

УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

© 2019

- А. М. Безняков** кандидат технических наук, преподаватель кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург; bez-al@mail.ru
- И. С. Гурьев** доктор технических наук, старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского); Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург; yka@mil.ru
- И. П. Рыжова** младший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского); Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург; yka@mil.ru

В статье представлены конструктивные способы уменьшения влияния магнитных помех космических аппаратов, обусловленных его собственными магнитными полями, на бортовые магнитометрические измерения, а также уменьшения возникающих магнитных моментов. Рассмотрены известные способы удаления датчиков магнитометров от мест нахождения наиболее мощных источников магнитных полей космического аппарата, в частности с использованием выдвижных штанг. Кроме того, рассмотрены способы уменьшения влияния собственных магнитных полей космического аппарата на бортовые магнитометрические системы навигационного обеспечения с применением известных замкнутых и предложенных полусферических ферромагнитных экранов.

Космический аппарат; магнитометрические системы навигационного обеспечения; ферромагнитное экранирование; тонкоплёночные ферромагнитные экраны.

Цитирование: Безняков А.М., Гурьев И.С., Рыжова И.П. Уменьшение влияния помех магнитного поля космического аппарата на магнитометрические измерения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 2. С. 33-40. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-2-33-40

Введение

Современные системы решения задач навигации и определения ориентации космических аппаратов (КА), построенные на основе инерциальных измерительных средств, требуют периодической коррекции вследствие накопления со временем погрешности. В качестве корректирующих измерительных средств могут использоваться навигационная аппаратура потребителя глобальной навигационной системы «ГЛОНАСС», оптико-электронные и радиотехнические системы [1; 2]. Однако точностные характеристики вышеуказанных систем могут быть подвержены влиянию состояния геофизической среды и воздействию различного рода помех [3].

Наиболее часто используемыми высокоточными автономными средствами решения задач навигационного обеспечения КА являются астронавигационные системы, построенные на основе оптико-электронных средств. Но они подвержены искусственной и естественной деградации вследствие светового излучения, а также искусственного воздействия микродисперсионных частиц [4]. Поэтому применение дополнительных автономных средств является актуальной задачей. Такими средствами могут служить магнитометрические системы навигационного обеспечения (МСНО), использующие

магнитное поле Земли (МПЗ) для решения задач определения параметров местоположения и ориентации КА.

Способы уменьшения влияния собственных магнитных полей

Достоинствами МСНО являются высокая автономность, помехозащищённость и надёжность, малая масса и энергопотребление, большая перегрузочная способность, низкая стоимость, отсутствие ограничений на угловые перемещения КА и возможность использования в любое время суток и года [5-7]. Для решения задачи пространственного положения КА с применением МСНО предполагается периодическая коррекция выходных параметров бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) на основе измеренных и расчётных значений модуля и составляющих вектора индукции МПЗ.

Точность МСНО зависит от решения следующих основных задач:

1. Построение бортовой высокоточной высотной модели МПЗ.
2. Уменьшение погрешности бортового магнитометрического измерителя-магнитометра.
3. Разработка методов уменьшения отрицательного влияния возмущения МПЗ.
4. Повышение точностных характеристик БИНС.
5. Уменьшение погрешностей юстировочных мероприятий согласования положения связанных осей датчиков магнитометра и связанных осей КА.
6. Разработка методов учёта и компенсации собственных магнитных помех КА.

Современные МСНО в перспективе могут обеспечить высокую точность решения задач навигационного обеспечения КА [5; 6]. Это объясняется прежде всего достигнутыми высокими точностными характеристиками магнитометров. Наибольшее применение на КА нашли следующие типы магнитометров: феррозондовые, квантовые, сверхпроводящие, резистивные [8-12].

Первые три типа высокоточных магнитометров обеспечивают точность измерений МПЗ, характеризующихся погрешностями менее 1 нТл. С использованием этих магнитометров перспективные МСНО могут обеспечить высокую точность определения параметров местоположения и ориентацию КА. Так, с использованием перспективных феррозондовых и сверхпроводящих магнитометров МСНО может проводить коррекцию БИНС. В области, ограниченной диапазоном широт менее 60-70 градусов и диапазоном высот от 300 до 10000 км, можно ожидать потенциальных точностей определения угла курса КА, характеризующихся ошибками менее одной угловой минуты.

