

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ МИКРОУСКОРЕНИЙ»

© 2016 Н. Д. Сёмкин, И. В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье рассматриваются результаты эксперимента с помощью научной аппаратуры (НА) «Космическая система компенсации микроускорений» (КСКМ). НА КСКМ была разработана и изготовлена в институте космического приборостроения СГАУ с участием АО «РКЦ «ПРОГРЕСС» и эксплуатировалась на космическом аппарате (КА) «Фотон-М» №4 в период с 18 июля по 1 сентября 2014 г. Эксперимент посвящён сбору информации о значениях магнитного поля Земли и компенсации микроускорений по результатам сравнения измеренных значений с расчётными по модели IGRF. Приведены характеристики научной аппаратуры КСКМ и основные данные, полученные в ходе анализа телеметрической информации. Построена усреднённая картина распределения магнитного поля Земли за время проведения эксперимента.

*Космический аппарат, космическое приборостроение, научная аппаратура, микроускорения, микрогравитация, магнитное поле Земли.*

### Введение

Технологические и научные космические эксперименты по получению и исследованию свойств новых материалов, выращиванию монокристаллов, исследованию диффузных процессов и др. проводятся на космических аппаратах серии «Фотон», которые разрабатываются и изготавливаются в АО «РКЦ «ПРОГРЕСС», г. Самара. Одним из наиболее важных факторов является невесомость, поскольку присутствие даже незначительных микроускорений может оказать большое влияние на качество экспериментов, проводимых на борту КА.

НА КСКМ предназначена для измерения магнитного поля внутри спускаемого аппарата (СА) КА «Фотон», расчёта микроускорений в низкочастотной части спектра от 0 до 0,01 Гц в заданных точках внутри СА и имитации компенсации микроускорений. НА КСКМ успешно прошла лётные испытания в составе космического аппарата «Фотон-М» №4 в течение 45 суток – с 18 июля по 1 сентября 2014 г.

НА КСКМ функционально объединяет:

- блок электроники (БЭ) с контроллером и специальным программно-математическим обеспечением (СПМО) для управления аппаратурой, обработки измерений геомагнитного поля, анализа низкочастотных микроускорений и формирования параметрических данных, передаваемых средствами бортовой системы телеметрических измерений (БСТИ);
- три трёхкомпонентных магнитометра для измерения состояния магнитного поля, которые сопряжены тремя каналами с блоком электроники;
- имитационный модуль компенсации микроускорений (ИМКМ), сопряжённый с БЭ информационным каналом и кабелем электропитания;
- канал сопряжения с системой трансляции команд и распределения питания для управления аппаратурой КСКМ;

*Цитирование:* Сёмкин Н.Д., Пияков И.В. Результаты работы научной аппаратуры «Космическая система компенсации микроускорений» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, №1. С. 107-114. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-107-114

- канал сопряжения с телеметрической системой для передачи информации;
- дублированный мультиплексный канал обмена (МКО) с бортовой вычислительной системой (БВС) для обеспечения

НА КСКМ данными навигационного приёмника и бортовой шкалы времени.

Внешний вид приборов представлен на рис. 1.

