

И. В. БЕЛОКОНОВ, М. В. БОНДАРЬ, И. А. КУДРЯВЦЕВ

## НАВИГАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА YES2 ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТА КА «ФОТОН-М3»

*Исследуются проблемы навигационного сопровождения, возникшие в ходе проведения этого уникального эксперимента. Описывается методика послеполетного анализа полученных навигационных измерений. Приводятся результаты, позволяющие оценить движение КА «Фотон-М3» во время эксперимента и сделать косвенные выводы о реальном разворачивании тросовой системы и моменте отрезания троса.*

### Характеристика тросового эксперимента на КА «Фотон-М3»

Орбитальные тросовые системы (ОТС) являются перспективным классом крупногабаритных космических конструкций. Их применение позволит эффективно решать широкий спектр задач в космосе, в том числе и выполнение орбитальных маневров. В 2007 г. на борту КА «Фотон-М3» был проведен эксперимент YES2 Европейского космического агентства по спуску малого груза с орбиты с использованием тросовой системы [1]. Идея эксперимента заключалась в следующем. КА «Фотон-М3» ориентируется по местной вертикали, и от него посредством пружинного толкателя отделяется капсула на тросе. Формируется тросовая система длиной 30 км, в расчетный момент времени выполняется отрезание троса, в результате чего капсула переходит на траекторию спуска к

---

**Белоконов** Игорь Витальевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева. Действительный член Академии навигации и управления движением.

**Бондарь** Михаил Васильевич. Магистрант кафедры динамики полета и систем управления Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева.

**Кудрявцев** Илья Александрович. Кандидат технических наук, доцент, декан факультета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева.

Статья по докладу на XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

Земле. Такой способ доставки грузов на Землю возможен ввиду особенностей движения связки тел на орбите (рис. 1).

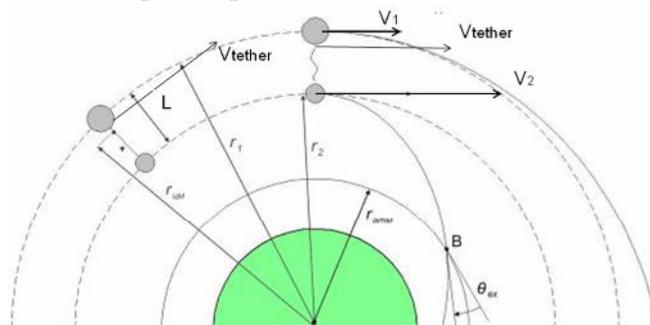


Рис. 1. Принцип использования тросовой системы для схода с орбиты

В равновесном стационарном режиме связка двух тел ориентируется по местной вертикали, и оба объекта совершают полет по круговым орбитам с одинаковой орбитальной угловой скоростью. При этом линейная скорость  $v_1$  верхнего объекта, совершающего полет по круговой орбите радиусом  $r_1$ , будет больше круговой скорости для данной высоты  $r_{кр1}$ , а скорость нижнего объекта  $v_2$  будет меньше круговой скорости  $v_{кр2}$ , соответствующей радиусу  $r_2$ . Если в некоторый момент времени производится разъединение связки, то оба объекта перейдут на эллиптические орбиты. Положение верхнего объекта в момент разъединения будет соответствовать перигею его новой орбиты, а нижнего объекта – апогею. Траектория свободного движения второго объекта при соответствующих характеристиках связки и условиях отделения может пересечь плотные слои атмосферы, т. е. рассматриваемый объект перейдет на траекторию спуска и падения на Землю [2].