Одним из основных факторов, отрицательно влияющих на точность решения задач навигации и определения ориентации с использованием МСНО, являются собственные магнитные помехи КА. Кроме того, при движении КА по околоземной орбите проявляется взаимодействие их собственных магнитных полей с МПЗ. Как известно, собственные магнитные помехи КА обусловлены следующими факторами: токовыми системами КА, постоянным и индукционным намагничиванием их ферромагнитных масс, вихревыми токами. Наиболее мощными источниками собственных магнитных помех КА являются солнечные батареи, аккумуляторные батареи, блок сборных шин и кабельная сеть [13]. Следует отметить, что в настоящее время с увеличением и усложнением задач КА имеется тенденция на увеличение мощности их токовых систем.

Разработано большое количество конструктивных и математических методов по решению задач уменьшения собственных магнитных помех и магнитных моментов КА. Это позволяет повысить точность МСНО и уменьшить расход энергии на компенсацию собственных магнитных моментов КА. Так, например, с использованием при проектировании разработанных технологий обеспечения заданных магнитных характеристик

КА «EgyptSat-1» и «Січ-2» удалось уменьшить более чем в два раза магнитную помеху в зоне установки магнитометра, а также магнитные моменты КА, что позволяет уменьшить расход энергии на угловую стабилизацию этих объектов [14].

Одним из наиболее часто используемых способов уменьшения отрицательного влияния на магнитометрические измерения собственных магнитных помех КА, находящихся внутри его корпуса, является конструктивный способ удаления датчиков магнитометров от источников магнитных полей КА, а также от корпуса КА с использованием раздвижных штанг. Так, на отечественных и зарубежных КА типа «Космос», «Болгария», «Swarm», «Oersted», СНАМР и других датчики магнитометров удаляются на расстояние более 3-8 метров при помощи штанг [12-15]. Например, на КА «Космос-321» длина штанги составила 3,6 метра, что обеспечивало измерение МПЗ с ошибкой 3 нТл [15].

Достижение высокой точности определения угловых параметров КА с использованием МСНО является сложной технической задачей, заключающейся, в частности, в определении и учёте отклонений связанной системы координат датчиков магнитометров относительно базовой системы координат КА. Это обусловлено наличием колебаний штанги из-за её малой жёсткости, что приводит к снижению точности решения задач определения ориентации КА с использованием МСНО из-за снижения точности измерения составляющих вектора индукции МПЗ. Кроме того, уменьшаются возможности построения для КА высокоточных бортовых компонентных моделей МПЗ. Решение этой задачи может быть достигнуто при использовании дорогостоящей оптической следящей системы за датчиками магнитометра.

В ВКА имени А.Ф. Можайского совместно с Санкт-Петербургским филиалом ИЗМИР АН проводились исследования на базе самолёта АН-12. Для уменьшения его собственных магнитных помех была разработана нераздвижная штанга. Она была выполнена из неферромагнитных материалов и располагалась в хвостовой части самолёта. Это позволило вынести датчики магнитометра на три метра за пределы корпуса самолёта, что дало возможность снизить ошибки определения курса с нескольких градусов до трёх угловых минут. При этом использовалась оптическая следящая система, обеспечивающая согласование связанной системы координат датчиков магнитометра с базовой системой координат самолёта.

Следует отметить, что массогабаритные характеристики штанги-кронштейна для проведения эксперимента на самолёте по сравнению с КА имеют более низкие требования, что позволило создать более жёсткую штангу с использованием конструкции большой массы. Это обеспечило достижение меньших величин изгибных колебаний штанги.

Способ уменьшения влияния магнитных полей с использованием ферромагнитных экранов

Для уменьшения влияния собственных магнитных полей КА, длины штанги магнитометра и, следовательно, снижения амплитуды её колебаний возможно использование замкнутых ферромагнитных экранов. Это обеспечивает экранирование как основных источников собственных магнитных полей КА, так и самих магнитометров. В настоящее время при изготовлении экранов используются тонкоплёночные ферромагнитные и аморфные материалы. Так, при использовании замкнутых, многослойных ферромагнитных экранов достигается уменьшение внешнего магнитного поля со значениями магнитной индукции до менее 1 нТл. При этом применяется система размагничивания [16].

