

## ТЕХНОЛОГИЯ ЗАПУСКА МИКРОСПУТНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСПОРТНЫХ ГРУЗОВЫХ КОРАБЛЕЙ ТИПА «ПРОГРЕСС-М»

© 2015 г. Марков А.В., Матвеева Т.В., Муртазин Р.Ф., Смирнов А.В.,

Соловьев В.А., Сорокин И.В., Чурило И.В., Хамиц И.И.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)  
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

*Малые космические аппараты имеют большое значение для решения научных и прикладных задач в околоземном космическом пространстве. Программа Международной космической станции (МКС) дала возможность реализовать новые способы выведения микроспутников на орбиту, конкурирующие с традиционной их доставкой в космос с помощью ракет-носителей легкого класса. К этим способам относятся запуск вручную микро- и наноспутников российскими членами экипажа МКС во время внекорабельной деятельности, а также выведение их на орбиту в автоматическом режиме с борта Американского сегмента МКС при использовании шлюзовой камеры и манипулятора модуля Kibo, оснащенного специальным пусковым устройством для наноспутников размерности CubeSat. Среди указанных способов особые возможности для выполнения экспериментов представляет запуск микроспутника с использованием в качестве пусковой платформы транспортного грузового корабля «Прогресс-М», являющегося важным элементом системы транспортно-технического обеспечения полета МКС. Запуск обеспечивается на участке автономного полета корабля после завершения выполнения им основной целевой задачи (доставки грузов на станцию). Лишь в этом случае микроспутник может быть выведен на целевую орбиту, имеющую не обязательно такую же высоту, как орбита МКС. Параметры орбиты малого космического аппарата могут быть изменены до заданной величины за счет работы двигательной установки грузового корабля, на борту которого находится микроспутник. Этим способом в 2012 г. на орбиту высотой 500 км был успешно выведен микроспутник «Чибис», разработанный Институтом космических исследований Российской академии наук и предназначенный для дистанционного исследования в широком спектре электромагнитных излучений физических процессов в атмосфере при высотных грозовых разрядах с помощью установленного на нем комплекса научной аппаратуры «Гроза». Успех этой ответственной операции обеспечивался тщательной предполетной подготовкой эксперимента, в ходе которой было решено немало трудоемких расчетных и инженерно-технических задач. Они включали разработку и изготовление транспортно-пускового контейнера микроспутника; цикл наземных испытаний сборки «микроспутник – контейнер»; подготовку микроспутника в контейнере к запуску экипажем Российского сегмента МКС; математическое моделирование; реализацию безопасной баллистической схемы при отделении микроспутника от грузового корабля и др. В статье проанализированы методы решения указанных задач и полученные результаты. Представлена прошедшая верификацию в условиях реального космического полета технология запуска малых космических аппаратов с борта транспортных грузовых кораблей. Описаны разработанные для этого аппаратурные средства.*

**Ключевые слова:** микроспутник, транспортно-пусковой контейнер.

## LAUNCH PROCEDURE OF MICROSATELLITES USING PROGRESS-M-TYPE CARGO TRANSPORT VEHICLES

Markov A.V., Matveeva T.V., Murtazin R.F., Smirnov A.V., Soloviev V.A.,

Sorokin I.V., Churilo I.V., Khamits I.I.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)  
4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation,  
e-mail: post@rsce.ru

*Small spacecraft are very important for solving scientific and applied tasks in near-Earth space. The International Space Station (ISS) program provided an opportunity to develop and implement new concepts of inserting microsatellites into orbit which can compete with the traditional method of delivering them into space aboard light-class launchers. Among the concepts there are micro- and nanosatellites launch by the Russian crewmembers of the ISS manually during their extravehicular activity, as well as injection into orbit in the automatic mode from board the ISS USOS when using an airlock and a robotic arm of the Kibo Module equipped with a special launching device for nanosatellites like CubeSat. The indicated concepts have special capabilities to carry out experiments, namely launch of microsatellite using as a launch platform for the Progress-M cargo transport vehicle which is as an important system element for the transport-technical support of the ISS flight. The launch is carried out in the autonomous flight phase of the vehicle upon completion of the main target task (cargo delivery to the Station). Only in this case microsatellite can be injected into the target orbit which does not necessarily have the same altitude as the ISS orbit. The microsatellite orbit parameters can change to the prescribed value at the expense of the propulsion system operation of the cargo vehicle onboard of which there is microsatellite. By this method the Chibis microsatellite was successfully launched into orbit of an altitude of about 500 km in 2012. This microsatellite was developed by the Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences and intended for remote investigation in a wide electromagnetic spectrum of physical processes in the upper atmosphere at lightning discharges using Groza science hardware set installed in it. Success of this responsible operation was provided by thorough preflight preparation for the experiment, during which a lot of labor-intensive computational and engineering problems were solved. These tasks included: development and manufacture of the microsatellite transporting and launching container; a cycle of “microsatellite–container” assembly ground tests; preparation of the microsatellite in the container for launch by the crew of the ISS Russian Segment; mathematical simulation, implementation of a safe ballistic scheme during the microsatellite separation from the cargo vehicle, etc. In this paper the methods used to solve the listed problems and the results obtained are analyzed. The space-proven methodology for launching microsatellites from cargo transport vehicles is presented. The hardware developed for these purposes is also described.*

**Key words:** microsatellite, transporting and launching container.



МАРКОВ А.В.



МАТВЕЕВА Т.В.



МУРТАЗИН Р.Ф.



СМИРНОВ А.В.



СОЛОВЬЕВ В.А.



СОРОКИН И.В.



ЧУРИЛО И.В.



ХАМИЦ И.И.