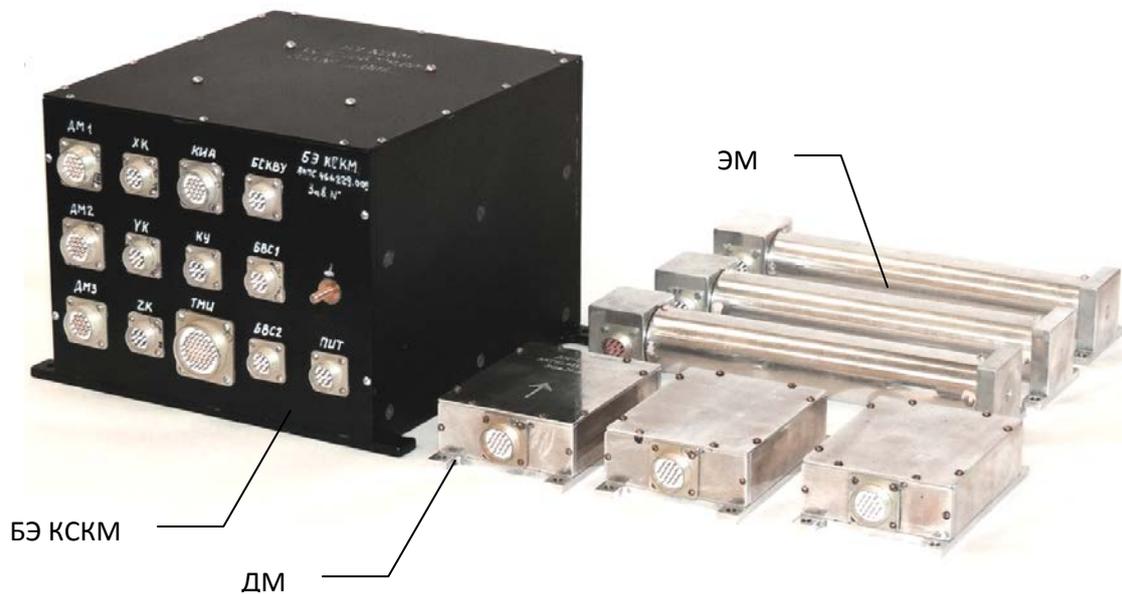


Рис. 1. Внешний вид приборов, входящих в состав НА КСКМ (БЭ КСКМ – блок электроники КСКМ, ДМ – датчик магнитный, ЭМ – электромагнит)

### Технические характеристики

БЭ КСКМ выполнен в виде моноблока с программируемым контроллером и обеспечивающим устройством для его функционирования. Блок имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих температур –  $0...45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- масса –  $3,0 \pm 0,5\text{ кг}$ ;
- напряжение питания –  $23...32\text{ В}$ ;
- энергопотребление блока электроники – не более  $12\text{ Вт}$ .

Средства измерения состояния магнитного поля выполнены в виде трёх трёхкомпонентных магнитометров с контроллером сбора информации со следующими техническими характеристиками:

- диапазон значений электромагнитной индукции –  $10^{-6}...10^{-3}\text{ Тл}$ ;
- чувствительность –  $5 \cdot 10^{-7}\text{ Тл}$ ;
- количество датчиков – 3;
- потребление датчика – не более  $0,4\text{ Вт}$ ;

- диапазон рабочих температур –  $0...45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

- масса одного датчика –  $200 \pm 50\text{ г}$ .

Электропитание магнитометров, управление их работой, а также сбор измеряемых данных о состоянии магнитного поля осуществляется БЭ КСКМ.

Измерения вектора магнитной индукции (ВМИ) геомагнитного поля датчиками ДМ аппаратуры КСКМ не включают составляющие, обусловленные работой исполнительных элементов ЭМ.

Электромагниты (ЭМ) КСКМ имеют следующие характеристики:

- количество исполнительных элементов (ЭМ) – 3;
- максимальный магнитный момент по каждому каналу –  $\pm 0,5\text{ А}\cdot\text{м}^2$ ;
- остаточный магнитный момент по каждому каналу –  $\pm 0,005\text{ А}\cdot\text{м}^2$ ;
- минимальный магнитный момент по каждому каналу –  $\pm 0,05\text{ А}\cdot\text{м}^2$ ;
- потребление – не более  $1,5\text{ Вт}$ ;
- диапазон рабочих температур –  $0...45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Электропитание ЭМ КМ, управление работой, а также сбор измеряемых данных о параметрах формируемого магнитного поля осуществляется БЭ КСКМ. Электромагниты установлены во взаимно ортогональных плоскостях.

Структурная схема НА КСКМ представлена на рис. 2.