Однако использование замкнутых ферромагнитных экранов для уменьшения влияния собственных магнитных полей КА имеет ряд недостатков [17].

1. Вместе с уменьшением собственных магнитных полей КА в зоне расположения магнитометра в обратное коэффициенту экранирования $k_{\text{Э}}$ число $1/k_{\text{Э}}$ раз во столько же раз уменьшаются измеряемые магнитометром параметры МПЗ, что весьма сильно увеличивает отрицательное влияние собственных магнитных полей КА на точность магнитометрических измерений.

2. Сравнительно большая масса экрана – тем большая, чем ближе его коэффициент экранирования $k_{\text{Э}}$ приближается к своему предельно возможному значению $k_{\text{ЭПР}}$.

В ВКА имени А.Ф. Можайского предложены принципы создания устройств, основанных на использовании полусферических многослойных ферромагнитных экранов, позволяющих уменьшить отрицательное влияние собственных магнитных помех КА на точность измерений магнитометра МСНО [17].

Устройство для ферромагнитного экранирования магнитометра представлено на рис. 1. Датчики магнитометра 1 помещены во внутреннюю полость многослойного ферромагнитного экрана, выполненного в виде полусферы. Его целесообразно изготовлять из нескольких вложенных друг в друга ферромагнитных полусфер. Полусферы выполнены из магнитомягких материалов с высокой магнитной проницаемостью и отделены друг от друга полусферическими слоями из немагнитного материала.

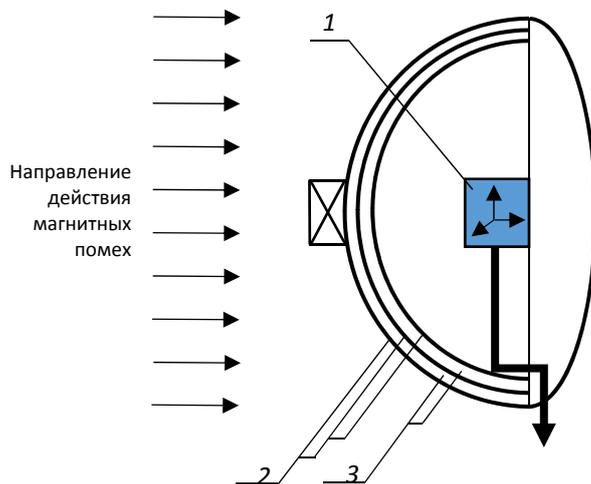


Рис.1. Устройство для ферромагнитного экранирования магнитометрического измерителя:
 1 – магнитометр; 2 – сферические ферромагнитные слои (пермаллоевая плёнка) экрана;
 3 – слои немагнитной прослойки (пластмасса или полиэтиленовая плёнка)

Экранирующие свойства ферромагнитного экрана определяются величиной его коэффициента экранирования $k_{\text{Э}}$.

Коэффициент экранирования полусферическим ферромагнитным экраном радиальных составляющих магнитных полей КА определяется выражением:

$$k_{\text{Э}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{9} \mu_{\text{Эр}}^{Cp} \left[1 - \left(\frac{r_{\text{Э1}}}{r_{\text{Э2}}} \right)^3 \right]}$$

где $\mu_{\text{Эр}}^{Cp} = \frac{\mu_{\text{Э}}^{Cp}}{\mu_0}$ – относительная средняя магнитная проницаемость ферромагнитного экрана; μ_0 – магнитная постоянная; $\mu_{\text{Э}}^{Cp}$ – средняя магнитная проницаемость ферро-

магнитного экрана; $r_{\text{в1}}, r_{\text{в2}}$ – внутренний и наружный радиусы ферромагнитной части экрана соответственно.

Коэффициент экранирования определяет возможности экрана по уменьшению величины внешнего магнитного поля по отношению к остаточной величине поля.