МАРКОВ Александр Викторович — руководитель НТЦ РКК «Энергия»,  
e-mail: [alexander.v.markov@rsce.ru](mailto:alexander.v.markov@rsce.ru)

MARKOV Alexander Viktorovich — Head of STC at RSC Energia, e-mail: [alexander.v.markov@rsce.ru](mailto:alexander.v.markov@rsce.ru)

МАТВЕЕВА Татьяна Владимировна — ведущий инженер-испытатель РКК «Энергия», e-mail: [tatiana.v.matveeva@rsce.ru](mailto:tatiana.v.matveeva@rsce.ru)

MATVEEVA Tatiana Vladimirovna — Lead testing engineer at RSC Energia, e-mail: [tatiana.v.matveeva@rsce.ru](mailto:tatiana.v.matveeva@rsce.ru)

МУРТАЗИН Рафаил Фарвазович — кандидат технических наук, заместитель начальника отдела РКК «Энергия», e-mail: [rafail.murtazin@rsce.ru](mailto:rafail.murtazin@rsce.ru)

MURTAZIN Rafail Farvazovich — Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Department at RSC Energia, e-mail: [rafail.murtazin@rsce.ru](mailto:rafail.murtazin@rsce.ru)

СМИРНОВ Алексей Викторович — ведущий инженер РКК «Энергия», e-mail: [alexey.smirnov@rsce.ru](mailto:alexey.smirnov@rsce.ru)

SMIRNOV Aleksey Viktorovich — Leading engineer at RSC Energia, e-mail: [alexey.smirnov@rsce.ru](mailto:alexey.smirnov@rsce.ru)

СОЛОВЬЕВ Владимир Алексеевич — доктор технических наук, летчик-космонавт, первый заместитель генерального конструктора РКК «Энергия», e-mail: [vladimir.soloviev@rsce.ru](mailto:vladimir.soloviev@rsce.ru)

SOLOVIEV Vladimir Alekseevich — Doctor of Science (Engineering), Pilot-Cosmonaut, First Deputy General Designer at RSC Energia, e-mail: [vladimir.soloviev@rsce.ru](mailto:vladimir.soloviev@rsce.ru)

СОРОКИН Игорь Викторович — доктор технических наук, заместитель руководителя НТЦ РКК «Энергия», e-mail: [igor.v.sorokin@rsce.ru](mailto:igor.v.sorokin@rsce.ru)

SOROKIN Igor Viktorovich — Doctor of Science (Engineering), Deputy Head of STC at RSC Energia, e-mail: [igor.v.sorokin@rsce.ru](mailto:igor.v.sorokin@rsce.ru)

ЧУРИЛО Игорь Владимирович — кандидат технических наук, начальник отдела РКК «Энергия», e-mail: [igor.churilo@rsce.ru](mailto:igor.churilo@rsce.ru)

CHURILO Igor Vladimirovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Department at RSC Energia, e-mail: [igor.churilo@rsce.ru](mailto:igor.churilo@rsce.ru)

ХАМИЦ Игорь Игоревич — руководитель НТЦ РКК «Энергия», e-mail: [igor.khamits@rsce.ru](mailto:igor.khamits@rsce.ru)

KHAMITS Igor Igorevich — Head of STC at RSC Energia, e-mail: [igor.khamits@rsce.ru](mailto:igor.khamits@rsce.ru)

## Введение

Малые космические аппараты (МКА), традиционно подразделяемые на микро-, нано- и пикоспутники [1], с каждым годом приобретают все большее значение для решения научных и прикладных задач в околоземном космическом пространстве, прежде всего связанных с исследованиями Земли из космоса, обеспечением связи, навигации, выполнения специальных задач контроля и наблюдения [1]. Эта тенденция обусловлена высокой экономической эффективностью МКА, основанной на относительно низкой стоимости (иногда на порядки, в сравнении с более крупными космическими аппаратами) их изготовления и эксплуатации. С точки зрения эффективности ключевым элементом технологии реализации проектов создания и целевого использования МКА являются способы и средства их доставки на околоземную орбиту. В зависимости от типа эти спутники могут выводиться в виде кластера из нескольких (иногда — десятков [2]) МКА специальной ракетой-носителем (РН) легкого класса, могут доставляться на орбиту

как попутный груз при запусках КА большей размерности с помощью РН среднего и тяжелого классов. В то же время, Программа Международной космической станции (МКС) дала возможность реализовать и принципиально новые способы выведения МКА, конкурирующие с традиционными. На сегодняшний день их три:

- запуск вручную МКА нано-, пико- и микрогабаритности, доставленных на станцию в составе грузового или пилотируемого корабля, членом экипажа МКС в ходе внекорабельной деятельности (ВКД);
- запуск МКА с использованием шлюзовых камер и робототехнических средств МКС без выполнения ВКД экипажем — в настоящее время для этого используются технические средства японского модуля *Kibo*, а в перспективе — и российского модуля «Наука»;
- доставка и запуск МКА с использованием транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс-М», являющегося важным элементом системы транспортно-технического обеспечения полета МКС. Запуск обеспечивается на участке автономного полета ТГК до,



во время или после завершения выполнения им основной целевой задачи.

Из всех перечисленных вариантов только в последнем случае обеспечивается выведение МКА на целевую орбиту, имеющую не обязательно такую же высоту, как и орбита МКС — она может быть поднята до заданной величины за счет работы двигательной установки ТГК «Прогресс-М», на борту которого находится МКА.

Начало отработке рассматриваемой новой технологии было положено выведением на орбиту с борта ТГК образовательного микро-спутника «Колибри» весной 2002 г. [3]. Микро-спутник (МС) массой 20,5 кг был оснащен научной аппаратурой для изучения вариаций интенсивности потоков солнечных космических лучей в период максимума 11-летнего цикла солнечной активности. Срок его активного существования составил полтора месяца.

Для запуска спутника использовалась следующая, уже ставшая типовой, схема.