Для обеспечения электромагнитной совместимости и устранения помех работы системы управления движением электромагниты ЭМ<sub>x</sub>, ЭМ<sub>y</sub> и ЭМ<sub>z</sub> были зашунтированы резистивной нагрузкой, что обеспечило нагрузку на модуль управления магнитами, но при этом внешние магнитные поля не создавались.

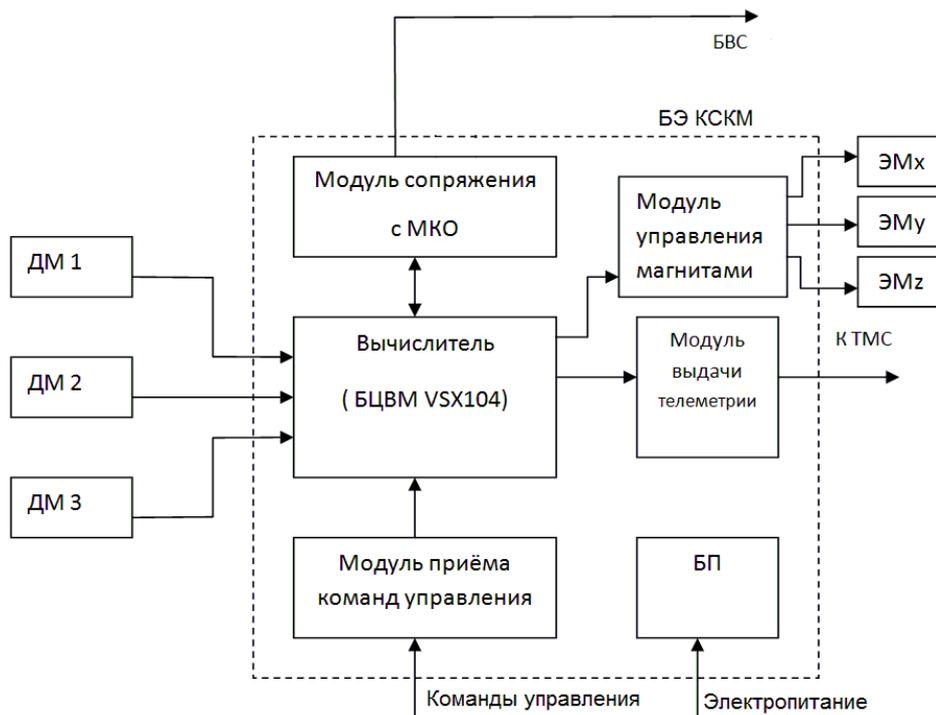


Рис. 2. Структурная схема НА КСКМ:

МКО – мультиплексный канал обмена; БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина; БП – блок питания; БВС – бортовая вычислительная система; ТМС – телеметрическая система

