

## КОСМОНАВТИКА и РАКЕТОСТРОЕНИЕ

*Ежеквартальный научно-технический журнал издается с 2009 года*

Главный редактор – д.т.н.,  
профессор **К.М. Пичхадзе**

Заместитель главного  
редактора – д.т.н., профессор  
**В.В. Ефанов**

### Редакционная коллегия

к.э.н. **Х.Ж. Карчаев**  
**Т.М. Коростина**  
**Ю.В. Костеренко**  
к.т.н. **М.Б. Мартынов**  
к.т.н. **А.А. Мошнеев**  
д.т.н. **А.Е. Назаров**  
к.э.н. **В.М. Романов**  
**А.В. Савченко**  
**С.Н. Солодовников**  
**И.Л. Шевалев**

### Редакционный совет

д.т.н. **В.В.Хартов** – председатель  
чл.-корр. РАН **О.М. Алифанов**  
д.ф.-м.н. **В.В. Асмус**  
академик РАН **А.А. Боярчук**  
д.т.н. **Б.И. Глазов**  
академик РАН **Л.М. Зеленый**  
д.т.н. **А.А. Любомудров**  
академик РАН **М.Я. Маров**  
д.т.н. **Ю.А. Матвеев**  
д.т.н. **В.Ю. Мелешко**  
д.т.н. **Г.М. Полищук**  
академик РАН **Г.А. Попов**  
д.т.н. **В.Е. Усачев**  
д.т.н. **В.С. Финченко**  
д.т.н. **Е.Н. Хохлачев**  
чл.-корр. РАН **Б.М. Шустов**

### Учредитель

ФГУП «НПО им. С.А. ЛАВОЧКИНА»  
Журнал зарегистрирован в Федеральной  
службе по надзору в сфере связи и  
массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС77-35385 от  
18 февраля 2009 г.

### Содержание

<b>Хартов В.В.</b> Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований.....	3
<b>Кардашев Н.С. и др.</b> Радиоастрон (проект «Спектр-Р») – радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания.....	11
<b>Кардашев Н.С. и др.</b> Радиоастрон (проект «Спектр-Р») – радиотелескоп много больше Земли. Наземный сегмент и основные направления научных исследований.....	19
<b>Зеленый Л.М., Захаров А.В.</b> Проект «Фобос-Грунт»: приборы для научных исследований.....	31
<b>Галимов Э.М., Костицын Ю.А.</b> Планируемые наземные исследования вещества Фобоса.....	35
<b>Маров М.Я.</b> Космический аппарат «Фобос-Грунт» - основа перспективных российских планетных экспедиций.....	49
<b>Мартынов М.Б.</b> Основные принципы создания космического комплекса «Фобос-Грунт» .....	53
<b>Алексашкин С.Н., Зайко Ю.К., Суругин С.Е., Козлов О.Е.</b> Грунтозаборный комплекс «Фобос-Грунт» .....	59
<b>Симонов А.В., Морской И.М., Степаньянц В.А., Тучин А.Г.</b> Баллистическая схема полета КА «Фобос-Грунт» .....	66
<b>Хамидуллина Н.М.</b> Реализация политики планетарной защиты КОСПАР в экспедиции «Фобос-Грунт».....	74

### *Журнал является рецензируемым изданием*

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещаемую на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

Журнал включен в перечень российских рецензируемых научных журналов ВАК.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей. Рукописи не возвращаются.

При перепечатке материалов ссылка на «Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» обязательна.

Плата с аспирантов за публикацию статей не взимается.

Статьи журнала и требования к оформлению представленных авторами рукописей приведены на сайте журнала.

С января 2011 года наш журнал можно выписать: подписной индекс 37156 в каталоге «Газеты и журналы» (Роспечать)

© ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина

© Авторы статей

Адрес редакции: 141400 Московская обл., г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24

Телефоны: (495) 573 23 61, (495) 575 54 69

Факс: (495) 573 35 95, (495) 572 00 68

Адрес электронной почты: [Vestnik@Laspac.ru](mailto:Vestnik@Laspac.ru)

Адрес в Интернете: <http://vestnik.laspac.ru>



COSMONAUTICS and ROCKET ENGINEERING

Scientific and Technical Quarterly journal published since 2009

Chief Editor – **K.M. Pichkhadze** Doctor of Engineering, Professor

Deputy Chief Editor – **V.V. Efanov** Doctor of Engineering, Professor

**Editorial Board**

**K.Z. Karchayev** Candidate of Science (Economics)

**T.M. Korostina**

**Y.V. Kosterenko**

**M.B. Martynov**, Candidate of Science (Engineering)

**A.A. Moishchev**, Candidate of Science (Engineering)

**A.E. Nazarov**, Doctor of Engineering

**V.M. Romanov**, Candidate of Science (Economics)

**A.V. Savchenko**

**S.N. Solodovnikov**

**I.L. Shevalev**

**Editorial Council**

**V.V. Khartov**, Doctor of Engineering – Chairman

**O.M. Alifanov**, Corresponding Member RAN

**V.V. Asmus**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**A.A. Boyarchuk**, Academician RAN

**B.I. Glazov**, Doctor of Engineering

**L.M. Zelenyi**, Academician RAN

**A.A. Lyubomudrov**, Doctor of Engineering

**M.Y. Marov**, Academician RAN

**Y.A. Matveev**, Doctor of Engineering

**V.Y. Meleshko** Doctor of Engineering

**G.M. Polishchuk**, Doctor of Engineering,

**G.A. Popov**, Academician RAN

**V.E. Usachev**, Doctor of Engineering

**V.S. Finchenko**, Doctor of Engineering

**E.N. Khokhlachev**, Doctor of Engineering

**B.M. Shustov**, Corresponding Member RAN

**Founder**

FSUE «Lavochkin Association»

The journal is registered in Federal Service for telecommunications and mass media oversight.