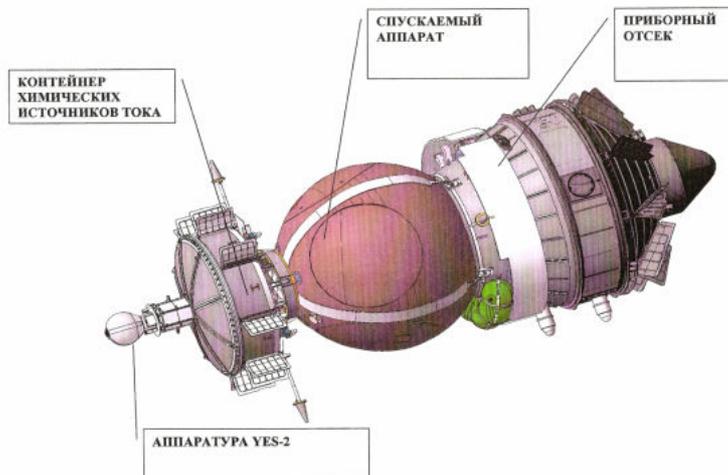


Рис. 2. КА «Фотон-М3» с аппаратурой YES2

Аппаратура YES2 представляла собой 36-килограммовую экспериментальную установку для формирования тросовой системы на КА «Фотон-М3» (рис. 2). Конструктивно установка состояла из трех основных элементов:

FLOYD – блок массой 22 кг, закрепленный на КА «Фотон-М3», содержащий катушку с тросом, систему управления развертыванием троса, систему отрезания троса, бортовую электронику; MASS – субспутник массой 8 кг, на котором закреплена капсула FOTINO, с системами отделения капсулы, отрезания троса, системой, измеряющей параметры движения и передающей данные на КА «Фотон-М3»; FOTINO – возвращаемая капсула массой 6 кг, выполненная в виде сферы диаметром 0,4 м и имеющая теплозащитное покрытие, парашютную систему и радиомаяк.

Формирование тросовой системы происходило в два этапа. На первом этапе осуществлялось развертывание троса на длину около 3 км с последующим торможением относительной скорости и стабилизацией положения связки. На втором этапе, начало которого выбиралось из достижения капсулой требуемого района приземления, осуществлялись полное развертывание тросовой системы и отрезание троса в заранее выбранный момент времени.

### Описание вспомогательной аппаратуры SSAU-YES2 для навигационного сопровождения тросового эксперимента

Для навигационного сопровождения эксперимента на борту КА «Фотон-М3» была установлена аппаратура SSAU-YES2, созданная в Самарском государственном аэрокосмическом университете. В состав навигационной аппаратуры входили одночастотный двухсистемный навигационный приемник производства Ижевского радиозавода, трехстепенной магнитометр, две навигационные антенны и сумматор радионавигационных сигналов. Использование двух навигационных антенн вызвано их работой в условиях ограниченной видимости, так как КА «Фотон-М3» при проведении эксперимента ориентируется по местной вертикали. При этом условия видимости навигационных спутников ухудшаются из-за затенения элементами его конструкции антенн, размещенных на поверхности КА. Размещение антенн и сумматора показано на рис. 3. Электронный блок с навигационным приемником, магнитометром, системой управления размещался в отсеке научной аппаратуры и был доставлен в спускаемом аппарате на Землю после завершения полета КА «Фотон-М3».



Рис. 3. Размещение элементов аппаратуры SSAU-YES2 на поверхности КА «Фотон-М3»:  
1, 2 – навигационные антенны, 3 – сумматор сигналов