### Анализ работы аппаратуры

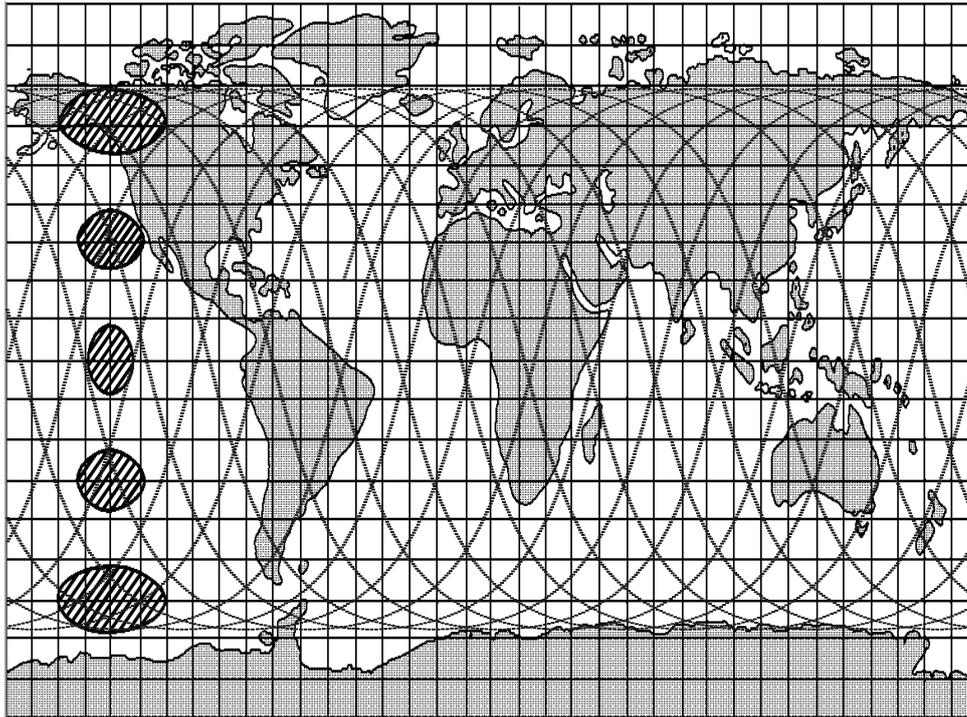
Первичный анализ работы НА КСКМ заключался в построении траектории движения КА. По данным навигационной системы траектория движения КА для нескольких витков за одни из первых суток полёта показана на рис. 3.

Из рис. 3, а видно, что траектория КА не проходила через полярные области Земли. Из рис. 3, б следует, что орбита представляла собой эллипс с перигеем 255 км и апогеем 550 км. Рис. 3, а; 3, б соответствуют одному и тому же участку полёта.

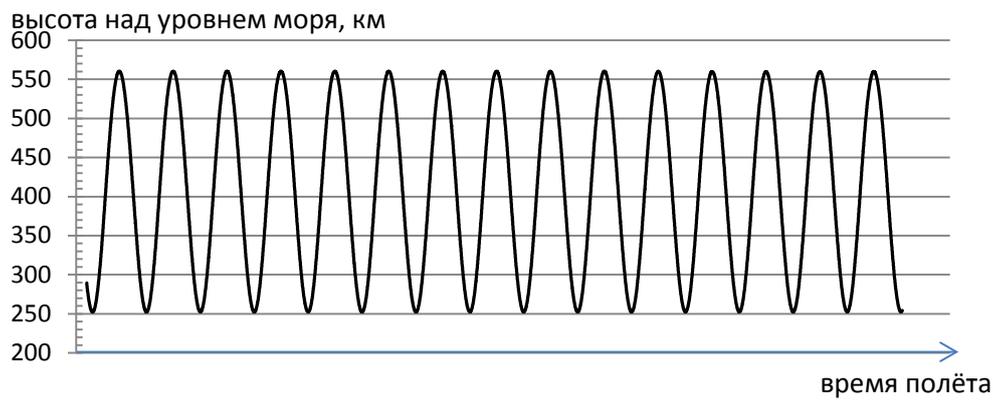
После наложения на траекторию значений измеренного магнитного поля получим усреднённую картину распре-

ления магнитного поля Земли за все 45 суток полёта независимо от высоты. Для оценки полноты полученных данных они представлены на рис. 4.

Таким образом, получена карта распределения измеренного магнитного поля. Это значит, что возможно решение задачи вычисления и компенсации микроускорений по результатам сравнения измеренного значения вектора магнитного поля с расчётным значением в данной точке траектории полёта. Полученная картина несколько отличается от классического распределения магнитного поля Земли, что объясняется усреднением по времени за 45 суток и по высоте.