Certificate III № ФС77-35385 dated

February 18, 2009

**Table of contents**

<b>Khartov V.V.</b> Next step of automated spacecraft development for fundamental space research.....	3
<b>Kardashev N.S.</b> at alias. «Radioastron» («Spektr-R» project) is a radio telescope which is much greater than the Earth. Main parameters and tests	11
<b>Kardashev N.S.</b> at alias. «Radioastron» («Spektr-R» project) is a radio telescope which is much greater than the Earth. Ground segment and main areas of scientific studies.....	19
<b>Zelenyi L.M., Zakharov A.V.</b> «Phobos-Grunt» mission: scientific instruments .....	31
<b>Galimov E.M., Kostitsyn Yu.A.</b> Planned ground studies of Phobos matter.....	35
<b>Marov M.Y.</b> «Phobos-Grunt» SC is the basis for advanced Russian planetary missions.....	49
<b>Martynov M.B.</b> Design philosophy of «Phobos-Grunt» space complex	53
<b>Aleksashkin S.N., Zaiko Y.K., Sutugin S.E., Kozlov O.E.</b> «Phobos-Grunt» soil sampling device.....	59
<b>Simonov A.V., Morskoy I.M., Stepanyants V.A., Tuchin A.G.</b> Ballistic flight profile of «Phobos-Grunt» SC.....	66
<b>Khamidullina N.M.</b> Realization of COSPAR Planetary Protection Policy in «Phobos-Grunt» mission.....	74

**The journal is a reviewed publication**

The journal is included into data base «Russian Index of Scientific Citation» (RISC) located at Electronic Scientific Library, internet link: <http://www.elibrary.ru>

The journal is in the list of editions, authorized by the Supreme Certification Committee of the Russian Federation to publish the works of those applying for a scientific degree.

The opinion of editorial staff not always coincide with authors' viewpoint  
Manuscripts are not returned.

No part of this publication may be reprinted without reference to Space journal of FSUE «Lavochkin Association».

Post-graduates have not to pay for the publication of articles. Magazine articles and features required of author manuscript design are available at Internet Site <http://www.vestnik.laspacespace.ru>

Starting from January 2011 subscribe to our journal: subscription index 37156 in catalogue «Gazety i journaly» (Rospechat)

**Editorial office address:** 141400 Moscow region, Khimki,

Leningradskaya str., 24

**Phone:** (495) 573 23 61, (495) 575 54 69

**Fax:** (495) 573 35 95, (495) 572 00 68

**E-mail:** Vestnik@laspacespace.ru

**Internet:** <http://vestnik.laspacespace.ru>

УДК 629.785:523.2/.7

## НОВЫЙ ЭТАП СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*В.В. Хартов*



**ХАРТОВ**

**Виктор Владимирович**  
генеральный конструктор и  
генеральный директор  
ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»,  
доктор технических наук  
E-mail: npol@laspace.ru

*В статье дается сжатый обзор автоматических космических аппаратов, обеспечившие нашей стране приоритет в научных исследованиях в XX веке; приводится краткое описание современных и перспективных космических аппаратов, создаваемых ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» для фундаментальных исследований Луны, планет, малых тел Солнечной системы, а также исследований в области астрофизики.*

*Ключевые слова: космический аппарат; космические научные исследования; Луна; Марс; Венера; Фобос; астрофизические исследования; астрономические исследования.*

### **NEXT STEP OF AUTOMATED SPACECRAFT DEVELOPMENT FOR FUNDAMENTAL SPACE RESEARCH V.V. Khartov**

*The article deals with concise overview of automated spacecraft which in 20<sup>th</sup> century provided foreground place for our country in the field of scientific research. There is a brief description of present and advanced spacecraft for pure research, being developed by Lavochkin Association for fundamental studies of Moon, planets, small bodies of Solar system and astrophysical research.*

*Key words: spacecraft; space research; Moon; Mars; Venus; Phobos; astrophysical research; astronomical studies.*

В период с 1965 года до конца 80-х годов в космической программе СССР значительное внимание уделялось как самим фундаментальным научным исследованиям, так и созданию и совершенствованию автоматических аппаратов для их реализации. В тот период в стране было создано несколько поколений автоматических космических аппаратов (в основном в НПО им. С.А. Лавочкина) научного назначения [1]. Было завоевано немало мировых приоритетов. Так, в 1966 году КА «Луна-9» совершил мягкую посадку на поверхность Луны, в том же году станция «Луна-10» стала первым искусственным спутником Луны. В 1967 году космическая станция «Венера-4» провела непосредственное измерение физических и химических характеристик планеты Венера. В 1970 году осуществлена мягкая посадка на поверхность Венеры и получена информация с ее