*На первом этапе* обеспечивалась транспортировка МКА на борт МКС в составе доставляемых грузов и его хранение до запуска.

*На втором этапе* выполнялась отстыковка ТГК от МКС, вывод его в точку запуска МКА с последующим отделением МС от грузового корабля по согласованной циклограмме. Перед выполнением этих операций экипаж обеспечивал подготовку МС, находящегося в транспортно-пусковом контейнере (ТПК), к запуску и проводил его установку на шпангоуте стыковочного агрегата (СтА) ТГК в стартовое положение; производилось подключение сборки МКА–ТПК к бортовым системам корабля «Прогресс-М». После расстыковки ТГК с Российским сегментом (РС) МКС и доставки МС в точку запуска выдавалась команда на автоматическое отделение МКА от грузового корабля.

Эта отработанная в условиях космического полета методология используется и в космическом эксперименте (КЭ) «Микро-спутник», проводимом с января 2012 г. по настоящее время [4].

### Постановка задачи

Постановщиком эксперимента, основная цель которого состоит в дистанционном исследовании в широком спектре электромагнитных излучений физических процессов в атмосфере при высотных грозовых разрядах, является Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН). Комплекс научной аппаратуры «Гроза» размещен на борту МС «Чибис-М», разработанного и изготовленного в СКБ КП ИКИ РАН [4]. Для увеличения

срока активного существования МКА высота его начальной орбиты должна была составить около 500 км, что почти на 100 км превосходит высоту орбиты МКС. Это требование было обеспечено благодаря размещению МС на борту ТГК «Прогресс-М-13М», который с помощью собственной двигательной установки доставил МКА на заданную орбиту, после чего было выполнено успешное отделение МС от корабля и увод последнего с отработкой номинальной циклограммы полета.

Успех выполнения этой ответственной операции обеспечивался тщательной предполетной подготовкой эксперимента, в ходе которой было решено немало трудоемких расчетных и инженерно-технических задач. В частности, были выполнены:

- проверка заложенных в конструкцию транспортно-пускового контейнера технических решений по доставке и отделению МС от ТГК «Прогресс-М»;
- проверка технологических решений, связанных с проведением наземных испытаний ТПК и МС, а также подготовительных и монтажных работ, связанных с доставкой МС на МКС;
- отработка методики подготовки ТПК и МС на борту РС МКС и корабля «Прогресс-М» к проведению КЭ;
- отработка технологии доставки МС с орбиты МКС на более высокую (500 км) орбиту с помощью ТГК «Прогресс-М»;
- реализация безопасной баллистической схемы при отделении МС «Чибис-М» от ТГК «Прогресс-М».

### Наземная подготовка эксперимента, проектирование и разработка технических средств обеспечения эксперимента

Одним из основных этапов подготовки КЭ стало проектирование и разработка ТПК.

Исходя из требований к проведению эксперимента, этот контейнер должен обеспечивать:

- механическую защиту МС при транспортировании, погрузочно-разгрузочных и монтажных работах;
- связь по электропитанию с МС для подзарядки буферных батарей МС от блока силовой коммутации ТГК;
- запуск МС в автоматическом режиме с борта ТГК;
- обеспечение безопасности экипажа МКС на всех этапах транспортировки, технического обслуживания и эксплуатации ТПК.

С использованием данных о конструкции и функциональных особенностях ТПК, его узлов и механизмов, были определены



ограничения по его массе, габаритам, применяемым материалам, энергопотреблению. Кроме того, выполнена привязка контейнера к габаритам люка ТГК.

В целом ТПК представляет собой специализированную механическую конструкцию с элементами крепления полезной нагрузки на внутренней поверхности и блоками электроники. В его состав входят: собственно контейнер, зарядный блок, механизм зачековки МС, механизм фиксации контейнера в люке ТГК, механизм выдвижения МС, защитные крышки и защитный экран.

Поскольку в механизме зачековки контейнера используются электроспуски одноразового действия, возникла необходимость исключения ремонтно-восстановительных работ с летным образцом ТПК и МС из плана проведения наземных электрических испытаний в составе ТГК. Для этого был разработан и изготовлен имитатор ТПК с МС, оснащенный технологическими кабелями. В связи с тем, что перед погрузкой снаряженного контейнера в ТГК буферные батареи МКА должны быть полностью заряжены, был разработан пульт заряда/разряда МС. Для исключения несанкционированного срабатывания механизма зачековки заряда батареи производилась через специальный технологический разъем.

### Наземные испытания на экспериментальной базе РКК «Энергия»

Сложность и важность решаемых при подготовке КЭ задач потребовали особого внимания к обеспечению надежности и безопасности создаваемых технических средств. Планирование и проведение конструкторско-доводочных испытаний ТПК с МС обеспечивались разработчиком МС в полном соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Особое внимание уделялось экспериментальной отработке средств расчековки и отделения МС в условиях действия факторов открытого космического пространства, проведенной с использованием экспериментальной базы РКК «Энергия».

Одним из наиболее важных этапов этого процесса стали термовакуумные испытания ТПК с МС, в результате проведения которых было обеспечено:

- подтверждение работоспособности ТПК при имитации воздействия внешних тепловых потоков, соответствующих условиям летной эксплуатации контейнера в составе ТГК «Прогресс-М» после его отделения от РС МКС;
- подтверждение при заданных тепловых условиях работоспособности механических

узлов ТПК, обеспечивающих выведение полезной нагрузки, а также механических узлов МКА, используемых в процессе его отделения от ТПК и предназначенных для автоматического раскрытия элементов конструкции МС после отделения.

В ходе подготовки к проведению термовакуумных испытаний ТПК с МС специалистами РКК «Энергия» был проведен тепловой расчет, максимально учитывавший условия эксплуатации рассматриваемой технической системы в составе МКС и ТГК «Прогресс-М» на орбите высотой 500 км.