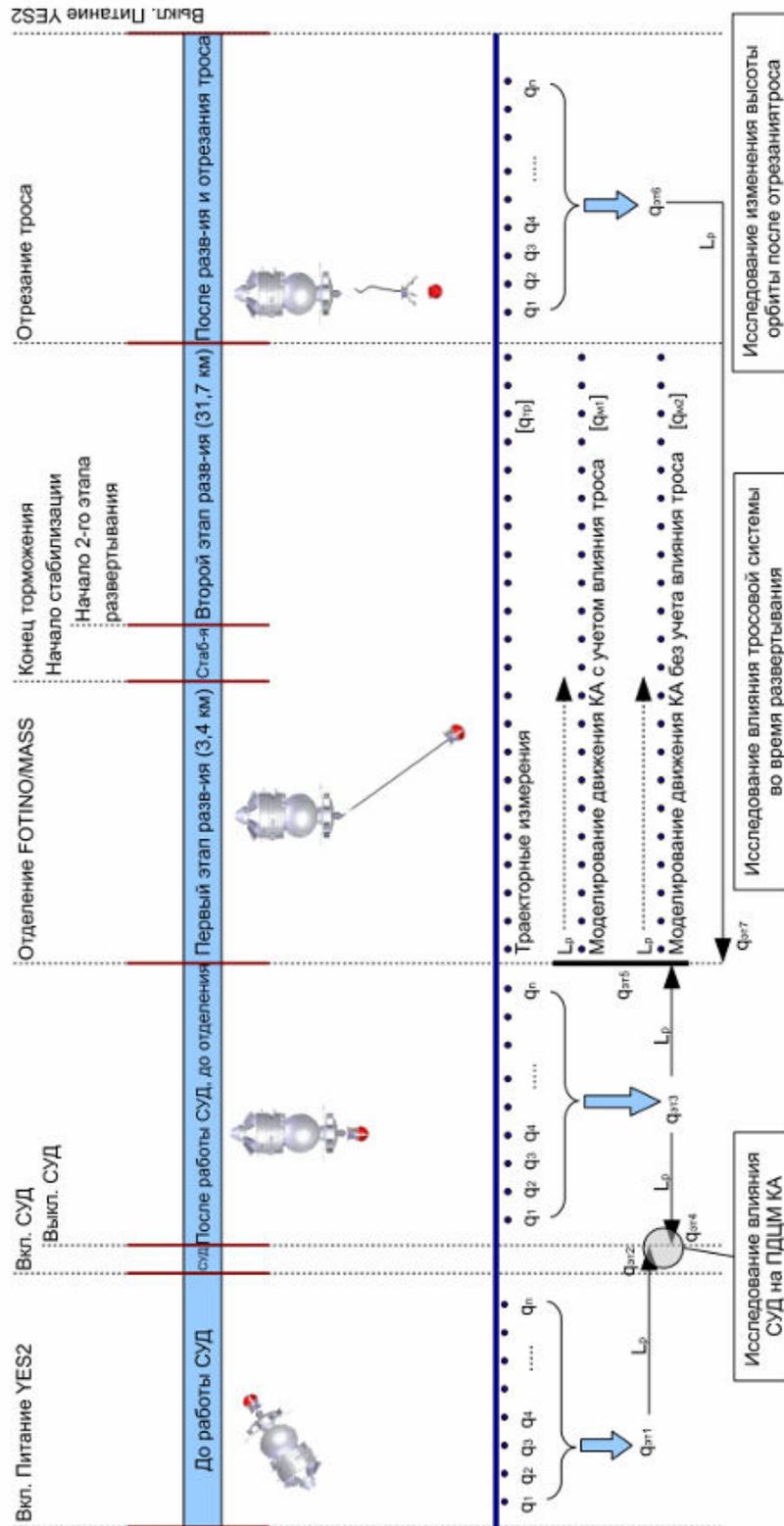


Рис. 4. Иллюстрация этапов эксперимента YES2 и задач, решаемых аппаратурой SSAU-YES2 при его навигационном сопровождении

Включение/выключение аппаратуры SSAU-YES2 происходило одновременно с включением/выключением аппаратуры YES2. Продолжительности каждого из этапов и число полученных аппаратурой SSAU-YES2 навигационных решений приведены в таблице (общая продолжительность проведения эксперимента составила 7 ч 13 мин).

Из анализа циклограммы эксперимента YES2 (рис. 4) следует, что аппаратурой SSAU-YES2 обеспечивалось навигационное сопровождение всех основных этапов тросового эксперимента: участка разворота КА системой управления движением (СУД) по углу тангажа; участка полета КА в ориентированном по местной вертикали положении до начала развертывания тросовой системы; первого этапа развертывания троса до длины 3 км, гашения относительной скорости и стабилизации связки; второго этапа развертывания троса на всю запланированную длину, отрезания троса и отделения капсулы FOTINO; участка полета КА после отрезания троса.