a



б

Рис. 3. Участок траектории движения КА «ФОТОН-М» №4

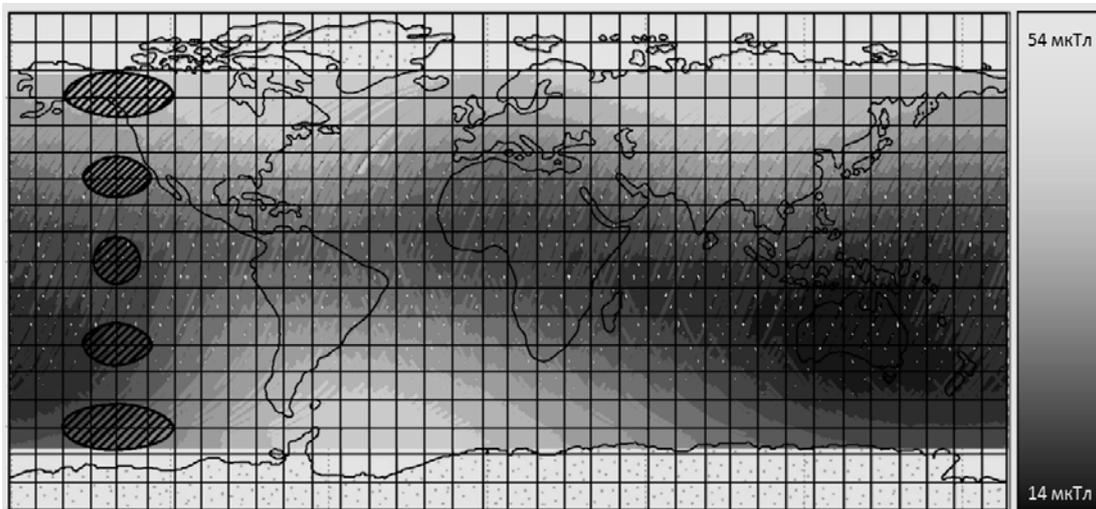


Рис. 4. Распределение модуля магнитного поля Земли по результатам работы НА КСМ

### Анализ микроускорений

Анализ параметров движения и микроускорений проведён в [1] и основан на предположении, что магнитометры должны измерять в основном магнитное поле Земли. С учётом большого числа электрических цепей на борту спутника это предположение выглядит необоснованным, однако опыт магнитных измерений на трёх предыдущих КА «Фотон» [2-4] и на КА «Бион М-1» [5] показывает, что оно является адекватным. Этот способ [5] состоит в сравнении модуля напряжённости измеренного поля с модулем напряжённости магнитного поля Земли (МПЗ), рассчитанным с помощью модели IGRF [6]. Сравнение модулей не требует знания

ориентации магнитометра, надо знать только орбитальное движение КА. Такой подход позволяет проверить данные измерений каждого магнитометра, используя минимальную дополнительную информацию.

После сопоставления магнитных полей с моделью IGRF была выполнена реконструкция вращательного движения КА [1]. Реконструкция вращательного движения КА «Фотон-М» №4 выполнялась по измерениям его угловой скорости и напряжённости МПЗ. Методика реконструкции основана на кинематических уравнениях вращательного движения твёрдого тела.