Было выполнено шестнадцать вариантов расчета, отличающихся исходными данными по ориентации МС и величиной угла  $\beta$  между плоскостью орбиты и направлением на Солнце. В результате был определен диапазон температур ТПК с МС на момент его отделения, составивший  $-10...+32,6^\circ\text{C}$ , что находилось в пределах допустимых по ТЗ эксплуатационных значений температуры ( $-40...+50^\circ\text{C}$ ).

Термовacuумные испытания выполнялись в два этапа (для условий нахождения ТПК с МС в составе грузового корабля «Прогресс-М» и для условий автономного полета МС). Они прошли без замечаний, все поставленные задачи были успешно решены.

В процессе наземной отработки ТПК с МС были выявлены и устранены некоторые дефекты конструкции испытываемых объектов. В частности, в ходе конструкторско-доводочных испытаний было обнаружено заклинивание троса механизма выдвижения МКА. Анализ показал, что причиной возникновения этого дефекта стала неоптимальная конструкция роликов, которая была изменена. При проведении дальнейших испытаний замечаний к механизму выдвижения не было.

### Тренировки экипажей и заключительный этап наземной отработки

Тренировки членов экипажей МКС, которым необходимо было обеспечить готовность МС к запуску на орбите, стали важной частью наземной подготовки КЭ.

На базе ФГБУ «НИИ Центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» (ФГБУ НИИ ЦПК) с участием специалистов РКК «Энергия» и разработчиков МС и ТПК из СКБ КП ИКИ РАН были проведены тренировки:

- 30 августа 2011 г. — А. Шкаплерова и А. Иванишина (экспедиция МКС-29/МКС-30) — рис. 1;
- 07 октября 2011 г. — О. Кононенко (экспедиция МКС-30/МКС-31).

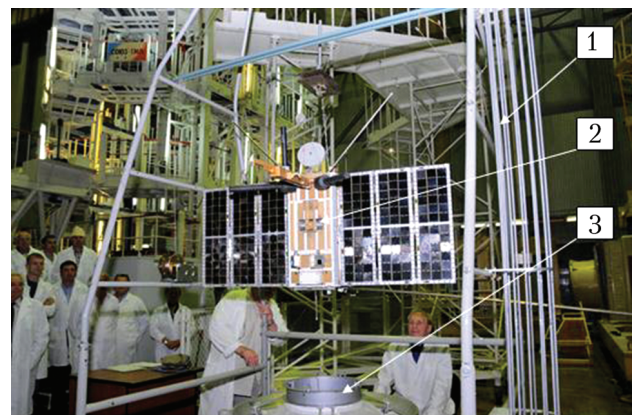


**Рис. 1.** Тренировка членов экипажа МКС-29/30 А. Шкаплев и А. Иваншина в ФБГУ НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина с тренажерным макетом ТПК и МС. Слева направо: А. Шкаплев (ФБГУ НИИ ЦПК), С. Киреевичев (РКК «Энергия»), А. Калужный (СКБ КП ИКИ РАН), А. Иваншин (ФБГУ НИИ ЦПК)

Результаты наземной экспериментальной отработки ТПК с МС рассматривались на заседаниях рабочих групп организаций-участников КЭ различных уровней. Немаловажное значение придавалось и всестороннему освещению научных задач проекта, а также его готовности к реализации. Итоги наземной подготовки эксперимента были подведены 14 июня 2011 г. в РКК «Энергия» во время заседания расширенного научно-технического совета (НТС) Корпорации на тему: «Научные задачи запуска и особенности конструкции микроspутника «Чибис-М» с целью экспертной оценки основных проектно-конструкторских решений, принятых при создании микроspутника». На заседании были рассмотрены вопросы готовности ТПК и МС к заключительному этапу их интеграции в состав ТГК «Прогресс-М».

После заседания НТС в цехе Завода экспериментального машиностроения РКК «Энергия» был продемонстрирован процесс отделения летного образца МС от транспортно-пускового контейнера, устанавливаемого в ТГК «Прогресс-М», с раскрытием элементов конструкции МКА в стенде обезвешивания (рис. 2).

После проведения полного цикла наземных отработочных испытаний и технической экспертизы, получения положительных заключений, аппаратура была поставлена в РКК «Энергия» и, после успешного прохождения входного контроля и автономных испытаний в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, отправлена на технический комплекс (ТК) космодрома Байконур для выполнения завершающего этапа предполетной подготовки.



**Рис. 2.** Демонстрация процесса отделения летного образца микроspутника (МС) от транспортно-пускового контейнера (ТПК) с раскрытием элементов конструкции МС в стенде обезвешивания на Заводе экспериментального машиностроения РКК «Энергия» им. С.П. Королева: 1 — стенд обезвешивания МС; 2 — МС «Чибис-М»; 3 — ТПК, установленный в макете стыковочного агрегата

Заключительные операции на ТК по зарядке аккумуляторов МС и проверке работоспособности механических узлов ТПК и МКА проводились непосредственно перед их установкой в грузовой корабль. После проверок ТПК с МС был размещен в грузовом отсеке ТГК «Прогресс М-13М» на транспортировочную раму, закрепленную на силовом каркасе корабля с учетом требуемого направления перегрузок (рис. 3). 30 октября 2011 г. грузовой корабль «Прогресс М-13М» стартовал к МКС.



**Рис. 3.** Микроspутник (МС) в транспортно-пусковом контейнере (ТПК), установленный на транспортировочной раме в грузовом отсеке транспортного грузового корабля «Прогресс М-13М»: 1 — ТПК с МС «Чибис-М»; 2 — транспортировочная рама

### Математическое моделирование и планирование эксперимента

В ходе наземной подготовки КЭ при выпуске заключения о его реализуемости были проанализированы схемы отделения МС «Чибис-М» от ТГК, проведены расчеты траекторий движения МС после отделения, оценка времени его существования на орбите.