#### Временные и информационные характеристики этапов работы аппаратуры SSAU-YES2

№	Характеристика этапа	Время начала этапа	Время окончания этапа	Длительность, с	Число навигационных решений
1	От момента включения аппаратуры до начала работы СУД	2:03:00	3:03:59	3660	3385
2	Этап работы СУД	3:04:00	3:08:59	300	300
3	Полет в ориентированном положении до начала развертывания троса	3:09:00	4:46:32	5853	5715
4	Предварительный этап развертывания троса (длина 3 км)	4:46:33	5:55:12	4120	4110
5	Участок стабилизации связки	5:55:13	6:21:11	1559	689
6	Этап полного развертывания троса	6:21:12	7:22:36	3685	3623
7	Полет после отрезания троса	7:22:37	9:16:00	6803	6791

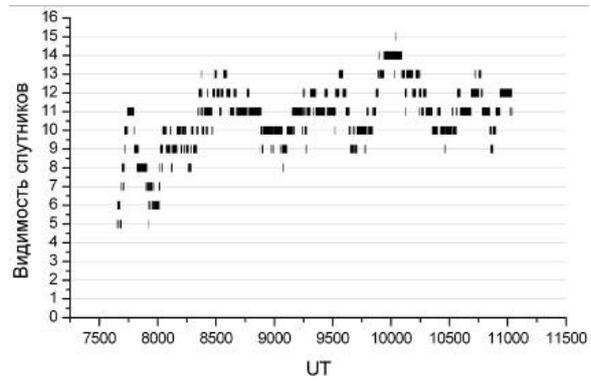
Таким образом, аппаратура SSAU-YES2 позволяла оценить влияние радиообмена с Землей на стабильность работы навигационной аппаратуры, влияние работы СУД на параметры движения центра масс КА «Фотон-М3», возмущающее влияние тросовой системы на движение КА «Фотон-М3», исследовать возможность косвенного контроля момента отрезания троса. Кроме этого, в результате использования аппаратуры SSAU-YES2 фактически проводилось летное испытание нового навигационного приемника МНП-М1 производства Ижевского радиозавода для уточнения возможностей его использования в дальнейшем для космических приложений.

#### Анализ качества полученных навигационных решений

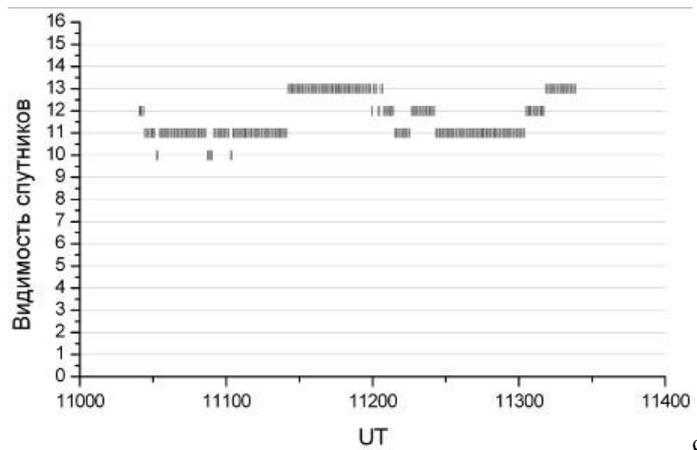
Принятые конструктивные решения об использовании двух антенн для обеспечения надежности приема сигналов от навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS полностью себя оправдали. На рис. 5 отображены видимости навигационных спутников для характерных этапов полета КА «Фотон-М3». Как видно из приведенных графиков, сохранялись хорошие условия для навигационных определений на протяжении всего времени проведения эксперимента

YES2. В среднем в зоне прямой видимости антенн находилось 10-12 навигационных спутников.

а)



б)



в)

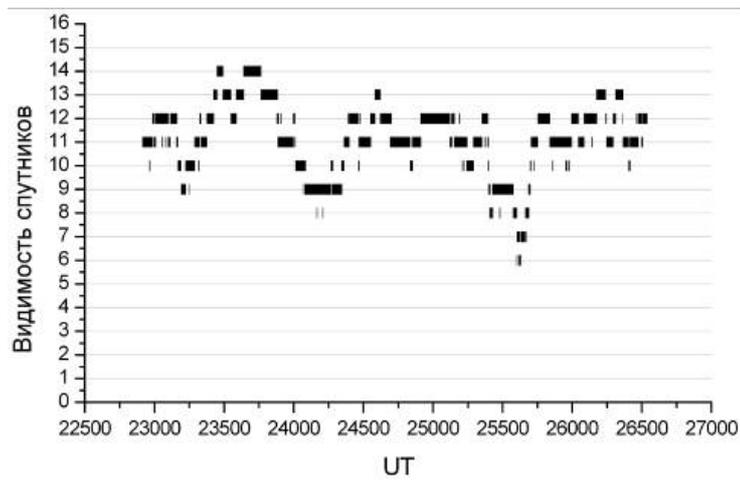


Рис. 5. Видимость навигационных спутников до включения СУД КА (на первом этапе) (а), во время разворота КА по тангажу (на втором этапе) (б), при развертывании троса (на шестом этапе) (в)