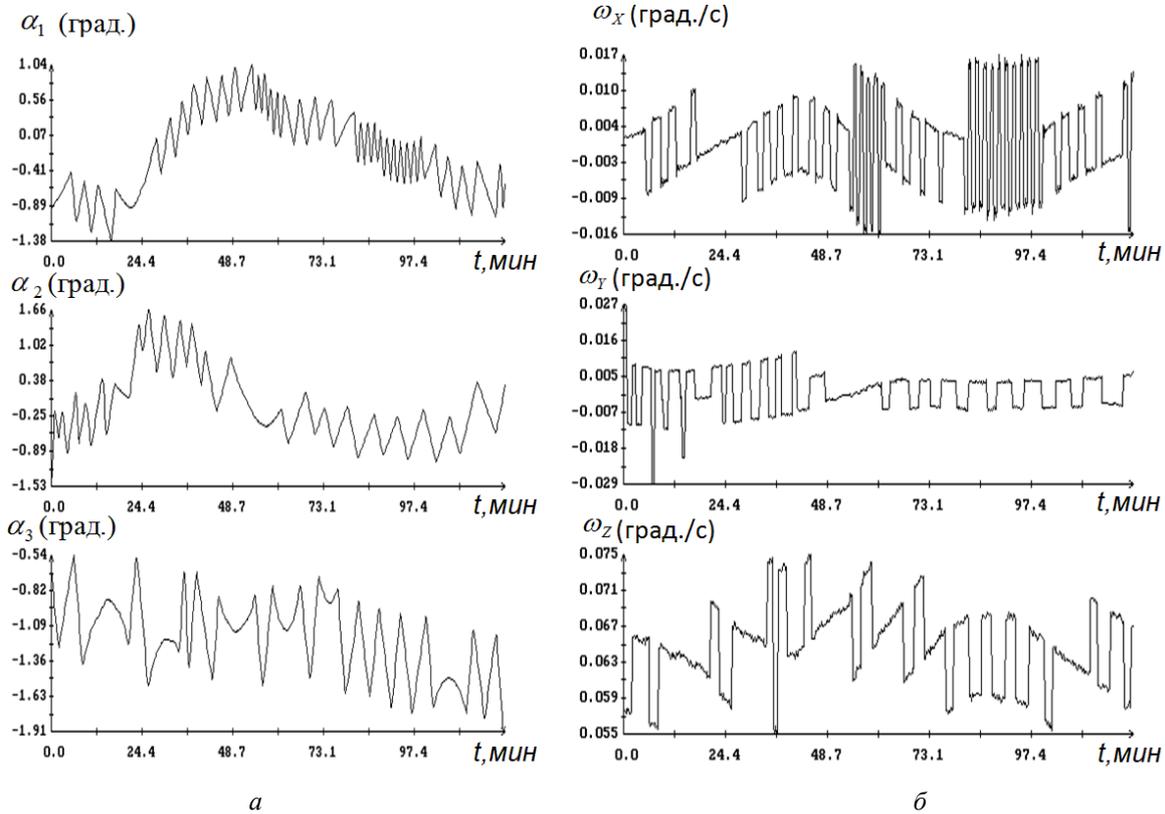


Рис. 5. Движение КА в орбитальной ориентации: момент  $t = 0$  соответствует 3922709с (06:38:42 UTC 01.09.2014)

Рис. 5, а иллюстрирует реконструкцию движения КА в режиме орбитальной ориентации. Компоненты имеют следующий смысл:  $\alpha_1$  – угол крена,  $\alpha_2$  – угол рыскания,  $\alpha_3$  – угол тангажа. Рис. 5, б показывает угловые скорости вращения КА вокруг собственных осей. Изломы на гра-

фиках объясняются искажениями магнитного поля, вызванными включением системы сброса кинетического момента (ССКМ).

После того, как движение КА найдено, можно рассчитать микроускорение в любой заданной точке борта в функции

времени. Результаты такого расчёта для некоторых реконструированных движений представлены на рис. 6. Микроускорения рассчитаны в точке с координатами (1,5 м; -0,9 м; 0,2 м) относительно центра масс КА. Компоненты этого вектора и компоненты микроускорений относятся к приборной системе координат КА. Строго говоря, приведённые результаты являются неполными. Методически правильные результаты получены только для плавных участков графиков. В точках пиков рассчитанных функций значения последних далеки от реальных по следующим причинам: во-первых, при расчёте микроускорений не учтён вклад силы, создаваемой двигателями ориентации; во-вторых, создаваемое соответствующим моментом угловое ускорение КА «размазано» на несколько больший промежуток времени, чем это имеет место в действительности. Такое размазывание – следствие задания

измерений угловой скорости на временной сетке с достаточно редкими узлами (шаг сетки – 12 с). Моделирование показывает, что реальные пики микроускорений имеют продолжительность несколько десятых долей секунды и величину порядка  $10^{-3} \text{ м/с}^2$ .