поверхности по распределению температуры и давления. В том же году осуществлено в автоматическом режиме взятие проб грунта Луны и доставка его на Землю (КА «Луна-16»). Тогда же КА «Луна-17» доставил на поверхность Луны мобильную автоматическую лабораторию «Луноход-1». Он проработал там почти 10 месяцев и успешно провел многочисленные научные и инженерно-технические исследования. В 1971 году космическая станция «Марс-3» совершила мягкую посадку на поверхность Марса. В 1975 году спускаемый аппарат автоматической межпланетной станции «Венера-9» осуществил мягкую посадку и передал на Землю панорамы поверхности с места посадки. В 1984 году КА «Вега-1,-2» продолжили контактные исследования элементного состава грунта Венеры, состава облаков. В атмосферу Венеры были выведены аэростатные зонды

для исследования циркуляции атмосферы. Вдоль трассы измерялись температура, давление, вертикальные порывы ветра и освещенность. После завершения исследований с орбиты Венеры КА подлетели к комете Галлея и передали на Землю изображения ядра кометы, данные по химическому составу ядра и комы; исследовалось также взаимодействие кометной плазмы с солнечным ветром.

В 1983 и 1989 годах совершены запуски автоматических космических астрофизических обсерваторий «Астрон» и «Гранат», работавших в ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма спектрах электромагнитного излучения. Ими получены весьма важные научные результаты по изучению звезд и галактик [2].

Помимо указанных, в рассматриваемый период было запущено около десяти КА серий «Прогноз» и «Интербол» для изучения солнечно-земных связей, магнитосферы Земли и космической плазмы, КА «Фобос-1,-2» и другие [3].

В 1996 году запущен КА «Марс-96», не имевший аналогов среди существующих автоматических космических средств. В проекте участвовало более 20 стран и Европейское космическое агентство. Этот аппарат состоял из нескольких автономных модулей и был уникален по объему планируемых научных исследований. Но экспедиция не состоялась - после старта с Земли произошла авария разгонного блока «Д» ракеты космического назначения «Протон».

В 1990-х годах российская экономика не позволяла государству обеспечивать космическую отрасль достаточными средствами, поэтому в тот период часть проектов научного назначения закрылась, а реализация других растянулась на многие годы. В настоящее время ситуация меняется к лучшему. Можно уже говорить о более оптимистичном развитии российской научной космонавтики.

В январе 2011 году НПО им. С.А. Лавочкина запущен геостационарный гидрометеорологический спутник нового поколения «Электро-Л»; успешно прошел летные испытания космический разгонный блок повышенной энерговооруженности «Фрегат-СБ» в составе ракеты космического назначения «Зенит». В этом же году готовятся к запуску орбитальная обсерватория «Спектр-Р» («Радиоастрон»), КА «Фобос-Грунт» и малоразмерный КА «Зонд ПП» на базе новой унифицированной космической платформы «Карат», общий вид которых показан на рисунке 1 а, б, в (КА «Фобос-Грунт» представлен здесь без ДУ выведения и китайского микроспутника УН-1).

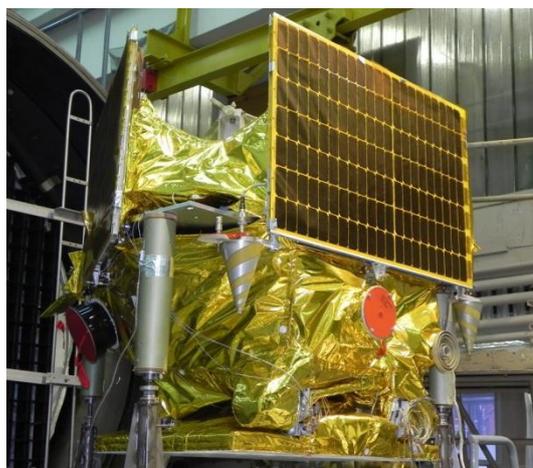
«Спектр-Р» - Международная орбитальная астрофизическая обсерватория проекта «Радиоастрон», образующая радиоинтерферометр со сверхбольшой базой. КА предназначен для изучения галактик и квазаров, окрестностей массивных черных дыр, ней-



