмосферы, в решении современных проблем дистанционного зондирования Земли, в том числе для изучения глубинного строения земной коры с помощью GPS-приемников изучены отклонения положения измерительной базы градиентометра относительно вертикальной линии в процессе дрейфа аэростата. В двух полетах аэростатов в процессе его дрейфа получены отклонения положения нижнего контейнера относительно вертикальной линии, проходящей через верхний контейнер, и оценена стабильность действующей длины измерительной базы градиентометра (проекция измерительной базы на вертикальную линию). При длине измерительной базы равной 6 км отклонения нижнего контейнера от вертикальной линии, проходящей через верхний контейнер, не превышают 500 м. Однако, в отдельные моменты эти отклонения могут достигать, как было получено в экспериментах, ~1500 м. Время существования отклонения составляет около 20 минут, после чего система вновь приобретает относительно невозмущенное состояние. Приводятся графики рассматриваемых отклонений. Полученные величины отклонений используются как поправки при обработке данных. В результате теоретически и практически показана возможность использования аэростатного градиентометра с двухступенчатой измерительной базой общей длиной 6 км для проведения разнообразных геофизических научных исследований.

Ключевые слова: стратосферный аэростат, магнитный градиентометр, измерительная база, отклонения.

Введение

В промышленно развитых странах земного шара основные программы спутниковых исследований первоначально опробуются на стратосферных аэростатах (см. отчет НАСА: «Revised Balloon Report, Working draft as of December, 20, 2008»). Это диктуется тем, что запуски стратосферных аэростатов стоят в десятки раз меньше, чем запуски спутников. При этом программа аэростатных исследований учитывает тот факт, что многие вопросы исследования Земли, в частности ее зондирование, целесообразно проводить комплексно: и на спутниках, и ближе к Земле – на аэростатах (подспутниковые орбиты).

В России старты аэростатов для исследования геомагнитных полей и космических лучей выполняются на базе Воздухоплавательного центра «Волга» (г. Вольск, Саратовской обл.). В атмосфере на высотах 20-40 км существуют регулярные зональные воз-

душные течения, которые используются для полетов аэростатов. В этих воздушных течениях аэростат способен совершать кругосветные полеты вдоль географических параллелей. Такой аэростат имеет высокую грузоподъемность (несет сотни килограмм полезного груза), имея габариты порядка 100 м. Габаритно-весовые характеристики аэростата позволяют выполнять с его помощью градиентные исследования на длинной измерительной базе. Многие исследования требуется выполнять одновременно на двух и более высотах стратосферы, существенно различающихся между собой. Одновременные исследования на разных высотах стратосферы повышают точность зондирования внутреннего строения Земли, целесообразны для изучения физических полей Земли, повышают значимость данных при исследованиях по физике и химии высоких слоев атмосферы и пр. В ИЗМИРАН и МАИ разработан аэростатный градиентометр, который имеет двухступенчатую измерительную базу общей длиной 6 км, ориентированную вдоль вертикальной линии посредством действия силы тяжести. Для решения ряда задач важным является исследование отклонений измерительной базы градиентометра от вертикали в процессе дрейфа аэростата. Изучению этого вопроса посвящена настоящая статья.

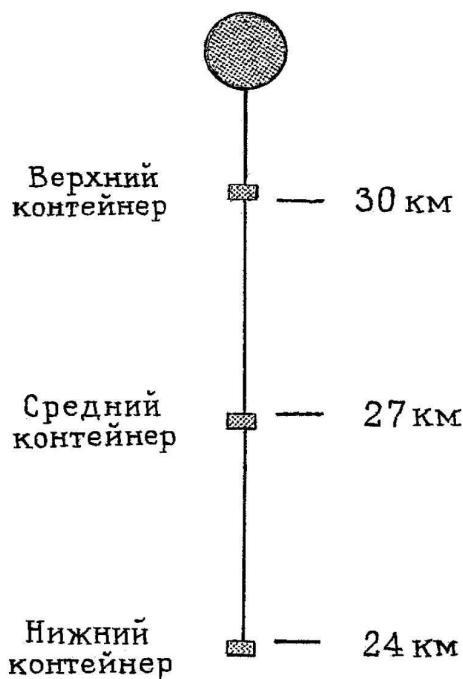


Рис. 1. Общий вид аэростата в полете и расположение контейнеров с научной аппаратурой