Для анализа качества навигационных решений использовались данные наземных траекторных измерений, полученные Центром управления полетом на сутки проведения эксперимента YES2 в восходящем узле орбиты:

дата 25.09.2007; московское время 10:32:54,455; номер витка 175;  
 параметры движения центра масс в геоцентрической системе координат:  
 $x=5670798,54$  м;  $y=3456838,98$  м;  $z=0,00$  м;  $V_x=1597,56913$  м/с;  $V_y=2587,77043$  м/с;  
 $V_z=6906,36201$  м/с,  
 баллистический коэффициент  $S=0,0981$  м<sup>2</sup>/кг.

Данная оценка параметров движения была принята в качестве эталонной для отбраковки измерений. В качестве критерия оценки качества измерений было выбрано значение полной энергии движения КА.

На рис. 6 представлена зависимость полной энергии движения КА «Фотон-М3», вычисленной по решениям, полученным из навигационного приемника, штриховой линией показано значение полной энергии, определенное для эталонных данных.

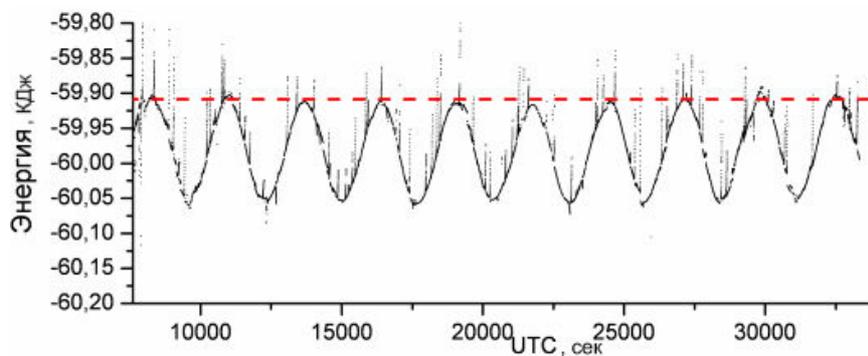


Рис. 6. Полная энергия движения КА «Фотон-М3» по результатам траекторных измерений

Значения энергии в узлах орбиты совпадают со значением энергии, подсчитанным по эталонной оценке. На графике наблюдаются выбросы (аномальные измерения), появление которых, вероятно, связано со сменой навигационного созвездия. При последующем анализе было обнаружено, что выбросы порождаются погрешностями в определении скорости движения, которые достигали 10 м/с.

В результате выполненного статистического анализа были отбракованы 1374 навигационных решений, что составило 5,6% от общего числа навигационных решений (24613), полученных аппаратурой SSAU-YES2. В результате для исследования ранее определенных характерных этапов 1-7 полета КА «Фотон-М3» использовались, соответственно, 2876, 299, 5598, 3848, 1476, 3456, 5667 навигационных решений.

### Восстановление движения КА «Фотон-М3» и исследование возмущающего влияния тросовой системы

Для послеполетной обработки навигационных решений была разработана методика, ориентированная на решение следующих задач: восстановление с максимальной точностью движение КА «Фотон-М3» во время проведения тро-

сового эксперимента YES2; оценка погрешности навигационных решений экспериментального навигационного приемника МНП-М1, впервые работавшего в космосе; исследование возможности решения навигационной задачи при приеме навигационного сигнала от нескольких антенн в случае неблагоприятной ориентации КА во время проведения научных экспериментов; оценка возможности использования навигационного приемника средней точности для контроля влияния СУД КА на движение его центра масс; исследование влияния тросовой системы на траекторию движения КА во время ее развертывания; оценка возможности использования навигационного приемника средней точности для контроля момента отрезания троса и изменения траектории движения КА после отрезания троса.

