

УДК 550.380, 551.508

## ЗАМЫСЕЛ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОТСТЫКОВАННОГО ТРАНСПОРТНОГО ГРУЗОВОГО КОРАБЛЯ «ПРОГРЕСС» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

А.В. Тертышников

Рассмотрен замысел космического эксперимента по оцениванию воздействия гелиогеофизической активности на состояние верхней атмосферы и торможение отстыкованного транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» или запускаемого с Международной космической станции малого КА с бортовым многочастотным и многоантенным приемником сигналов глобальных навигационных спутниковых (ГНСС) систем ГЛОНАСС/GPS.

Полученные результаты позволят уточнить модель плотности для баллистического обеспечения полетов ИСЗ, гелиогеофизическое влияние на состояние верхней атмосферы и ионосферы, исследовать морфологию сейсмоорбитальных эффектов, провести валидацию наземных средств контроля космического пространства, повысить эффективность эксплуатации КА.

Ключевые слова: космический эксперимент, космический аппарат, глобальные навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС/GPS, приемник, антенна, плотность, атмосфера.

### ВВЕДЕНИЕ

Прямых методов измерения плотности атмосферы нет [1]. Характеристики плотности верхней атмосферы исторически определялись с помощью уточнения теоретических моделей данными наблюдений за торможением падающих объектов [2]. Они являются первичными преобразователями при исследовании морфологии и оперативной диагностике плотности верхней атмосферы.

Для наблюдения объектов в ОКП используются наземные радиотехнические радиолокационные и оптические комплексы систем контроля космического пространства [3]. Но и они требуют регулярной валидации.

### СУЩНОСТЬ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

Наиболее совершенными моделями верхней атмосферы считаются MSIS-86 и CIRA-86, принятая в 1989 г. на основе обобщения MSIS-86 [1]. В отечественных проектных разработках при расчетах аэродинамических характеристик КА используются также:

- 1) Модель верхней атмосферы для баллистических расчетов, в которой использованы данные о торможении КА;
- 2) ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная;
- 3) ГОСТ 25645.101-83. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для проектных

баллистических расчетов ИСЗ;

4) ГОСТ 25645.101-83. Атмосфера Земли верхняя. Методика расчета вариаций плотности (среднесуточных оценок);

5) ГОСТ 25645.101-83. Расчеты баллистические ИСЗ. Методика расчета индексов солнечной активности;

6) ГОСТ 25645.115-84. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов ИСЗ;

7) ГОСТ 25645.166-2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов ИСЗ;

8) РД 50-25645.120-85. Методика расчета индексов солнечной и геомагнитной активности для определения плотности и др.

Эти модели описывают, в основном, атмосферу средних широт на высотах 350-450 км. В различных магнитовозмущенных условиях модели дают значительные расхождения.

Повышенное торможение КА существенно снижает ресурсы функционирования КА [4]. В результате натуральных аэродинамических космических экспериментов (например, с помощью пассивных эталонных КА «ПИОН», отделяемых от КА «Ресурс-Ф») удалось уточнить коэффициенты сопротивления сферических КА, покрытых разными материалами, баллистические коэффициенты КА, используемых средствами контроля ОКП в качестве эталонных отражателей, оценки

плотности верхней атмосферы на высотах 150-450 км.

В последние годы получены оценки влияния на торможение малых КА в ОКП, казалось бы, второстепенных факторов, не учитываемых в баллистических расчетах. Так, в [4] получены оценки ускоренной потери высоты низкоорбитальных КА перед сильными землетрясениями. Эти оценки были подтверждены в [8, 9] по данным бортового акселерометра. Он был использован почти 30 лет назад в Российском космическом эксперименте по диагностике плотности верхней атмосферы, когда также проводились российские эксперименты по наблюдению торможения падающих сфер диаметром ~0,5 м. Наблюдать их было технически сложно. В США размеры эталонных падающих сфер, запускаемых на высоты порядка 400 км, достигали 2 м. Они использовались не только для уточнения моделей плотности верхней атмосферы, но и для юстировки радиолокационных станций контроля космического пространства.