Выполнен также расчет затрат топлива грузового корабля для его выведения в точку отделения МС при условии обеспечения гарантированного схода ТГК с орбиты.

Для выполнения КЭ отделение МКА от грузового корабля должно проводиться на орбите высотой ~500 км. Методами математического моделирования на этапе планирования эксперимента выполнен прогноз высоты орбиты МКС для интервала времени, благоприятного с точки зрения отделения МС, выбрана оптимальная двухимпульсная схема перехода ТГК на целевую орбиту с орбиты МКС (рис. 4).

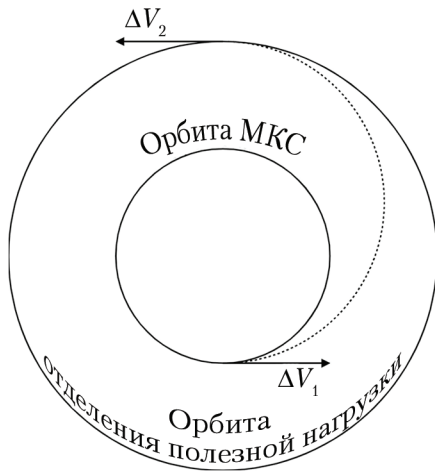


Рис. 4. Двухимпульсная схема перехода транспортного грузового корабля с орбиты МКС на целевую орбиту:  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  — приращение скорости транспортного грузового корабля при выполнении маневра

Были проведены расчеты по оценке характеристической скорости, необходимой для реализации такого маневра, а также затраты топлива для корабля массой 6 000 кг и удельным импульсом двигательной установки 3 000 м/с. Данные расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Приращение скорости и затраты топлива транспортного грузового корабля, необходимые для его перехода на орбиту высотой 500 км с орбиты МКС**

Высота орбиты МКС, км	Суммарный импульс, м/с	Затраты топлива, кг
380	67	135
390	62	125
400	56	113
410	50	101
420	45	91

Для контроля процесса отделения МС от ТГК использовалась телекамера из состава служебных систем грузового корабля. С ее помощью была обеспечена видеорегистрация

момента выхода МС из ТПК. Для решения этой задачи необходимо было исключить попадание прямых солнечных лучей в объектив телекамеры. С этой целью были выполнены расчеты оптимальных временных интервалов отделения МКА от ТГК с учетом того, что в планируемый момент отделения корабль находится в ориентации орбитальной стабилизации комплекса, ось телекамеры лежит в плоскости орбиты, а ее засветка не происходит на любом участке витка при угле  $\beta$  (угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце) больше  $32^\circ$ . В табл. 2 приводятся результаты расчетов интервалов времени, в течение которых засветки телекамеры не происходит.

Таблица 2

**Оптимальные по светотеневым условиям временные интервалы для отделения микроспутника от транспортного грузового корабля**

Интервал дат		Значение угла $\beta$
Начало	Окончание	
08.01.2011	29.01.2011	$-32...-72^\circ$
13.02.2011	22.02.2011	$32...40^\circ$
11.03.2011	27.03.2011	$-32...-52^\circ$
10.04.2011	29.04.2011	$32...63^\circ$
08.06.2011	29.06.2011	$32...75^\circ$
08.08.2011	27.08.2011	$32...65^\circ$
11.09.2011	26.09.2011	$-32...-50^\circ$
12.10.2011	23.10.2011	$32...42^\circ$
08.11.2011	28.11.2011	$-32...-71^\circ$
06.01.2012	27.01.2012	$-32...-73^\circ$

Для надежной и качественной видеорегистрации процесса отделения МС была рассчитана траектория его движения относительно ТГК со скоростью 1 м/с в течение 25 мин после разделения, приведенная на рис. 5. Створ телекамеры  $50^\circ$  направлен вперед по трансверсали и вверх по радиус-вектору ТГК, отмечены положения МС на траектории через 6, 10, 15, 20 и 25 мин после разделения.

Из диаграммы следует, что через 6 мин после разделения МС уходит из поля зрения телекамеры. Чтобы не допустить этого, была выработана рекомендация о выполнении программного разворота ТГК по тангажу на  $90^\circ$  через 6 мин после разделения (ось объектива телекамеры в этом случае будет направлена вверх по радиус-вектору), что позволяет время наблюдения за МС продлить до 25 мин.



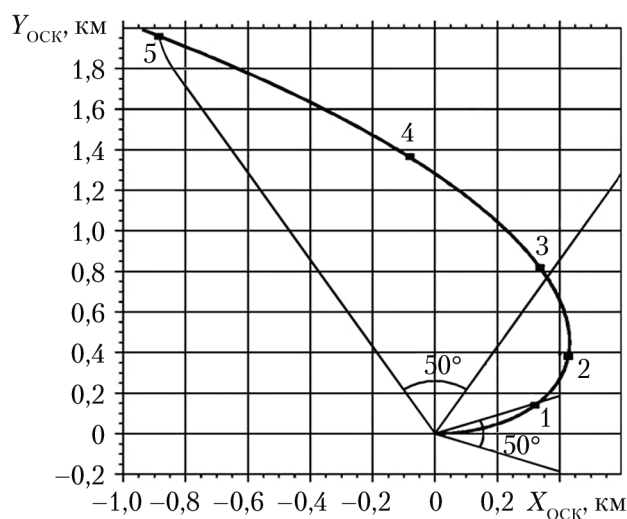


Рис. 5. Траектория движения микроспутника относительно транспортного грузового корабля (ТГК): 1 — 6 мин после разделения с ТГК; 2 — 10 мин; 3 — 15 мин; 4 — 20 мин; 5 — 25 мин

Результаты расчета изменения относительного расстояния между МС и ТГК в течение первых суток после разделения при двух допустимых скоростях выхода приведены на рис. 6. Из них следует, что затопление ТГК через сутки после разделения возможно, поскольку возврата МС к ТГК в течение этого времени не происходит.