Экскурс в проблему земного магнетизма

В настоящее время фундаментальные задачи земного магнетизма, в частности, задачи зондирования внутреннего строения Земли, решаются на основе данных спутниковых магнитных съемок. Несмотря на непрерывное совершенствование методики и инструментальной базы таких съемок (пример тому проект “Swarm”), использование спутниковых данных для решения этих задач встречает определенные трудности. Это связано с тем, что датчики магнитометров в этих съемках равнозначно воспринимают составляющие геомагнитного поля, создаваемые всеми его физическими источниками, и эти поля при существующей методике спутниковых магнитных съемок надежно разделить

практически невозможно. По этой причине существуют проблема состава спутникового аномального магнитного поля, обычно используемого для изучения внутреннего строения Земли. Из-за достаточно большой высоты спутниковых магнитных съемок (~500 км), гармоники аномального поля с длинами волн меньше чем 500-700 км не достигают значимых величин над уровнем шумов, что не позволяет построить подробную модель внутреннего строения земной коры по спутниковым магнитным данным. Однако в поле градиентов действие магнитных источников можно ограничить сферой, радиус которой примерно равен 10-ти кратному размеру измерительной базы градиентометра, вне которой градиенты геомагнитного поля не достигают значимых величин. Следовательно, при длине измерительной базы 6 км возможно уверенно обнаружить сигналы источников, удаленных до 60 км от точки наблюдения. Так, на высоте съемки 30 км, значимые величины полей магнитных градиентов создаются источниками, заключенными в пределах земной коры вплоть до ее подошвы, а градиенты полей магнитосферных, ионосферных источников и полей, создаваемых различными геофизическими процессами, источники которых удалены свыше этого расстояния, воспринимаются как шумы. Таким образом, можно сепарировать поля по удаленности их источников от точки наблюдения и выполнить надежную их геофизическую интерпретацию. Отметим, что аэромагнитные съемки, ввиду низкой высоты их проведения, не позволяют выполнить зондирование глубоких горизонтов земной коры.

Возмущения подвески аэростата в процессе взлета аэростата

При измерении параметров какого-либо физического поля в стратосфере необходимо знать положение измерителей в пространстве. При взлете аэростата и в его дрейфе выполнены измерения азимутального положения подвески аэростата.

В этом случае азимутальное положение подвески аэростата в натуральных условиях изучалось начиная с момента старта с помощью трехкомпонентных феррозондовых магнитометров, датчики которых были жестко связаны с тягой, несущей балку аэростата с аппаратурой. Азимутальное положение датчиков магнитометра оценивалось относительно плоскости магнитного меридиана. Эксперимент показал, что стартовые возмущения нормализуются в течение 40 мин после достижения аэростатом потолка полета. Экспериментально показано, что в длительном горизонтальном полете аэростат вместе с подвеской медленно вращается с периодом 1-2 оборота в час [1].

Возмущения положения измерительной базы аэростатного градиентометра в процессе дрейфа аэростата

Аэростат во время своего дрейфа подвержен влиянию флуктуаций несущего воздушного течения, в результате чего ориентация положения измерительной базы градиентометра относительно вертикальной линии может нарушаться, что приводит к понижению точности измерений вертикальных градиентов. Этот вопрос исследовался теоретически и экспериментально. В практическом методе исследований каждый контейнер в своем составе содержал навигационные GPS-приемники и модемы скоростной передачи данных «ГлобалСтар», адаптированные к условиям эксперимента.

Оценим величины отклонения нижних контейнеров измерителей градиометра от вертикальной линии, проходящей через верхний контейнер. На рис. 3 дано положение триады приборных контейнеров и магнитных датчиков градиометра в процессе дрейфа аэростата. Пространственное положение оси измерительной базы градиометра относительно вертикальной линии рассмотрено в [2], где анализировался случай отклонений оси от вертикали за счет парусности спускаемой части градиометра при дрейфе в воздушном потоке с повысотной изменчивостью скорости. Обозначим этот случай как первый фактор влияния. Отклоняющая сила измерительной базы градиометра от вертикали за счет действия этого фактора вычислялась с использованием формулы:

$$P = \frac{SpV^2}{2g},$$

где S – объединенная площадь (парус) лобовой поверхности спускаемой части аппарата, ρ – плотность воздуха, V – приращение скорости ветра на длине измерительной базы. Исходя из приведенной формулы, в работе [2] показано, что отклонения измерительной базы не превышают 200 м при ее длине, равной 6000 м в летних полетах при низких (50 км/час) скоростях воздушного течения. В зимних условиях полета скорости потока в 3-4 раза выше и указанные отклонения за счет этого могут составлять порядка 600 м. Однако существует и другая причина, приводящая к отклонениям положения системы от вертикали (второй фактор влияния). Она обусловлена тем, что оболочка аэростата уравновешена в воздушном течении и в своем движении повторяет все нюансы воздушного течения. Подвеска градиометра, длиной 6000 м имеет период маятниковых колебаний порядка 150 с, следовательно, при приращениях скорости движения оболочки аэростата, последняя опередит положения спущенных вниз контейнеров и произойдет нарушение вертикальности положения измерительной базы градиометра с последующим его восстановлением. Положение оси измерительной базы градиометра относительно вертикальной линии в процессе дрейфа аэростата было проверено экспериментально в наиболее неблагоприятный, холодный период года с помощью навигационных GPS-приемников. Натурный эксперимент состоялся 3 ноября 2005 г. В этом эксперименте градиометр содержал три измерительных контейнера, равномерно разнесенных по вертикали в пределах ~5,4 км.

В процессе полета аэростата определялись пространственные координаты положения всех научных контейнеров и действующая длина измерительной базы градиометра, соответствующая проекции измерительной базы на вертикаль в моменты выполнения синхронных измерений. Погрешности определения координат для GPS-приемников оценены величиной ~10 м.

На рис. 2 показана текущая разность высот между верхним и нижним контейнерами. На рис. 3 приведены величины проекций на горизонтальную плоскость отклонений контейнеров друг от друга (годографы векторов измерительной базы).

Аэростатный эксперимент показал, что величина взаимного отклонения контейнеров при длине измерительной базы равной 5,4 км в основном находится в пределах 500 м (соответствует ~5° отклонения базы от вертикальной линии), но в отдельные периоды (на рис. 2 и 3а отмечено знаком *) достигала 1300 м (~1° за счет чего действующая длина измерительной базы сокращалась. Заметный тренд относительного смещения контейнеров

объясняется влиянием первого фактора, приводящему к горизонтальному сносу спущенного вниз контейнера из-за влияния разных скоростей ветра в средах нахождения верхнего и нижнего контейнеров.

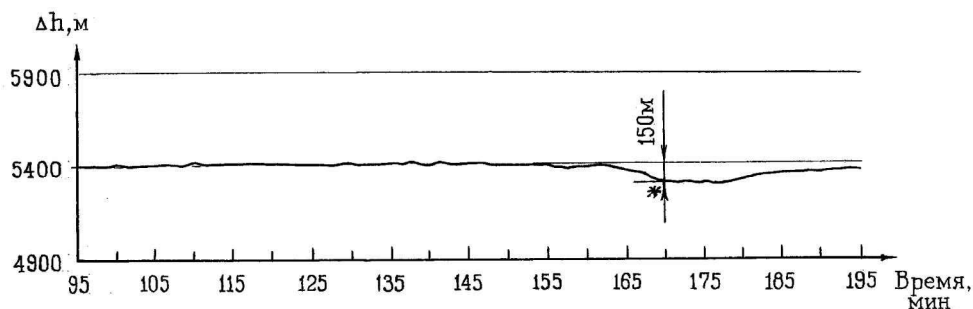


Рис. 2. Текущая разность высот между верхним и нижним контейнерами. Знаком (*) отмечен момент, соответствующий максимальному отклонению измерительной базы градиентометра от вертикали (1-ый полет)