Основной вклад в торможение КА в ОКП вносит сопротивление атмосферы, на плотность которой влияет солнечная и геомагнитная активность. В верхней атмосфере суточные вариации плотности достигают порядка величины [1].

Сила сопротивления атмосферы противоположна направлению движения КА [4-7]:

$$X=C_x \frac{\rho V_{омн}^2}{2} S, \quad (1)$$

где  $V_{омн}$  – скорость набегающего на КА газового потока с поправкой на ветер,

$C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления КА,

$\rho$  – плотность атмосферы,

$S$  – площадь максимального сечения КА.

В расчетах используют баллистический коэффициент  $k_b = C_x S / 2m$  [6].

Скорость убывания высоты КА с круговой орбитой в ОКП при балансе сил тяжести и центростремительного ускорения [7]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{C_x \rho S h^2 V_{омн}^3}{\gamma m M}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – гравитационная постоянная,

$M$  – масса Земли,

$m$  – масса КА.

Результаты интегрирования (2) при различных условиях свидетельствуют о том, что точность определения навигационных характеристик объектов в ОКП с помощью

существующих систем контроля космического пространства на основе наземных радиотехнических радиолокационных и оптических комплексов оказывается грубой. Так, для КА «Монитор-Э» в спокойных гелиогеофизических условиях потери высоты составляли в период его активного функционирования в среднем 1-3 м/сутки [4, 8, 9]. Средства контроля космического пространства по прогнозам специалистов смогут достичь такой точности только к 2020 г. [4]. Поэтому для уточнения наземных данных наблюдений объектов в ОКП используются сложные модели баллистического обеспечения и расчета движения КА [9]. Их точность зависит от качества моделей плотности атмосферы и возможности их оперативной корректировки.

Существенно повысить точность определения координат КА в ОКП позволяет использование бортового многочастотного навигационного приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS. При этом точность позиционирования может достичь (по оценкам японских специалистов для КА «ALOS» – «Advanced Land Observing Satellite», был запущен в конце января 2006 г.) несколько сантиметров, а при мгновенном определении – в десятки см. Соответственно повышается качество оперативной детальной диагностики морфологии плотности верхней атмосферы, а высокоточное позиционирование КА на орбите позволяет провести валидацию наземных средств контроля космического пространства.

На двух КА проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, выведены на круговую орбиту с  $h \sim 500$  км в марте 2002 г., стартовая  $m=474$  кг), установлен блок приемной аппаратуры сигналов GPS, разработанный JPL (Black Jack GPS Receiver). Приемник позволяет принимать сигналы от 12 НКА GPS (24 канала) на 2 частотах. Заявленная точность определения орбиты – сантиметры.

На КА ВМС США GFO-1 (Geosat Follow-On1), который был предназначен для высокоточных траекторных измерений, были установлены 4 приемника GPS-сигналов.

Повысить точность позиционирования позволяет не только использование многосистемных определений, но и реализация функции многоантенности в бортовом навигационном приемнике сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo, повышенная частота опроса приемных каналов, использование специальных методов обработки данных и выявления слабых сигналов.

## ЗАМЫСЕЛ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В космическом эксперименте (КЭ) предлагается запуск с МКС малого КА или использование отстыкованного ТГК «Прогресс», оснащенных многочастотным и многоантенным навигационным приемником, позволяющим проводить высокоточные навигационные определения КА. При этом возможно использование отечественного бортового навигационного приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS [10, 11].

Цель КЭ – отработка технологии высокоточных бортовых навигационных измерений орбитальных объектов в различных гелиогеофизических условиях с помощью бортового многочастотного и многоантенного приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS.

По характеристикам принимаемых сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS предлагается также уточнить модели плотности и морфологию возмущений верхней атмосферы в различных гелиогеофизических условиях, провести валидацию наземных средств контроля космического пространства.