Предварительные исследования показывают, что трёхслойный полусферический пермаллоевый экран массой менее 200-300 г и диаметром менее 100 мм может снизить магнитные помехи КА с 10^6 до 1 нТл. Толщина одного слоя пермаллоя экрана составляет примерно 0,2 мм. При этом, например, двухслойный полусферический ферромагнитный экран позволяет уменьшить массу экрана в 20-40 раз по сравнению с замкнутым ферромагнитным экраном.

На рис. 2 изображён пример использования конструктивных методов уменьшения собственных магнитных помех геомагнитного моментного двигателя 1 на магнитометры 3 и 3' с использованием полусферических ферромагнитных экранов 4 и 4'. Такое расположение магнитометров 3 и 3', установленных в полусферических экранах 4 и 4', позволяет измерять параметры МПЗ в полном объёме. Использование замкнутого экрана, внутри которого находится геомагнитный моментный двигатель 1, позволяет уменьшить влияние его магнитных помех на магнитометры 3 и 3'.

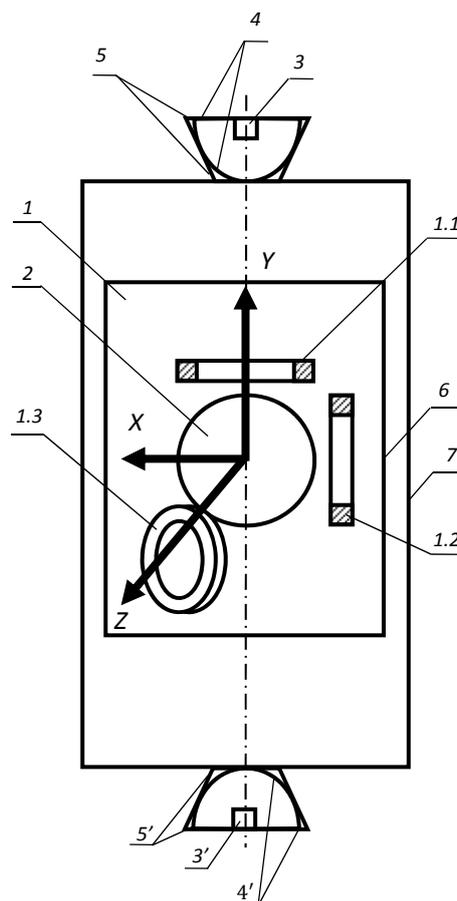


Рис. 2. Пример расположения ферромагнитных полусферических и замкнутых экранов относительно корпуса КА:

1 – геомагнитный моментный двигатель, обеспечивающий управление угловым пространственным положением КА; 1.1, 1.2, 1.3 – три ортогональных друг другу электромагнита; 2 – шаровая маховая масса; 3, 3' – магнитометры; 4, 4' – полусферические экраны; 5, 5' – крепёжные каркасы; 6 – замкнутый ферромагнитный экран; 7 – корпус КА

Заключение

В ВКА имени А.Ф. Можайского предложены принципы создания устройств, основанных на использовании полусферических ферромагнитных экранов, позволяющих уменьшить отрицательное влияние собственных магнитных помех КА на точность измерений магнитометра МСНО. Предварительные исследования показывают, что трёхслойный полусферический пермаллоевый экран массой менее 200-300 г диаметром более 100 мм может снизить магнитные помехи КА с 10^6 до 1 нТл. Толщина одного слоя пермаллоя экрана составляет примерно 0,2 мм.