**а) «Спектр-Р»**

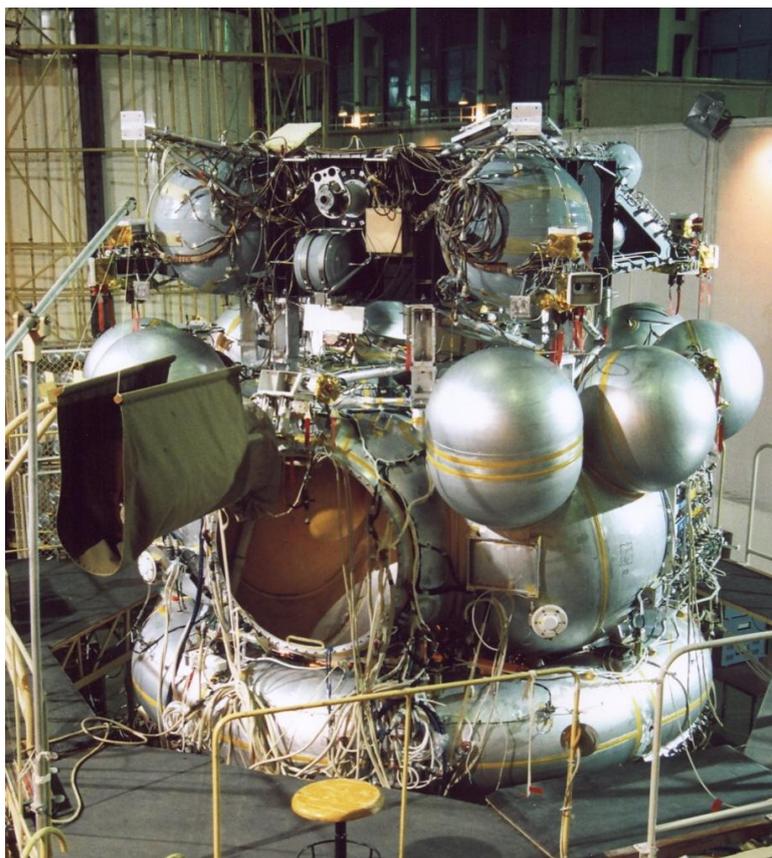


**б) «Фобос-Грунт»**



**в) «Зонд-ПП»**

**Рисунок 1. Автоматические космические аппараты**



**Рисунок 2. Комплексные электрические испытания космической платформы «Навигатор» с разгонным блоком «Фрегат-СБ»**

тронных звезд, межзвездной плазмы, определения фундаментальных космологических параметров и др.

«Фобос-Грунт» - КА, научные приборы которого созданы с привлечением Международной кооперации. В основу разработки конструкции КА положены современные научно-технические решения, подтвержденные ~20 патентами РФ.

Этот проект выполнен в двух приоритетных целях:

- проведение фундаментальных космических исследований Марса и его спутника Фобоса с доставкой на Землю грунта Фобоса;

- разработка основных служебных систем и агрегатов перспективной космической платформы для будущих планетных экспедиций в Солнечной системе.

Вместе с КА «Фобос-Грунт» на орбиту искусственного спутника Марса доставляется китайский микроспутник.

Современная концепция НПО им. С.А. Лавочкина по созданию космической техники основана на широком использовании базовых платформ. Эта концепция подтвердила свою эффективность значительным количеством как межпланетных, так и орбитальных КА научного и прикладного назначения, созданных нашим предприятием с 1965 по 1990 годы. Для современных орбитальных аппаратов создана космическая платформа «Навигатор» (рисунок 2).

Она успешно проходит летные испытания в составе КА «Электро-Л».

Подробное описание проектов «Спектр-Р» и «Фобос-Грунт» будет представлено в последующих статьях этого выпуска журнала.

На базе космической платформы «Навигатор» в настоящее время нами создаются еще орбитальные астрофизическая обсерватория «Спектр-РГ» и астрономическая обсерватория «Спектр-УФ»; также прорабатываются проекты «Спектр-М» и «Гамма-400» (рисунок 3).

**«Спектр-РГ»:**

- изучение Вселенной в рентгеновском и гамма-спектральных диапазонах электромагнитного излучения.

Запуск – 2013 год.

**«Спектр-УФ»:**

- изучение Вселенной в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного излучения.

Запуск – 2015 год.

**«Гамма-400»:**

- измерение космического гамма-излучения в диапазоне энергий 0,1 ГэВ до  $3 \times 10^3$  ГэВ.

Запуск – 2015 год.