Технология восстановления движения КА «Фотон-М3» была выбрана на основании реализованной циклограммы проведения эксперимента YES2.

От момента включения аппаратуры до момента начала работы СУД (этап 1) отыскивается эталонная орбита по методу наименьших квадратов с использованием эталонного значения баллистического коэффициента [3].

Далее на этапе вертикализации КА и его ориентированного движения до момента начала развертывания троса (этапы 2 и 3) эталонная орбита находится с одновременным уточнением баллистического коэффициента [4]. В результате определяется вектор параметров движения центра масс и значение баллистического коэффициента на момент начала формирования тросовой системы ( $q_{тр0}$ ,  $S_B$ ). После этого на этапах развертывания троса (этапы 4-6) выполняется обработка навигационных решений в предположении, что известен начальный вектор состояния КА  $q_{тр0}$ , а на всем протяжении рассматриваемого участка движения известны баллистический коэффициент  $S_B$  и сила натяжения троса (измерялась тензометром, установленном на блоке FLOYD). В результате определяется вектор состояния КА на момент завершения развертывания троса  $q_{трк}$ .

Для участка полета после отрезания троса (этап 7) навигационные решения обрабатываются аналогично первому этапу при использовании значения баллистического коэффициента  $S_B$ . При этом находится оценка параметров движения на момент времени сразу после отрезания троса  $q_v$ . Изменение параметров орбиты, обусловленное исчезновением силы натяжения на последнем этапе эксперимента, косвенно подтверждает успешность развертывания тросовой системы и срабатывание системы отрезания троса [5]. Эти данные позволяют уточнить район падения спускаемой капсулы.

Реализация первого этапа вышеописанной технологии с использованием измерений после предварительной отбраковки привела к построению эталонной орбиты с большими ошибками (средняя ошибка по положению 2130 м).

На рис. 7 приведены отклонения навигационных решений от эталонной орбиты по радиусу-вектору  $\Delta R$  (■), вдоль орбиты  $\Delta T$  (●), по нормали к плоскости орбиты  $\Delta N$  (▲).

Также были получены большие погрешности и в проекциях скорости. Сопоставление с результатами предварительной отбраковки навигационных решений позволило сформировать гипотезу о наличии систематических ошибок в определении проекций скорости навигационным приемником. Включив в вектор оцениваемых параметров систематические ошибки в определении скорости движения и подобрав оптимальную матрицу весовых коэффициентов в методе наименьших квадратов из условия снижения влияния на результат составляющих скорости, была построена новая эталонная орбита (рис. 8, а), погрешность

которой снизилась более чем на два порядка (средняя погрешность по положению составила 8 м).

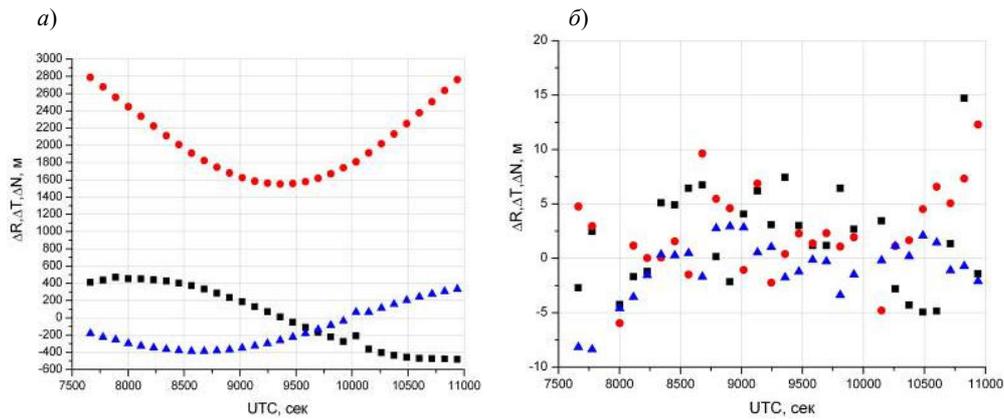


Рис. 7. Погрешности построения эталонной орбиты при использовании первичных измерений (а) и после устранения систематических ошибок по скорости (б)

Построение эталонной орбиты на втором и третьем этапах было осуществлено с учетом опыта, полученного на первом этапе, со средней ошибкой по положению около 20 м. Обработка навигационных решений не позволила выявить возможное влияние СУД на изменение параметров орбиты КА.