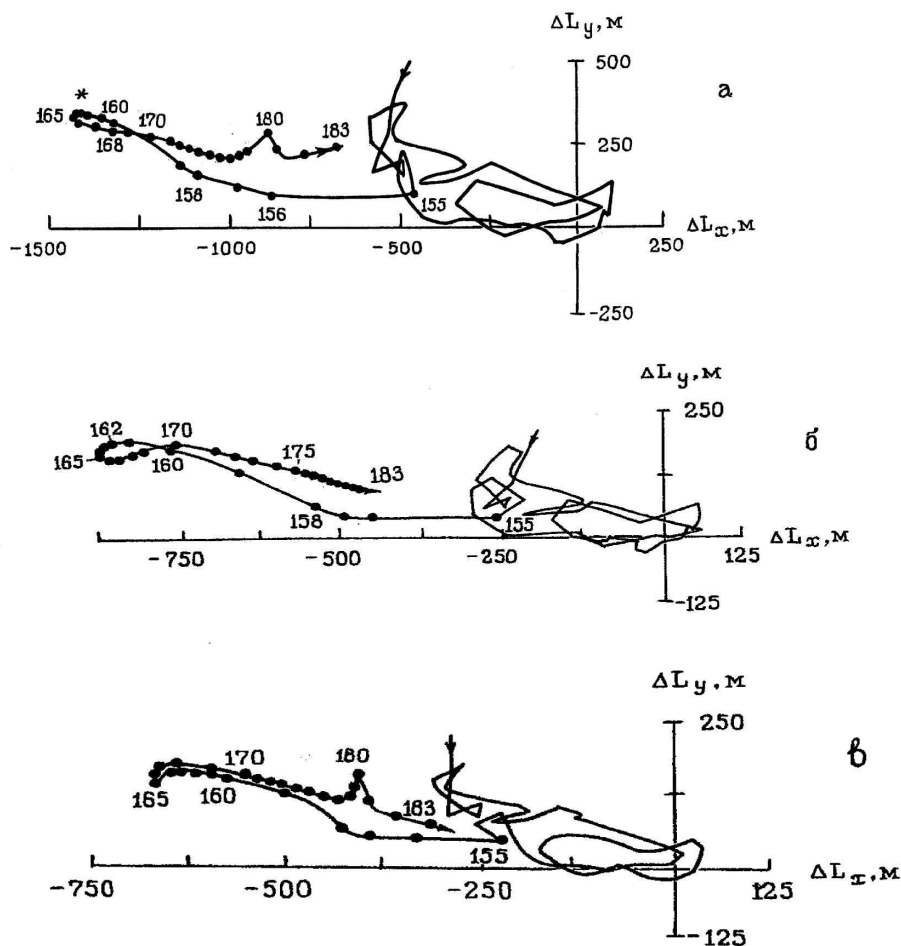


Рис. 3. Величины проекций на горизонтальную плоскость отклонений контейнеров друг от друга (годографы векторов измерительной базы): нижний – верхний (а); средний – верхний (б); нижний – средний (в). Вышележащий контейнер в паре является точкой отсчета координат. Цифры на кривых - текущие минуты дрейфа. * - То же, что на рис. 2. (1-ый полет)

Сопоставление кривых на рис. 3 а, б, в показывает, что наклон измерительной базы равномерен по всей ее длине и источником возмущения наклона является неравномерное движение оболочки аэростата в процессе дрейфа в воздушном течении. При импульсном ускорении движения оболочки аэростата все спущенные вниз контейнеры выстраиваются

вдоль линии, отклоненной от вертикали пропорционально величине скоростного импульса. Например, как видно из рис. 3а (между минутами 155 и 183), произошло опережение оболочки с верхним контейнером от положения, занимаемого в случае ее равномерного движения, и отставание среднего и нижнего контейнеров от верхнего. Возмущенное состояние положения измерительной базы наблюдалось в течение ~30 мин., отклонения положения измерительной базы от вертикали достигали величины 1300 м, после которого система вернулась в исходное вертикальное состояние.

Новый эксперимент был проведен 23 декабря 2008 г. Горизонтальный полет на высоте 30 км при скорости дрейфа 170 км/час проходил в течение 4,5 часов. Результаты этого полета (для пары верхний-средний контейнеры, приведены на рис. 4 и рис. 5. Здесь также заметен тренд в положении спущенного вниз контейнер (~300 м) за счет первого фактора влияния. За счет отклонений положения нижнего контейнера относительно верхнего, наблюдаются изменения высотных уровней контейнеров в пределах 20 м. Наблюдаются и медленные изменения этих уровней на ~30 м. В принципе, этот полет подтвердил результаты предыдущего (см. рис. 2 и рис. 3).