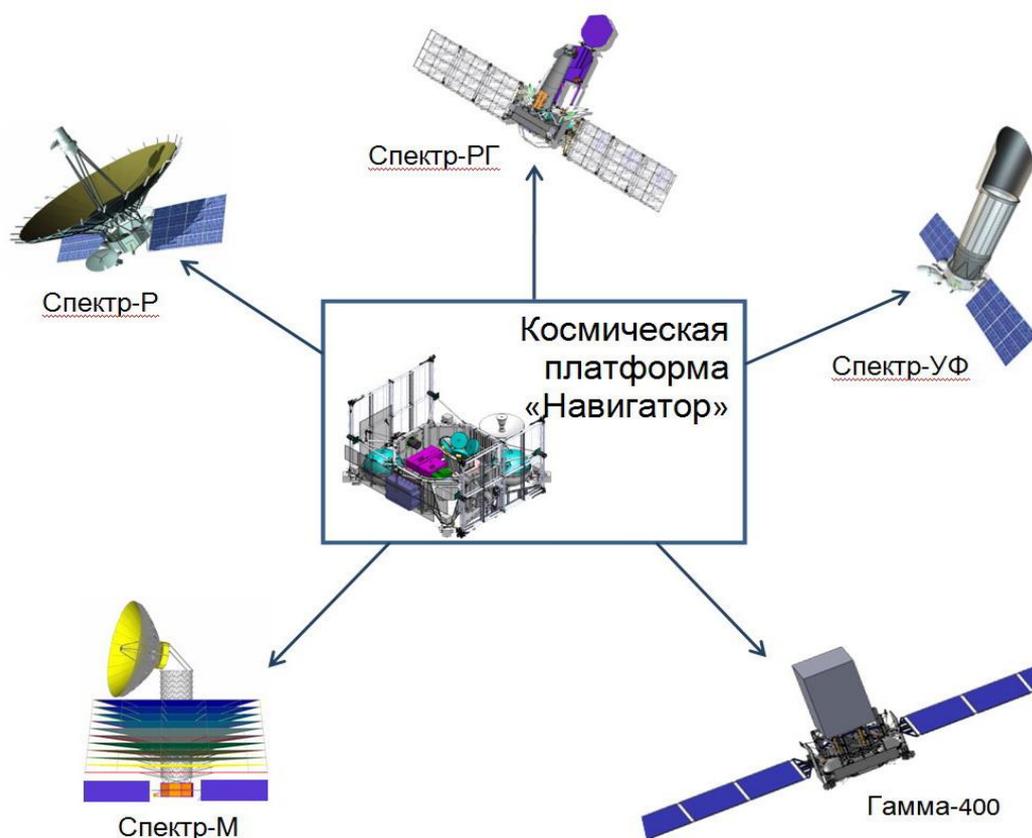


Рисунок 3. Применение космической платформы «Навигатор» с астрофизическими КА

**«Спектр-М»:**

- изучение Вселенной в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах электромагнитного излучения.

Запуск – 2018 год.

Анализ возможностей создания универсальной космической платформы для различных межпланетных станций показал, что она не будет оптимальной в силу разнообразия решаемых научных задач, нередко противоречащих друг другу. Наиболее рациональным в этом случае является подход, основанный на модульном принципе, т.е. создание серии эффективных, надежных, хорошо отработанных служебных модулей. В результате проектно-конструкторских исследований сформированы основные критерии выбора служебных платформ и модулей:

- энергопотребление научной аппаратуры;
- массогабаритные характеристики научной аппаратуры;
- запас топлива;
- точностные характеристики и др.

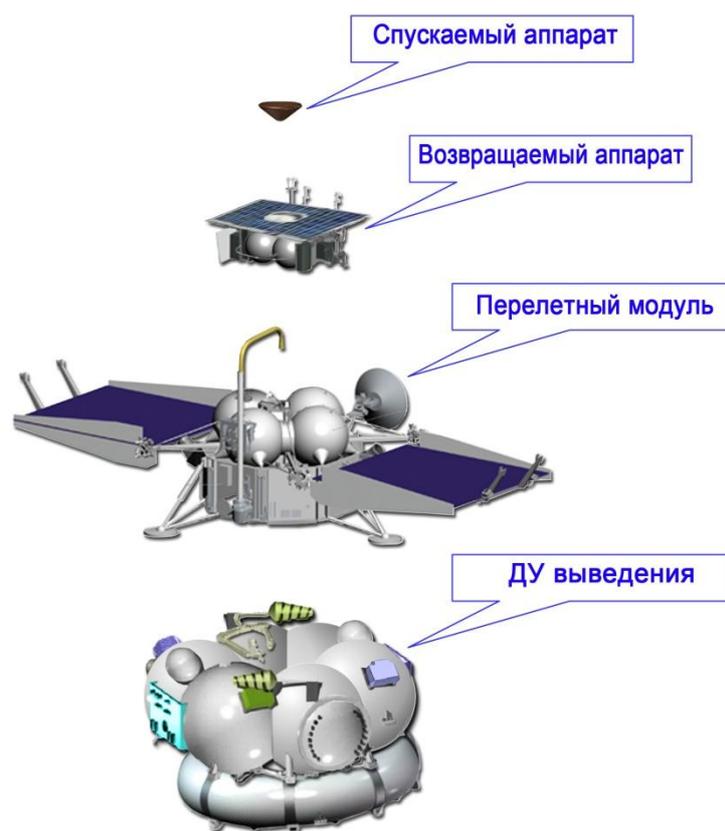
Все межпланетные экспедиции, осуществляемые в автоматическом режиме в настоящее время и в обозримом будущем, можно классифицировать так:

- экспедиции с проведением дистанционных исследований;

- экспедиции с проведением контактных исследований;
- экспедиции с доставкой на Землю образцов инопланетного вещества;
- комплексные экспедиции.

Системно-проектный анализ возможных способов реализации указанных космических экспедиций позволяет сформировать следующий наиболее рациональный состав унифицированных служебных модулей (рисунок 4):

- перелетный модуль (ПМ), который является основным структурным элементом КА, обеспечивающим его перелет и управление на всех этапах функционирования;
- маршевая двигательная установка (ДУ) выведения, предназначенная для доставки КА после окончания работы ракеты космического назначения в требуемую точку Солнечной системы;
- двигательная установка ПМ, предназначенная для создания импульсов скорости коррекции траектории перелета, торможения, посадки, движения вокруг центра масс и др.;
- возвращаемый аппарат (ВА), предназначенный для старта с планеты или малого тела Солнечной системы и перелета к Земле с обеспечением посадки спускаемого аппарата с образцами вещества;



**Рисунок 4. Основные служебные модули космического комплекса «Фобос-Грунт»**

- спускаемый аппарат (СА), предназначенный для торможения в атмосфере Земли и посадки контейнера с образцами вещества.