Результаты восстановления движения КА «Фотон-М3» во время формирования тросовой системы отражены на рис. 8, где сплошной линией показано отклонение в движении КА «Фотон-М3» относительно опорного движения, рассчитанного без учета натяжения троса, для случая реализации номинального закона разворачивания тросовой системы, штриховой линией – для случая учета реальных сил натяжения.

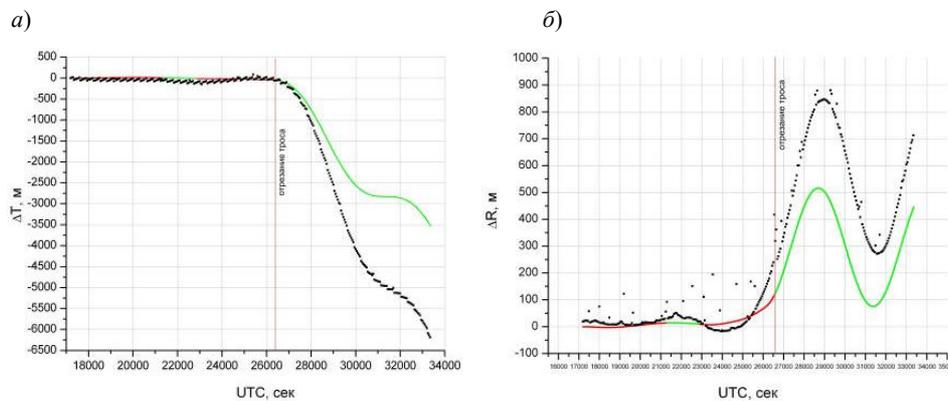


Рис. 8. Возмущения в движении КА «Фотон-М3» вдоль орбиты (а) и по радиусу-вектору (б)

Построение эталонной орбиты после отрезания троса показало, что в результате отделения тросовой системы КА «Фотон-М3» перешел на новую орбиту, причем на протяжении последующего витка полета ее высота увеличилась

на 250-850 м по сравнению с орбитой, по которой совершалось движение перед моментом отрезания троса.

На рис. 9 приведены показания магнитометра, входящего в состав аппаратуры SSAU-YES2, измеряющего напряженность магнитного поля Земли в проекциях на оси связанной с КА системы координат. На этом рисунке выделена область с зафиксированными высокочастотными колебаниями в измерениях, отражающими возникшие колебания КА «Фтон-МЗ» относительно местной вертикали. Эти колебания объясняются нештатным режимом развертывания тросовой системы, который возник из-за выхода из строя компьютера, обеспечивающего управление разматыванием троса. В результате после полного разматывания троса не была погашена относительная скорость движения и происходили отскоки (рывки) блока FLOYD вместе с капсулой FOTINO.