Среди аргументов о необходимости проведения КЭ в космических условиях следует отметить отставание России от зарубежной тенденции решения задачи зондирования плотности верхней атмосферы с помощью высокоточных навигационных определений с борта КА на основе приема сигналов ГНСС GPS/Galileo. Кроме того, Россия все больше используется только для подготовки оборудования КЭ. Например, в состав системы SSTI (Satellite-to-Satellite Tracking Instrument, разработано ФГУП НИИ прецизионного приборостроения) КА GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer — «исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений») входил приемник GPS, работающий по 12 НКА и 2 антенны L-диапазона.

Предлагаемый проект КЭ позволит России существенно продвинуться в направлении указанных исследований Европейского космического агентства и NASA. Кроме того, проведение заявленного КЭ позволит консолидировать ресурсы многих организаций, разработать технологию оперативного уточнения модели плотности верхней атмосферы в зависимости от гелиогеофизических условий, получить новые сведения о морфологии возмущений верхней

атмосферы.

Рентабельность предлагаемого космического эксперимента обусловлена экономией (на порядок и более) на ресурсах, необходимых для разработки и летных испытаний необходимого для отечественных космических проектов серийного бортового многофункционального навигационного приемника сигналов КНС ГЛОНАСС/GPS/Galileo, возможностью сравнительно дешевой валидации наземных средств контроля космического пространства, повышением эффективности функционирующих КА в ОКП, а также использованием отработанного ТГК «Прогресс».

Для реализации намеченной цели эксперимента по отработке технологии высокоточных бортовых навигационных измерений орбитальных объектов в различных гелиогеофизических условиях с помощью бортового многочастотного и многоантенного приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS целесообразно решить следующие задачи:

1. Исследование вариаций орбиты отстыкованного ТГК «Прогресс» или запускаемого с МКС малого КА с бортовым многочастотным и многоантенным приемником сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS;
2. Исследование качества сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS в ОКП;
3. Испытания радиофизической аппаратуры в условиях орбитального полета;
4. Эксперименты по зондированию характеристик космической погоды и возмущений верхней ионосферы по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

Целесообразность проведения КЭ в с борта МКС обусловлена:

- возможностью повышения эффективности использования ресурсов МКС и ТГК «Прогресс»;
- значительным сроком после последних российских космических экспериментов по диагностике характеристик плотности верхней атмосферы методом наблюдения за торможением КА в ОКП;
- необходимостью уточнения морфологии возмущений верхней атмосферы и ионосферы в различных гелиогеофизических условиях;
- сравнительно дешевой реализацией высокоточной технологии мониторинга плотности верхней атмосферы и валидации наземных средств системы контроля космического пространства на основе многофункционального бортового приемника

сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

### **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Научное оборудование устанавливается внутри малого космического аппарата или ТГК «Прогресс». Внешний антенный блок разворачивается с позиционированием разнесенных антенн в верхнюю полусферу.

Научное оборудование подключается к электропитанию и каналам сброса данных ТГК «Прогресс». После чего осуществляется запуск научного оборудования и отстыковка носителя научного оборудования от МКС.

Накопитель принимаемых данных должен быть энергозависимым и соединен с телеметрическими каналами системы бортового управления. К приемнику кабелями подключается внешний антенный блок из минимум двух разнесенных антенн.

В приемнике происходит запрограммированная обработка принятых сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS и расчет основных навигационных характеристик: координат позиционирования антенн, их скоростей и ускорений.

По изменению навигационных характеристик диагностируются аномальные участки орбиты, в том числе с использованием модели плотности верхней атмосферы, фактических гелиогеофизических условий, данных систем контроля космического пространства.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Сформирован замысел космического эксперимента по использованию отработанного ТГК «Прогресс» с бортовым многочастотным и многоантенным приемником сигналов глобаль-

ных навигационных спутниковых (ГНСС) систем ГЛОНАСС/GPS для диагностики плотности верхней атмосферы и решения ряда задач гелиогеофизического мониторинга.