Отметим, что модульный принцип построения автоматических КА в НПО им. С.А. Лавочкина применялся и раньше при создании КА научного назначения серий «Луна», «Марс», «Венера», «Вега» и др. Например, в лунном проекте был создан корректирующе-тормозной модуль (блок КТ), на который устанавливались луноход или взлетная ракета со спускаемым аппаратом.

При реализации проекта «Фобос-Грунт» нами созданы указанные выше космические служебные модули, основанные на инновационных, но уже отработанных на земле проектно-конструкторских решениях.

В настоящее время на нашем предприятии широко развернуты проектно-поисковые и проектно-конструкторские работы по созданию перспективных автоматических КА для исследования планет и малых тел Солнечной системы. Эти работы ведутся в тесном сотрудничестве с ведущими институтами РАН и национальными исследовательскими университетами. Основой конструкции перспективных КА являются созданные на данный момент космические служебные модули, прошедшие полный цикл наземной отработки с положительными результатами.

Приведем краткое описание предлагаемых нами новых проектов КА для проведения космических фундаментальных научных исследований [4].

**«Луна-Ресурс»:**

- разведка природных ресурсов Луны;
- доставка мобильной исследовательской станции-лунохода.

Запуск – 2013 год.

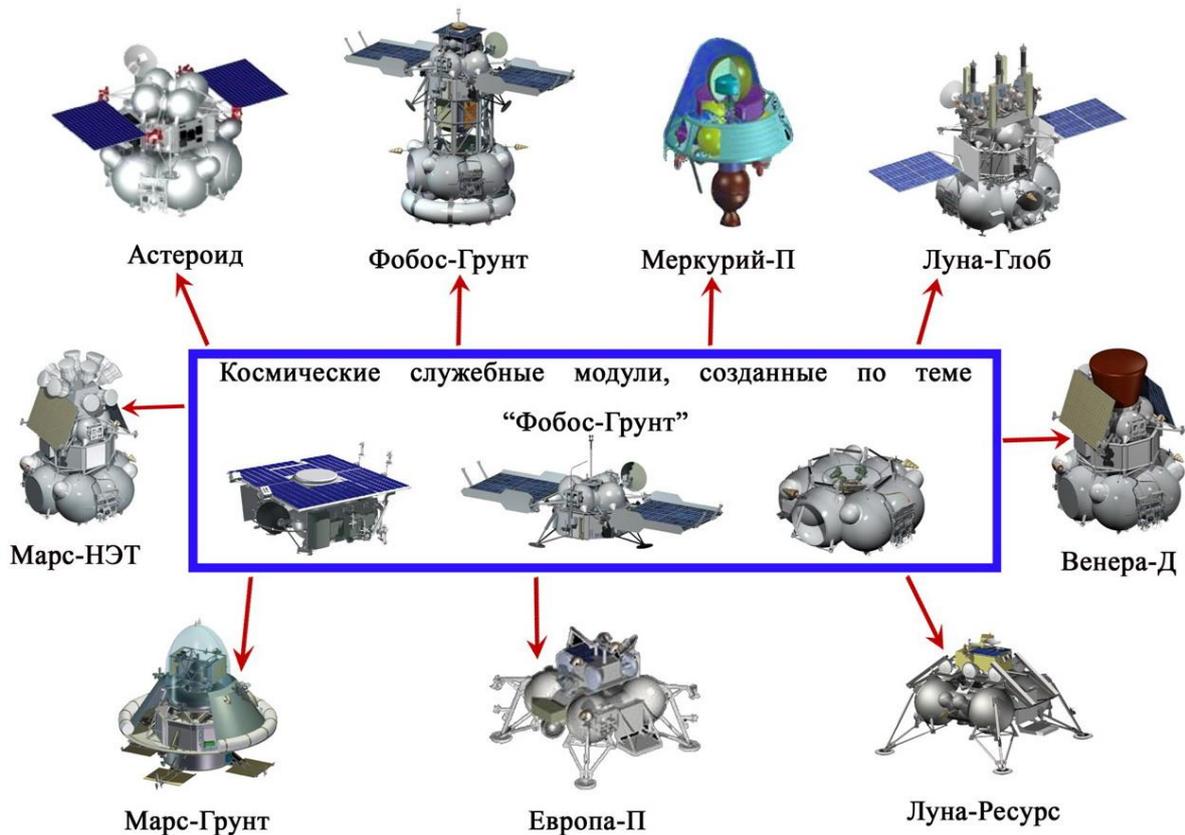
**«Луна-Глоб»:**

- получение результатов мирового уровня о внутреннем строении Луны и кратера на южном полюсе;
- исследование воздействий на Луну приходящих корпускулярных потоков и электромагнитного излучения.

Запуск – 2014 год.

**«Венера-Д»:**

- проведение измерений химического состава атмосферы Венеры;
- съемка поверхности планеты на этапе спуска;
- панорамная съемка поверхности планеты после посадки;
- определение минерального состава вещества поверхностного слоя;
- точные измерения температуры и давления, потоков излучения, характеристик аэрозольной среды;
- получение данных о сейсмической активности планеты.