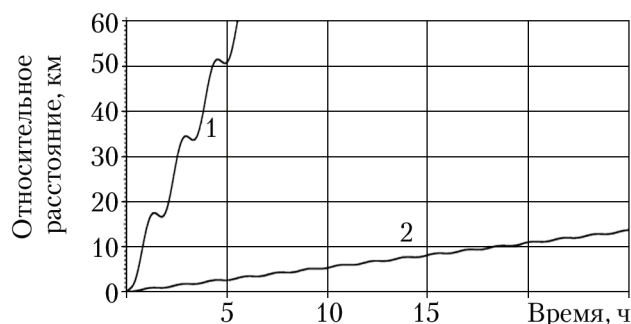


Рис. 6. График изменения относительного расстояния между микроспутником и транспортным грузовым кораблем: 1 —  $\Delta V_1 = 1 \text{ м/с}$ ; 2 —  $\Delta V_2 = 0,05 \text{ м/с}$

Несмотря на важность приведенных результатов расчетов, основной целью моделирования, тем не менее, была оценка времени существования МС на орбите. Было принято, что габаритные размеры спутника составят не более  $\varnothing 370 \times 605 \text{ мм}$ , и его масса не превысит 40 кг.

Такой объект имеет следующие баллистические коэффициенты:

- максимальный  $0,105 \frac{\text{м}^3}{\text{кгс} \cdot \text{с}^2}$ ;
- минимальный  $0,055 \frac{\text{м}^3}{\text{кгс} \cdot \text{с}^2}$ .

На рис. 7 приведены графики продолжительности существования МС на орбите в зависимости от плотности атмосферы.

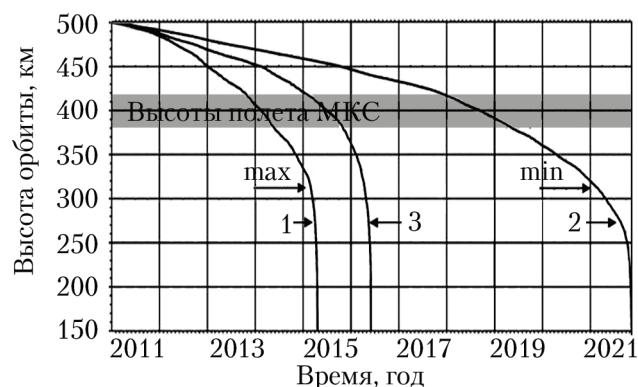


Рис. 7. Время существования микроспутника на орбите: 1 — при максимальном торможении, которое соответствует максимальному баллистическому коэффициенту и максимальной плотности атмосферы; 2 — при минимальном торможении, которое соответствует минимальному баллистическому коэффициенту и минимальной плотности атмосферы; 3 — при номинальном торможении, рассчитанном для среднего баллистического коэффициента при номинальной плотности атмосферы

В расчетах использовался прогноз центра Маршала, выполненный по состоянию на март 2010 г.

Из данных расчета следует, что высота орбиты МС снизится до высоты  $\sim 400 \text{ км}$  (высота орбиты МКС) при максимальном торможении через 3 года, при минимальном торможении — через  $\sim 7$  лет. Время нахождения МКА на высотах 390...410 км составит:

- при максимальном торможении — четыре месяца;
- при номинальном торможении — пять месяцев;
- при минимальном торможении — девять месяцев.

В случае максимального торможения угол между плоскостями орбит МС и МКС через три года составит  $\sim 85^\circ$ .

При номинальном торможении этот угол через 4,5 года увеличится до  $\sim 160^\circ$ .

По результатам расчетов были сделаны следующие выводы:

1. Проведение эксперимента при больших углах  $\beta$  обеспечивает непопадание прямых солнечных лучей в объектив телекамеры в процессе отделения МС.

2. Отделение МС в направлении «на разгон» гарантирует, что возврата МС к ТГК не происходит.

3. Время существования МС на орбите может составить более трех лет.

4. Затраты топлива на выведение ТГК «Прогресс» в точку отделения МС в зависимости от высоты орбиты МКС и при массе корабля 6 000 кг составят 91...135 кг, а затраты на обеспечение схода корабля с орбиты высотой 500 км составят не менее 245 кг.

По фактическим измерениям орбиты спутника на июль 2014 г. прогноз его существования

близок к кривой с максимальным баллистическим коэффициентом, и прогнозируемое время схода с орбиты — первая половина 2015 г.

Для выполнения КЭ «Микроспутник» необходимо было провести следующие основные операции на РС МКС с участием космонавтов, а также на автономном участке полета ТГК под контролем ЦУП-М:

- фотографирование оборудования после разгрузки корабля «Прогресс-М»;
- фотографирование ТПК с МС после его монтажа на СтА корабля «Прогресс-М» и передача информации на Землю; анализ действий экипажа по подготовке МС «Чибис-М» к запуску;
- разгерметизация грузового отсека корабля «Прогресс-М», в котором установлен ТПК с подготовленным к запуску МС;
- расстыковка ТГК с МКС, сопровождающаяся проведением съемки этого процесса экипажем с помощью ручных видеокамер или автоматически с помощью телекамеры, установленной на агрегатном отсеке служебного модуля;
- формирование специальной орбиты ТГК высотой 480–500 км для отделения полезной нагрузки (МС «Чибис-М»);
- проведение траекторных измерений для расчета вектора состояния МС «Чибис-М» в момент его отделения;
- построение специальной ориентации корабля «Прогресс-М» для отделения МС;
- отделение МС «Чибис-М» от ТГК; контроль этого процесса с использованием ТВ-камеры корабля «Прогресс-М»;
- сход с орбиты и затопление корабля «Прогресс-М» в заданном районе Мирового океана.