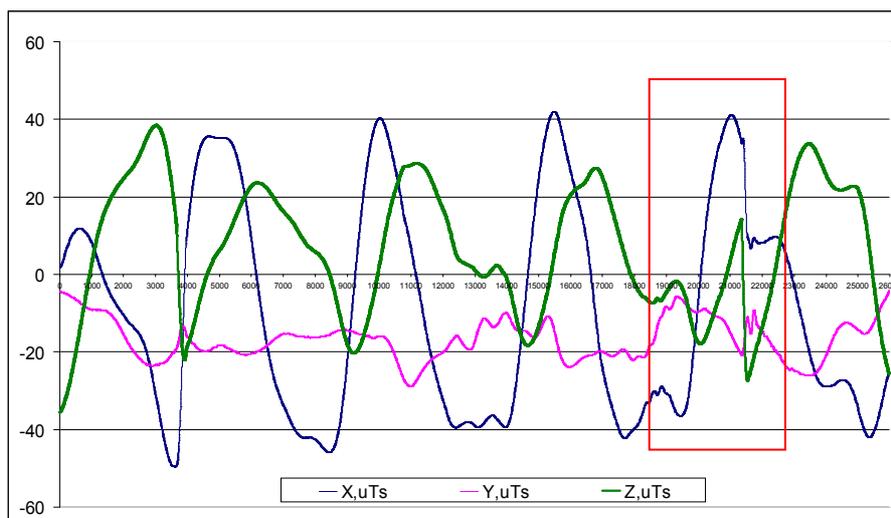


Рис. 9. Магнитометрические измерения во время эксперимента YES2

### Заключение

1. Навигационное сопровождение тросовых космических экспериментов требует тщательного предварительного анализа и отбраковки аномальных измерений, а также модификации и настройки существующих методик послеоперационного анализа и построения эталонных орбит движения.

2. Формирование тросовой системы длиной порядка 30 км вызывает заметные возмущения в движении низковысотного КА, которые выделяются на фоне торможения атмосферой.

3. Целесообразно использовать спутниковые радионавигационные технологии для контроля движения низковысотных космических аппаратов и процесса развертывания тросовых систем. Для навигационного сопровождения тросовых экспериментов на низких высотах (для косвенного контроля факта отрезания троса) достаточно использовать навигационные приемники средней точности.

4. Подтверждена эффективность использования двух навигационных антенн для обеспечения видимости достаточного числа навигационных спутников и

получения навигационных решений в неблагоприятных условиях приема сигнала, когда направление оси диаграммы направленности антенны сильно отклонено от зенита.

5. Использованный на КА «Фотон-М3» навигационный приемник МНП-М1 обеспечил низкую точность определения вектора скорости движения и требует доработки.

6. Движение низковысотного КА «Фотон-М3» во время проведения тросового эксперимента YES2 существенно отличалось от обычного движения низковысотных космических аппаратов и имело особенности, обусловленные влиянием тросовой системы. Отделение троса вызвало заметное изменение орбиты КА «Фотон-М3».

7. В целом проведенный эксперимент следует считать удачным, а аппаратуру SSAU-YES2 после доработки можно использовать для навигационного сопровождения аналогичных миссий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 09-08-00842-а).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Michiel Kruijff.** Summary of Data Analysis of the YES2 Tethered SpaceMail Experiment. - Delft University of Technology, 2008.
2. **Авдеев, Ю.Ф.** Полет космических аппаратов. Примеры и задачи: Справочник / Под общ. ред. Г.С.Титова / Ю.Ф.Авдеев [и др.].- М.: Машиностроение, 1990.
3. **Белоконов, И.В.** Методика построения эталонной орбиты движения низковысотного космического аппарата в условиях нестабильного приема сигналов от спутниковой радионавигационной системы / И.В.Белоконов, В.А.Боровков, С.А.Собода / 5-я межд. конф. «Авиация и космонавтика-2006».- М.: Изд-во МАИ, 2006.- С. 59.
4. **Igor V. Belokonov, Nikolay D. Semkin.** The navigational experiments on microgravitational space platform "FOTON-M2"/ Acta Astronautica, 64 (2009), 1180-119.
5. **Белоконов, И.В.** Результаты навигационного эксперимента SSAU-YES2 на КА «Фотон-М3» / И.В.Белоконов [и др.] / Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках: Тез. докл. межд. конф. «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках».- Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. - С. 126.

**Abstract.** Tether systems are a promising line of development of space technologies. They can be used for various purposes, including those for return of small payloads from low-Earth orbits as, for example, in experiment YES2 which was carried out by the European Space Agency on the space vehicle (SV) "Foton-M3" in September, 2007. The key element on which the success of tether system deployment depends is qualitative navigational tracking of an experiment. In the report the navigational tracking system of tether system deployment created at Samara State Aerospace University which was placed on the space vehicle "Foton-M3" is described. The navigational system consisted of two navigational antennas, a fixed-frequency two-system (GPS/GLONASS) satellite radio navigation receiver and a magnetometer. The results of processing of the measurements received from the navigational tracking system during the YES2 experiment are discussed. These results made it possible both to estimate the SV "Foton-M3" motion during the YES2 experiment and to make indirect conclusions about real tether system deployment and tether cutting. This work was supported by grant of Russian Foundation for Basic Research (№ 09-08-00842-a).