Для подтверждения вышеуказанных расчётных характеристик полусферических экранов необходимо проведение экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Голяков А.Д., Лукашевский А.А., Смирнов В.В. Системы навигации космических аппаратов. СПб: МО РФ, 2003. 267 с.
2. Бессекерский В.А., Иванов, В.А., Смирнов В.В. Орбитальное гироскопирование. СПб: Политехника, 1993. 251 с.
3. Фоминов И.В. Обобщённая структура адаптивного информационно-измерительного комплекса подвижного объекта // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 5-9.
4. Арбатов А.Г., Васильев А.А., Велихов Е.П., Верещетин В.С., Герасев М.И., Кокошин А.А., Коновалов А.А., Кулик С.А. Космическое оружие: дилемма безопасности. М.: Мир, 1986. 182 с.
5. Гурьев И.С. Адаптивные магнитометрические системы контроля пространственного положения. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 96 с.
6. Милихин Б.З., Селезнев В.П., Селезнев А.В. Геомагнитная навигация. М.: Машиностроение, 1976. 279 с.
7. Потехин С.Г., Власенков Е.В., Комбаев Т.Ш., Павлова А.Н. Решение задач навигации и ориентации микроскопического аппарата по данным о магнитном поле Земли с использованием фильтра Калмана // Механика, управление и информатика. 2013. № 1 (13). С. 160-168.
8. Caruso M.J. Application of magnetoresistive sensors in navigation systems // SAE Technical Papers. 1997. DOI: 10.4271/970602
9. Магнитометр цифровой трёхосный МЦТ-4. Технические характеристики // Каталог продукции электронного направления ОАО «Раменское Приборостроительное Бюро». 2013. С. 97.
http://mniirip.ru/sites/default/files/articles/katalog_elektronnogo_napravleniya_rpkb.pdf
10. Югай К.Н., Муравьев А.Б., Югай К.К., Скутин А.А., Сычев С.А., Серопян Г.М., Канев Е.А. СКВИД-магнитометр на высокотемпературных плёнках: патент РФ № 2184407; опублик. 27.06.2002.
11. Каталог товаров ООО «Магнитные приборы». <http://www.magnetic.spb.ru>
12. Smart digital magnetometer HMR 2300. https://aerospace.honeywell.com/en/~~/media/aerospace/files/datasheet/smartdigitalmagnetometerhmr2300_ds.pdf
13. Волоцуев В.В., Ткаченко И.С. Введение в проектирование космических аппаратов: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 144 с.
14. Розов В.Ю., Гетьман А.В., Петров С., Ерисов А., Меланченко А.Г., Хорошилов В.С., Шмидт И.Р. Магнетизм космических аппаратов // Техн. электродинамика. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2010. Ч. 2. С. 144-147.

15. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряжённости геомагнитного поля вдоль орбиты спутника «Космос-321». М.: Наука, 1976. 179 с.

16. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Щелкин А.П. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. Л.: Энергия, 1972. 272 с.

17. Гурьев И.С., Додотченко В.В. Устройство для экранирования магнитометров от магнитных полей космического аппарата и других объектов: патент РФ № 2204152; опубл. 10.05.2003.

REDUCING THE INFLUENCE OF INTERFERENCE OF SPACECRAFT MAGNETIC FIELD ON MAGNETIC MEASUREMENTS

© 2019

A. M. Beznyakov Candidate of Science (Engineering), Lecturer at the Department of On-Board Electrical Equipment and Power Systems of Aircraft; Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russian Federation; bez-al@mail.ru

I. S. Guriev Doctor of Science (Engineering), Senior Researcher of the Department of the Military Institute (Scientific Research) Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russian Federation; vka@mil.ru

I. P. Ryzhova Researcher of the Department of the Military Institute (Scientific Research); Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, Russian Federation; vka@mil.ru

The article presents constructive ways of reducing the influence of magnetic interference from spacecraft, due to its own magnetic fields, on the on-board magnetic measurements, as well as reducing the resulting magnetic moments. Well-known methods of removing magnetometer sensors from the locations of the most powerful sources of magnetic fields of a spacecraft, in particular, using extendable booms, are considered. In addition, methods for reducing the influence of spacecraft self-magnetic fields on the onboard magnetometric navigation support systems using known closed and proposed hemispherical ferromagnetic shields are considered

Spacecraft; navigation software; magnetometric systems; ferromagnetic shielding; thin-film ferromagnetic screens.

Citation: Beznyakov A.M., Guriev I.S., Ryzhova I.P. Reducing the influence of interference of spacecraft magnetic field on magnetic measurements. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 2. P. 33-40. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-2-33-40

References

1. Golyakov A.D., Lukashevskiy A.A., Smirnov V.V. *Sistemy navigatsii kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft navigation systems]. SPb: MO RF Publ., 2003. 267 p.