Перечисленные операции были тщательно проработаны и включены в номинальный план полета РС МКС.

### Летные испытания, работы на борту РС МКС

За несколько дней перед отстыковкой корабля «Прогресс М-13М» от МКС, 19 января 2012 г., российские космонавты — члены экипажа экспедиции МКС-30 А. Шкаплеров и О. Кононенко провели необходимые операции по переводу ТПК с МС из транспортного положения в рабочее, закрепив контейнер на шпангоуте стыковочного узла корабля. После этого был подключен кабель питания ТПК, сняты зачеховки, предохранявшие от несанкционированного срабатывания механизмов, и установлен защитный сетчатый экран, закрывающий просвет между стыковочным шпангоутом ТГК и установленным в рабочее

положение ТПК (рис. 8). В ходе работ проведены фотографирование и видеосъемка выполняемых операций.



Рис. 8. Бортинженер экспедиции МКС-30 О. Кононенко у подготовленного к запуску микроспутника (МС) «Чибис-М», установленного в транспортно-пусковом контейнере (ТПК) на шпангоуте стыковочного агрегата транспортного грузового корабля «Прогресс М-13М»: 1 — шпангоут СтА ТГК «Прогресс М»; 2 — защитная сетка ТПК; 3 — ТПК; 4 — МС «Чибис-М»

24 января 2012 г. была проведена расстыковка ТГК «Прогресс М-13М» с МКС, сопровождавшаяся фото- и видеосъемкой этого процесса, выполненной космонавтами (рис. 9).

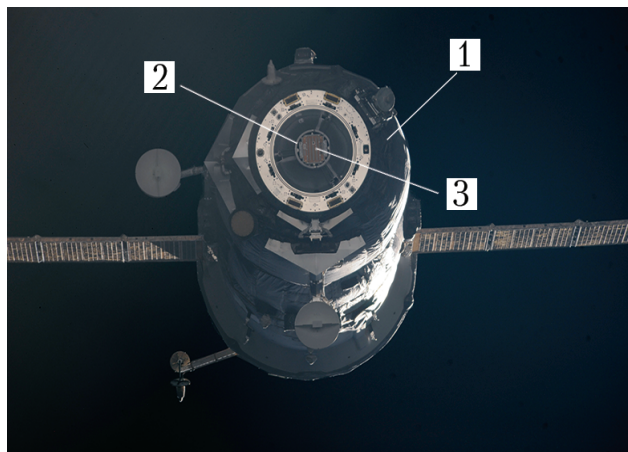


Рис. 9. Транспортный грузовой корабль «Прогресс М-13М» с установленным в положение для запуска микроспутником «Чибис-М» после расстыковки с МКС: 1 — «Прогресс М»; 2 — ТПК; 3 — МС «Чибис-М»

### Летные испытания, автономный участок

25 января 2012 г. МС «Чибис-М» с помощью пускового контейнера стартовал с борта ТГК «Прогресс М-13М», находящегося в автономном полете. Старт МС был осуществлен в 03:18:30 московского времени по команде из ЦУП-М. До выдачи команд для отделения МС на ТГК «Прогресс-М» была включена телекамера из состава служебных систем, а сам корабль переведен в режим инерциальной стабилизации.

Телекамера использовалась для видеорегистрации процесса отделения МС от корабля «Прогресс М-13М» с передачей телевизионного изображения в ЦУП-М в реальном времени.

Работа проводилась на освещенной части витка, с обеспечением рассмотренных выше требований по освещенности объекта.

По данным баллистической службы ЦУП-М МС был выведен на орбиту с параметрами:

- минимальная высота над поверхностью Земли — 497,535 км;
- максимальная высота над поверхностью Земли — 513,607 км;
- период обращения — 94,55 мин;
- наклонение — 51,62°.

После отделения МС, в соответствии программой полета, был обеспечен сход с орбиты грузового корабля «Прогресс-М».

МС «Чибис-М» после отделения от ТГК «Прогресс М-13М» выполняет полет в автономном режиме без взаимодействия с МКС и управляется с помощью специализированного наземного комплекса управления.

В ходе тестирования МС на орбите был выявлен ряд несоответствий в работе системы ориентации [5]. В частности, не выявленная на этапе наземной экспериментальной отработки МС ошибка в программном обеспечении (ПО), которая, тем не менее, не оказала существенного влияния на общую работоспособность системы ориентации и стабилизации, была устранена (04 февраля 2012 г.) путем перепрошивки ПО. После этого была начата активная подготовка бортовых систем и научной аппаратуры спутника к выполнению исследовательской программы: настройка средств системы ориентации, включение и калибровка датчиков, обработка и передача на Землю телеметрической информации.

16 и 17 февраля 2012 г. наземными станциями в городах Калуга, Таруса, Панска-Вес (Чехия) и Будапешт (Венгрия) был осуществлен первый прием научной телеметрической информации по радиолинии на частоте 2,2 ГГц с бортового передатчика «НЕМО». В состав переданной в этом сеансе научной информации вошли данные от приборов радиочастотного анализатора и цифровой фотокамеры. В течение более чем двух лет функционирования МС получен значительный объем важных научных данных об уникальных геофизических явлениях в верхней атмосфере нашей планеты и в околоземном космическом пространстве. Получена карта локализации географических районов с наибольшей статистикой разрядов. Полученные данные об электромагнитных разрядах могут быть использованы для уточнения технических требований по раз-

мещению научной и служебной аппаратуры на самолетах. Создана карта распределения молниевых разрядов в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра по географическим координатам.