Из рис. 6 видно, что микроускорения не превышают  $10^{-3} \text{ м/с}^2$ . При необходимости точность расчёта пиковых значений микроускорений на КА «Фотон-М» №4 может быть выполнена с более высокой точностью, если получить информацию о работе системы ориентации. Таким образом, при проектировании подобной НА рекомендуется предусмотреть интерфейсы информационного обмена с другой аппаратурой, которая оказывает влияние на ориентацию и движение КА, либо использовать НА КСКМ на КА, работающих в режиме неориентированного полёта.

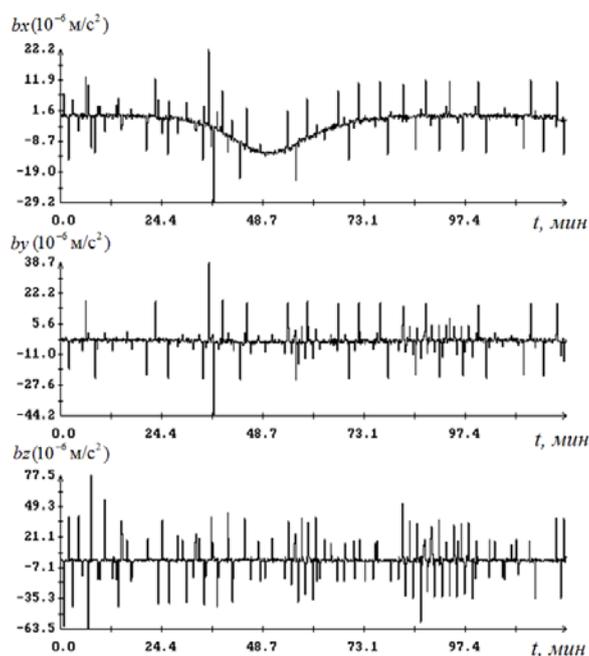


Рис. 6. Микроускорения в точке с координатами (1,5 м; -0,9 м; 0,2 м) в приборной системе координат

### Библиографический список

1. Абрашкин В.И., Воронов К.Е., Пияков И.В., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Сёмкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Определение вращательного движения спутника Фотон М-4 // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 8. С. 1-40.

2. Абрашкин В.И., Балакин В.Л., Белоконов И.В., Воронов К.Е., Зайцев А.С., Иванов В.В., Казакова А.Е., Сазонов В.В., Сёмкин Н.Д. Неуправляемое вращательное дви-

жение спутника Фотон-12 и квазистатические микроускорения на его борту // Космические исследования. 2003. Т. 41, № 1. С. 45-57.

3. Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Сёмкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Неуправляемое движение спутника Фотон М-2 и квазистатические микроускорения на его борту // Космические исследования. 2007. Т. 45, № 5. С. 450-470.

4. Бойзелинк Т., Ван Бавинхов К., Абрашкин В.И., Казакова А.Е., Сазонов В.В. Определение вращательного движения спутника «Фотон М-3» по данным бортовых измерений магнитного поля Земли // Космические исследования. 2010. Т. 48, № 3. С. 252-265.

5. Абрашкин В.И., Воронов К.Е., Пияков И.В., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Сёмкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Определение движения спутника Бион М-1 средствами аппаратуры ГРАВИТОН // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 2. С. 1-44.

6. Maus S., Manoj C., Rauberg J., Michaelis I., Lühr H. NOAA/NGDC candidate models for the 11th generation International Geomagnetic Reference Field and the concurrent release of the 6th generation Pomme magnetic model // Earth, Planets and Space. 2010. V. 62, Iss. 10. P. 729-735. DOI:10.5047/eps.2010.07.006

### Информация об авторах

**Сёмкин Николай Данилович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Область научных интересов: космическое приборостроение, ускорительная техника, масс-спектрометрия.