2. Bessekerskiy V.A., Ivanov, V.A., Smirnov V.V. *Orbital'noe giroskopirovanie* [Orbital gyroscopy]. SPb: Politekhnik Publ., 1993. 251 p.

3. Fominov I.V. Generalized structure of adaptive information and measuring complex of mobile object. *Journal of Instrument Engineering*. 2013. V. 56, no. 7. P. 5-9. (In Russ.)

4. Arbatov A.G., Vasil'ev A.A., Velikhov E.P., Vereshchetin V.S., Gerashev M.I., Koshin A.A., Konovalov A.A., Kulik S.A. *Kosmicheskoe oruzhie: dilemma bezopasnosti* [Space weapons: security dilemma]. Moscow: Mir Publ., 1986. 182 p.

5. Gur'ev I.S. *Adaptivnye magnetometricheskie sistemy kontrolya prostranstvennogo polozheniya* [Adaptive magnetometric spatial attitude control systems]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1985. 96 p.

6. Milikhin B.Z., Seleznev V.P., Seleznev A.V. *Geomagnitnaya navigatsiya* [Geomagnetic navigation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 279 p.
7. Potekhin S.G., Vlasenkov E.V., Kombaev T.S., Pavlova A.N. Task solution of microsatellite navigation and attitude by data about the earth's magnetic field with Kalman filter use. *Mechanics, Control and Informatics*. 2013. No. 1 (13). P. 160-168. (In Russ.)
8. Caruso M.J. Applications of magnetoresistive sensors in navigation systems. *SAE Technical Papers*. 1997. DOI: 10.4271/970602
9. Magnitometr tsifrovoy trekhosnyy MTST-4. Tekhnicheskie kharakteristiki. *Katalog produktzii elektronnoy napravleniya OAO «Ramenskoe Priborostroitel'noe Byuro»*. 2013. P. 97. Available at: http://mniirip.ru/sites/default/files/articles/katalog_elektronnoy_napravleniya_rpkb.pdf
10. Jugaj K.N., Murav'ev A.B., Jugaj K.K., Skutin A.A., Sychev S.A., Seropjan G.M., Kanev E.A. *SKVID-magnitometr na vysokotemperaturnykh plenkakh* [SQUID-magnetometer built around high-temperature films]. Patent RF, no. 2184407, 2002. (Publ. 27.06.2002)
11. Katalog tovarov OOO «Magnitnye pribory» [Catalogue of goods of “Magnetic instruments” LLC]. Available at: <http://www.magnetic.spb.ru>
12. Smart digital magnetometer HMR 2300. Available at: https://aerospace.honeywell.com/en/~media/aerospace/files/datasheet/smartdigitalmagnetometerhmr2300_ds.pdf
13. Volotsuev V.V., Tkachenko I.S. *Vvedenie v proektirovanie kosmicheskikh apparatov* [Introduction to spacecraft design: study guide]. Samara: Samara University Publ., 2018. 144 p.
14. Rozov V.Yu., Hetman A.V., Petrov S., Erisov A., Melanchenko A.G., Khoroshilov V.S., Schmidt I.R. Magnetism of spacecraft. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyi vypusk «Problemy suchasnoi elektrotekhniki»*. 2010. Part 2. P. 144-147. (In Russ.)
15. *Katalog izmerennykh i vychislennykh znacheniy modulya napryazhennosti geomagnitnogo polya vdol' orbity sputnika «Kosmos-321»* [Catalogue of measured and calculated values of the magnitude of geomagnetic field intensity along the orbit of Kosmos-321 satellite]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 179 p.
16. Afanas'ev Yu.V., Studentsov N.V., Shchelkin A.P. *Magnitometricheskie preobrazovateli, pribory, ustanovki* [Magnetometric transducers, devices, installations]. Leningrad: Energiya Publ., 1972. 272 p.
17. Gur'ev I.S., Dodotchenko V.V. *Ustroystvo dlya ekranirovaniya magnitometrov ot magnitnykh poley kosmicheskogo apparata i drugikh ob'ektov* [Facility shielding magnetometers from magnetic fields of spacecraft and other objects]. Patent RF, no. 2204152, 2003. (Publ. 10.05.2003)