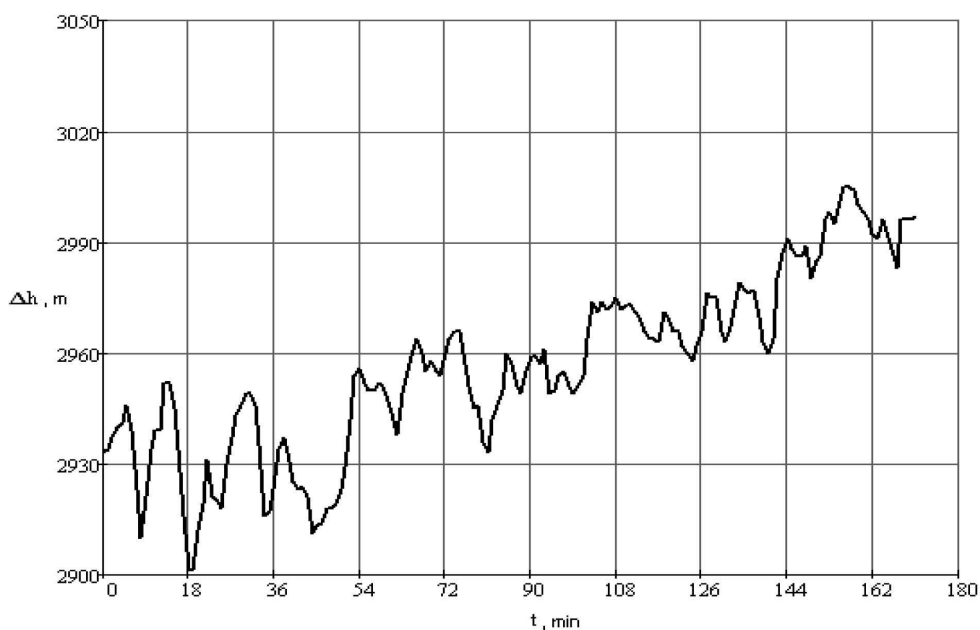


Рис 4. Текущая разность высот между верхним и средним контейнерами (2-ой полет)

Итак, впервые получены экспериментальные оценки отклонений оси измерительной базы градиометра от вертикали при возмущениях несущего воздушного течения и динамика разности высот между контейнерами в процессе дрейфа аэростата. Для холодного времени года отклонения при шестикилометровой длине измерительной базы в большинстве случаев лежат в пределах 500 м, а в аномальных случаях могут достигать 1300 м. Для теплого времени года эти отклонения следует ожидать в 3-4 раза меньшими. С развитием нового направления воздухоплавания – созданием аэростатов сверхдавления, для которых полет может длиться многие месяцы, при использовании градиометров с длинной базой [Nock K.T., Heum M.K., Aaron K.M. Global constellations of stratospheric satellites. <http://www.gaerospace.com>], возможны чередования зимних и летних условий полета с соответствующими им вариантами отклонений контейнеров.