**Пияков Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [igor\\_piyakov@ssau.ru](mailto:igor_piyakov@ssau.ru). Область научных интересов: космическое приборостроение, масс-спектрометрия.

### RESULTS OF OPERATION OF SCIENTIFIC HARDWARE «SPACE SYSTEM OF MICROACCELERATION COMPENSATION»

© 2016 N. D. Semkin, I. V. Piyakov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper presents the results of an experiment using the «Space system of microacceleration compensation» (SSMC) scientific hardware. The SSMC hardware has been developed and manufactured at the Institute of Space Device Engineering of Samara State Aerospace University with the participation of the Joint Stock Company «Space Rocket Center «PROGRESS» and operated on the Photon-M №4 spacecraft in the period from July 18 to September 1, 2014. The experiment is dedicated to collecting information about the values of the magnetic field of the Earth and compensating accelerations by comparing the measured values with the calculated values for IGRF model. Characteristics of the SSMC scientific hardware and the basic data obtained in the analysis of telemetry data are presented. An averaged picture of distribution of the magnetic field of the Earth during the experiment is obtained.

*Spacecraft, scientific hardware, microacceleration, microgravity, Earth's magnetic field, space device engineering.*

*Citation:* Semkin N.D., Piyakov I.V. Results of operation of scientific hardware «Space system of microacceleration compensation». *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 1. P. 107-114. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-107-114

### References

1. Abrashkin V.I., Voronov K.E., Piyakov I.V., Puzin Yu.Ya., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Yu. Determining the spacecraft Foton M-4 attitude motion. *Keldysh Institute Preprints*. 2015. No. 8. P. 1-40. (In Russ.)
2. Abrashkin V.I., Balakin V.L., Belokonov I.V., Voronov K.E., Zaitsev A.S., Ivanov V.V., Kazakova A.E., Sazonov V.V., Semkin N.D. Uncontrolled attitude motion of the Foton-12 satellite and quasi-steady microaccelerations onboard it. *Cosmic Research*. 2003. V. 41, no. 1. P. 39-50. DOI: 10.1023/A:1022351529382
3. Abrashkin V.I., Bogoyavlensky N.L., Voronov K.E., Kazakova A.E., Puzin Yu.Ya., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Yu. Uncontrolled motion of the Foton M-2 satellite and quasistatic microaccelerations on its board. *Cosmic Research*. 2007. V. 45, no. 5. P. 424-444. DOI: 10.1134/S0010952507050073
4. Beuselinck T., Van Bavinchove C., Abrashkin V.I., Kazakova A.E., Sazonov V.V. Determination of attitude motion of the Foton M-3 satellite according to the data of onboard measurements of the Earth's magnetic field. *Cosmic Research*. 2010. V. 48, no. 3. P. 246-259. DOI: 10.1134/S0010952510030068
5. Abrashkin V.I., Voronov K.E., Piyakov I.V., Puzin Y.Y., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Y. Determining the spacecraft Bion M-1 attitude motion by means of the workstation Graviton. *Keldysh Institute Preprints*. 2014. No. 2. P. 1-44. (In Russ.)
6. Maus S., Manoj C., Rauberg J., Michaelis I., Lühr H. NOAA/NGDC candidate models for the 11<sup>th</sup> generation International Geomagnetic Reference Field and the concurrent release of the 6th generation Pomme magnetic model. *Earth, Planets and Space*. 2010. V. 62, Iss. 10. P. 729-735. DOI:10.5047/eps.2010.07.006

### About the authors

**Semkin Nikolay Danilovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Area of Research: high-speed impact, mass-spectrometry, space device engineering.

**Piyakov Igor Vladimirovich**, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [igor\\_piyakov@ssau.ru](mailto:igor_piyakov@ssau.ru). Area of Research: space device engineering, mass-spectrometry.