**Рисунок 5. Адаптация служебных модулей к перспективным космическим комплексам для фундаментальных планетных исследований**

КА включает: орбитальный аппарат; спускаемый аппарат; атмосферные зонды с длительным сроком активного существования.

Запуск – 2016 год.

**«Марс-НЭТ»:**

- непрерывный и глобальный мониторинг климата и сейсмообстановки на Марсе;
- навигационное обеспечение экспедиций на Марсе.

КА включает: перелетный модуль; орбитальный аппарат; спускаемые аппараты.

Запуск – 2016 год.

**«Апофис»:**

- уточнение траектории угрожающего Земле астероида Апофис путем установления на нем радиомаяка и других маркеров для осуществления высокоточного сопровождения астероида;
- исследование структурных и физических свойств астероида с целью изучения возможных вариантов воздействия на него.

Запуск – 2020 год.

**«Экспедиция-М»:**

- доставка образцов вещества Марса на Землю;
- уточнение инженерно-технических моделей атмосферы и поверхности Марса;
- детальный геохимический анализ грунта на Марсе;

- исследование процессов взаимодействия атмосферы, солнечного излучения и поверхности Марса.

Запуск – 2020 год.

**«Лаплас-Европа П»:**

- исследование Юпитера и его спутника Европы дистанционно с искусственного спутника «Европа П» и контактными методами с помощью посадочного зонда на Европу;
- взятие проб вещества поверхности для исследования состава и выявления признаков экзобиологической активности.

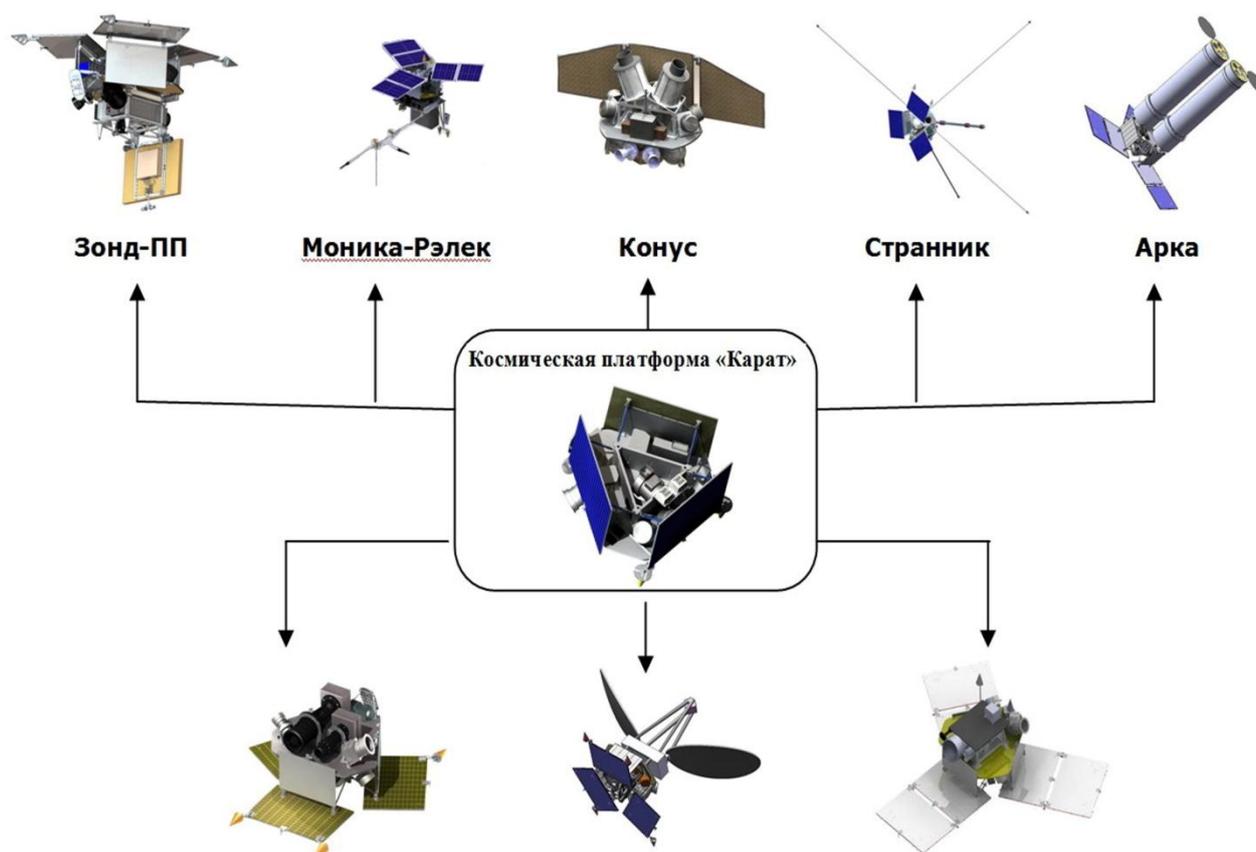
Запуск – 2020 год.