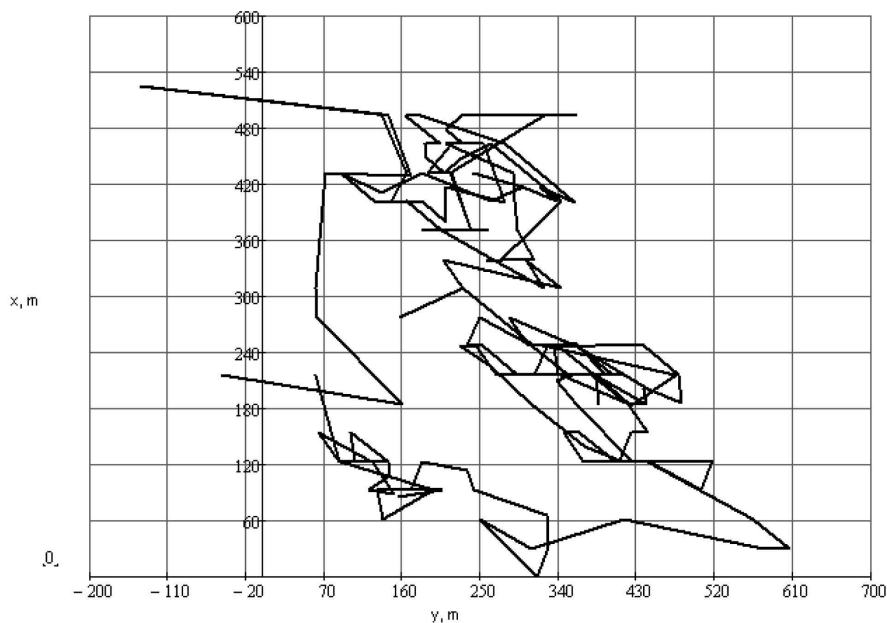


Рис. 5. Величины проекций на горизонтальную плоскость отклонений контейнеров друг от друга (годографы векторов измерительной базы) для пары верхний-средний контейнеры (2-ой полет)

Выводы

1). Создан и испытан аэростатный градиометр, включающий три приборных контейнера, один из которых расположен на основной подвеске аэростата, второй и третий спущены от первого вниз на 3 км и 6 км соответственно. Ориентация положения контейнеров вдоль вертикальной линии осуществляется под действием поля силы тяжести.

2). Расчетным и экспериментальным путями изучены механические возмущения подвески аэростата в процессе взлета и дрейфа аэростата. В процессе дрейфа аэростата возмущения несущего воздушного течения могут приводить к отклонениям измерительной базы градиометра от вертикальной линии до 15 угловых градусов. Это соответствует отклонению на 1300 м нижнего контейнера относительно верхнего (в горизонтальной проекции).

Список литературы

1. Цветков Ю.П. К возможности измерения элементов магнитного поля Земли на борту дрейфующих аэростатов. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1974. Т. 14, № 4, С. 721-724.
2. 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.

Disturbances of the position of measuring base of the aerostat gradiometer during a drift of the stratospheric balloon

**Yu.P. Tsvetkov¹, O.M. Brekhov², E.M. Teymenson³, N.S. Nikolaev²,
A.V. Krapivny², A.V. Pchelkin¹**

¹*Pushkov Institute of Terrestrial, Magnetism, Ionosphere and Radio Waves Propagation
of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN).*

142190, Troitsk, Moscow Region. E-mail: tsvetkov@izmiran.ru

²*Moscow Aviation Institutes (MAI). E-mail: obrekhov@mail.ru*

³*Russian-American Joint Venture " Chemistry and Information Technologies "
("ChemMIT", Cherepovets). E-mail: brothers@mail.tchercom.ru*

It is suggested soundings, to carry out in a complex: and by satellites, and close by the Earth - aboard balloons (under satellite orbits). Surveys of gradients of geophysical fields at under satellite orbits are most effective. It is possible in this case to separate fields by means of remoteness of their sources from a point of observation and to execute their reliable geophysical interpretation. For this purpose at IZMIRAN and MAI it is developed a stratospheric balloon gradiometer, which has two-level measuring base in the general length of 6 km, oriented along a vertical line by means of gravity. The gradiometer has three instrument containers, two of which are lowered downwards from a basket of a stratospheric balloon one behind another through 3 km. Such gradiometer at altitudes of 20-40 km can be used in various fields of knowledge: in sciences about the Earth, for example, in studying physical fields of the Earth, researches in the physics and chemistry of high layers of an atmosphere, in the solution of modern problems of remote sounding the Earth, including for studying a deep structure of the Earth's crust. By means of GPS-receivers deviations of position of measuring base of gradiometer concerning a vertical line in process of drift of a balloon are studied. In two flights of stratospheric balloons during their drift deviations of position of the lower container concerning the vertical line which are passing through the upper container are received, and a stability of the operating length of measuring base of gradiometer (a projection of measuring base to a vertical line) is estimated. At the length of measuring base equal 6 km of deviations of the lower container from the vertical line which are passing through the upper container, do not exceed 500 m. However, during the separate moments these deviations can reach, as has been received in experiments, ~1500 m. A time of existence of a deviation is about 20 minutes then the system again gets concerning imperturbable condition. Graphs of examined deviations are shown. The received sizes of deviations are used as the amendments at data processing. As a result theoretically and practically the opportunity of the use of a stratospheric balloon gradiometer with the two-level measuring base in the general length of 6 km for carrying-out of various geophysical scientific researches is shown.

Key words: stratospheric balloon, magnetic gradiometer, measuring base, deviation.