За время работы комплекса научной аппаратуры МС «Чибис-М» проведено более 500 включений радиочастотного анализатора в режиме фиксации событий по триггеру, при этом зафиксировано около тысячи мощных радиовсплесков различных типов, которые происходят при электрических высотных разрядах. Выполнены крупномасштабные съемки земной поверхности в ночных и дневных условиях, а также съемки горизонта. Создана база данных электромагнитных излучений, отражающих физические процессы, протекающие и воздействующие на ионосферу.

Помимо разностороннего изучения сугубо молниевой активности, комплекс научной аппаратуры «Гроза» дает возможность исследовать довольно широкий круг явлений, связывающих атмосферу и ионосферу Земли. В конце декабря 2012 г. была сформирована и реализована программа измерений радиочастотным анализатором и магнитно-волновым комплексом электромагнитных эффектов в ионосфере при развитии тропического циклона, зарождавшегося с 25 декабря и в последующие периоды в районе Индокитая. Полученные данные анализируются с целью изучения собственных вариаций параметров ионосферной плазмы и определения ионосферного критерия, отражающего процессы циклогенеза.

Полученная на Земле научная информация обрабатывается и анализируется в ИКИ РАН. Детальные результаты научных исследований планируются к публикации в одном из следующих номеров журнала [5].

## Заключение

Малые космические аппараты, отличаясь высокой экономической эффективностью, уже заняли достойное место в структуре космических средств, предназначенных для решения важных научных, а также практических задач в интересах обороны страны, хозяйства, коммерческих заказчиков. Разнообразием отличаются не только подходы к созданию МКА, но и способы их доставки на орбиту. Среди последних особое место занимает использование транспортных грузовых кораблей «Прогресс-М», являющихся элементом транспортно-технической инфраструктуры МКС, в качестве космических платформ для доставки МКА на заданные орбиты. Уникальная особенность этого средства и способа доставки, позволяющая



существенно повысить эффективность целевого использования МКА любых классов, состоит в том, что микроспутники выводятся в космос как попутный груз. Кроме того, высота орбиты выведения может изменяться в широком диапазоне, на 100 км и более превышая высоту орбиты МКС, что радикально увеличивает время активного существования такого рода автоматических аппаратов.

В ходе космического эксперимента «Микро-спутник» была отработана (верифицирована в условиях реального космического полета) технология и аппаратные средства запуска с борта ТГК малых космических аппаратов. Кроме того, отработана технология доставки МКА в составе ТГК на орбиту высотой 500 км с последующим безопасным затоплением выполнившего свою целевую задачу грузового корабля в акватории Мирового океана в соответствии с программой полета.

Для успешного решения этих задач РКК «Энергия» имени С.П. Королева совместно с организациями научной кооперации были разработаны новые методы и технические средства, позволяющие с высокой надежностью обеспечить интеграцию транспортно-пускового контейнера с микроспутником в составе ТГК «Прогресс-М», его доставку на борт МКС, подготовку к запуску на орбите с участием членов экипажа РС МКС и выведение микроспутника на заданную орбиту в ходе автономного полета ТГК. Достигнутый результат расширяет спектр возможностей применения транспортных грузовых кораблей

«Прогресс-М» для решения целевых задач и открывает перспективу их широкого использования для доставки на заданные орбиты малых космических аппаратов любых типов.

*Авторы выражают искреннюю признательность бортинженеру экспедиции МКС-30/31 О. Кононенко за безупречную подготовку к запуску микроспутника «Чибис-М» на борту Российского сегмента Международной космической станции.*

## Список литературы

1. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. д.т.н., проф. Фатеева В.Ф. М.: Радиотехника, 2010. 320 с.
2. Исследование рынка малых космических аппаратов в ретроспективе 2002–2013 гг. и с прогнозом до 2020 г. Режим доступа: <http://o2consulting.ru/articles/market-research-mka/> (дата обращения 22.12.2014 г.).
3. Научно-образовательные программы. РКК «Энергия». Режим доступа: [http://www.energia.ru/ru/iss/sci-education/microsat/microsat\\_02.html](http://www.energia.ru/ru/iss/sci-education/microsat/microsat_02.html) (дата обращения 22.12.2014 г.).
4. Гуревич А.В., Зеленый Л.М., Климов С.И. Космическая миссия «Чибис-М» // Экология и жизнь. 2011. № 7(116). С. 50–56.
5. Чибис-М. Фундаментальные космические исследования и космическое образование с использованием микроспутников. Режим доступа: <http://chibis.cosmos.ru/index.php?id=1674> (дата обращения 22.12.2014 г.).

*Статья поступила в редакцию 25.12.2014 г.*

## References

1. *Malye kosmicheskie apparaty informatsionnogo obespecheniya* [Small spacecraft for information support]. Ed. prof. Fateev V.F. Moscow, Radiotekhnika publ., 2010. 320 p.
2. *Issledovanie rynka malykh kosmicheskikh apparatov v retrospektive 2002–2013 gg. i s prognozom do 2020 g.* [Market research of small spacecraft in retrospective view of 2002-2013 and with a forecast till 2020]. Available at: <http://o2consulting.ru/articles/market-research-mka/> (accessed 22.12.2014).
3. *Nauchno-obrazovatel'nye programmy. RKK «Energiya»* [Research and educational programs. RSC Energia]. Available at: [http://www.energia.ru/ru/iss/sci-education/microsat/microsat\\_02.html](http://www.energia.ru/ru/iss/sci-education/microsat/microsat_02.html) (accessed 22.12.2014).
4. Gurevich A.V., Zelenyi L.M., Klimov S.I. *Kosmicheskaya missiya «Chibis-M»* [Chibis-M space mission]. *Ekologiya i zhizn'*, 2011, no. 7(116), pp. 50–56.
5. *Chibis-M. Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya i kosmicheskoe obrazovanie s ispol'zovaniem mikrospatnikov* [Chibis-M. Fundamental space research and education using microsatellites]. Available at: <http://chibis.cosmos.ru/index.php?id=1674> (accessed 22.12.2014).