Планируемые результаты выполненного КЭ:

1) данные о навигационных характеристиках носителя научного оборудования и характеристиках верхней атмосферы на высотах КА за период космического эксперимента;

2) результаты валидации наземных средств контроля космического пространства;

3) оценки функциональности бортового навигационного приемника и пригодности для использования в системах бортового управления отечественных КА.

Полученные навигационные характеристики используются для уточнения моделей верхней атмосферы и ее возмущений, валидации наземных систем контроля космического пространства, совершенствовании бортового навигационного приемника и баллистического обеспечения КА.

Возможные сложности в проведении КЭ могут быть связаны с реализацией рекомендации о направленности антенн приемника в верхнюю полусферу. Для малых КА без системы стабилизации решение этой задачи может быть обеспечено увеличением количества антенн и установка нескольких навигационных приемников. В приемовычислителе навигационного приемника предусмотрен автоматический выбор наиболее оптимальной конфигурации наблюдаемых навигационных КА с минимизацией ошибки позиционирования. Это допускает произвольное вращение носителя научного оборудования.

### **AN EXPERIMENT PROJECT: USING UNDOCKED “PROGRESS” FREIGHTER SPACECRAFT FOR UPPER-ATMOSPHERIC AIR DENSITY RESEARCH**

A.V. Tertyshnikov

The article considers an experiment to estimate heliogeophysical influence on the upper atmosphere by monitoring the orbital decay of either an undocked “Progress” freighter spacecraft or a small satellite launched from the International Space Station with a multi-frequency, multi-antenna GPS/GLONASS receiver.

The expected results would allow to improve density models for satellite orbit calculation, to track heliogeophysical influence on the upper atmosphere and ionosphere, to study the seismic-orbital effects morphology, to validate the ground-based satellite-tracking techniques and to increase efficiency of spacecraft utilization.

KEYWORDS: SPACE EXPERIMENT, SPACECRAFT, GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS GLONASS/GPS, RECEIVER, ANTENNA, DENSITY, ATMOSPHERE.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Седунов Ю. С. Атмосфера. Справочник. Справочные данные, модели. Л.:ГМИ, 1991. 508 с.
2. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. – М.:Дрофа, 2004. 544 с.
3. <http://www.celstrak.com/columns/v04n01>.
4. Тертышников А.В. Вариации торможения космического аппарата «Монитор-Э» перед сильными землетрясениями 2005-2006 гг. // Исследования Земли из космоса, 2006, № 5.
5. Радиотехнические комплексы для управления дальними КА и для научных исследований/Под ред. Е.П.Молотова. – М.:Физматлит, 2007. 232 с.
6. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) //Информация и космос. 2010, № 1.
7. Тертышников А.В., Чернявский Г.М., Скрипачев В.О. Вариации торможения космических аппаратов в верхней ионосфере перед сильными землетрясениями // Доклады академии наук, 2009, том 424, № 4.
8. Тертышников А.В., Липеровская Е.В., Скрипачев В.О. Первые оценки возмущений плотности верхней атмосферы над сейсмоопасными регионами по данным бортового акселерометра на космическом аппарате/ Материалы V международной конференции "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений" 2-7 августа 2010 г. с. Паратунка, Камчатский край. – Паратунка, 2010. С. 394-397.
9. Тертышников А.В., Скрипачев В.О. Способ прогнозирования времени сильных коровых землетрясений суши. МПК G01V 1/00 G01V 9/00, заявл. 2007 г., опубл. 2011 г.
10. Тертышников А.В. Многочастотный бортовой навигационный приемник сигналов КНС ГЛОНАСС/GPS для малых КА/Передовые космические технологии на благо человечества. Труды 3 Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее». Днепропетровск, 20-22 апреля 2011 г.
11. Тертышников А.В. Экспериментальный образец бортового навигационного приемника сигналов КНС ГЛОНАСС/GPS для отечественных малых космических аппаратов/ Доклады IY Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» 15-17 июня 2011 года. – М.:ОАО «РКС», 2011.