**«Меркурий-П»:**

- исследование морфологии, околопланетной плазмы, геологии, кратерирования, структуры и поверхности Меркурия;
- проведение картографии, химического анализа грунта, сеймики, гравиметрии.

Запуск – 2020 год.

Предварительный проектно-конструкторский и технологический анализ автоматических КА для реализации перспективной программы фундаментальных научных космических исследований показывает целесообразность их создания на базе уже имеющихся служебных модулей темы «Фобос-Грунт» с необходимыми доработками, что обеспечит



**Рисунок 6. Адаптация универсальной платформы «Карат» к МКА**

выполнение указанной программы в достаточно полной мере с заданной надежностью и эффективностью в условиях реального финансирования (рисунок 5).

Отдельно можно остановиться на новом, весьма перспективном направлении космонавтики – создание малоразмерных космических аппаратов (МКА) для проведения научных исследований. Создание таких аппаратов обусловлено значительно возросшими технологическими возможностями, миниатюризацией служебных и научных систем и приборов. Наиболее рациональным путем создания широкого спектра МКА является, в частности, унификация служебных систем КА посредством создания универсальных платформ.

МКА предназначены для решения отдельных целевых задач с ограниченным составом научной аппаратуры; появляется также возможность создания многоспутниковых орбитальных группировок. Кроме того, работа по созданию МКА прочно заняла свою нишу в системе подготовки специалистов аэрокосмических вузов.

Проведенный в НПО им. С.А. Лавочкина анализ требований, накладываемых МКА к служебным системам и базовой платформе в целом, позволили унифицировать требования и в результате создать такую малоразмерную универсальную космическую платформу, как «Карат».

ФКП-2015 предусмотрено создание серии МКА, способных выполнять исследования, которые еще недавно были по силам лишь большим КА. Научные эксперименты разработаны ведущими институтами: ИКИ РАН; ИРЭ РАН; ФИ РАН; ФТИ РАН; ИЗМИРАН; МГУ; МИФИ и др.

В результате комплексного рассмотрения предложенных проектов по критерию готовности при безусловной научной значимости и приоритетности РАН приняла решение о целевых задачах первых аппаратов на базе платформы «Карат».

«Зонд-ПП» (ИРЭ РАН):

– изучение характеристик земной поверхности спутниковым радиометром L-диапазона.

Запуск – 2011 год.

«Моника» (МИФИ) и «Рэлек» (НИИЯФ МГУ):

– изучение физических механизмов генерации космических лучей;

– исследование физических механизмов воздействия энергичных частиц солнечного, магнитосферного и атмосферного происхождения на атмосферу Земли.

Запуск – 2012 год.

«Конус-М» (ФТИ РАН):

– исследование с высоким разрешением временных профилей и спектров гамма-всплесков.

Запуск – 2013-2014 годы.

**«Странник» (ИКИ РАН):**

- многомасштабные исследования турбулентной плазмы;
- геофизическое патрулирование околоземного пространства.

Запуск – 2014 год.

**«Арка» (ФИ РАН):**

- гелиофизические исследования активных солнечных областей.

Запуск – 2015 год.

Запуск этих МКА предполагается осуществлять в виде попутной полезной нагрузки различных РН.

Спектр предложенных научных исследований для выполнения их с использованием МКА на базе платформы «Карат» сейчас достаточно велик (более десяти).

Масса всех указанных МКА на орбите составляет около 250 кг.

На рисунке 6 представлена адаптация различных МКА к универсальной космической платформе «Карат».

В настоящее время мы создаем на базе уже отработанных проектно-конструкторских решений МКА

«Резонанс» (масса ~ 350 кг) для изучения магнитосферы Земли и солнечно-земных связей.

Реализация описанной в статье программы космических фундаментальных научных исследований обеспечит России достойное положение в мировом научно-космическом сообществе. В будущее мы смотрим с оптимизмом.

**Список литературы**

1 Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под общ. ред. Г.М. Полищука и К.М. Пичхадзе. М.: Изд-во МАИ-Принт, 2010. 659 с.

2 Космические аппараты для фундаментальных научных исследований / Г.М. Полищук [и др.] // Полет, 2006. № 8. С. 13-20.

3 Экспедиция к Фобосу / Л.М. Зеленый [и др.]. М.: Физматлит, 2009. С. 239-250.

4 Хартов В.В., Мартынов М.Б., Зеленый Л.М. Космическая программа исследования планет и малых тел Солнечной системы: принципы формирования; концепция технической реализации // Полет, 2011. № 4. С. 107-119.

УДК 629.78:522.59

## РАДИОАСТРОН (ПРОЕКТ «СПЕКТР-Р») – РАДИОТЕЛЕСКОП МНОГО БОЛЬШЕ ЗЕМЛИ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ИСПЫТАНИЯ

*Ю.А.Александров\**, *В.В. Андреянов\**, *Н.Г.Бабакин\**, *В.Е.Бабышкин\*\**, *К.Г.Белюсов\**, *А.А.Беляев\*\*\**, *А.В.Бирюков\**, *А.Е.Бубнов\**, *А.А.Быкадоров*, *В.И.Васильков\**, *И.С.Виноградов\**, *А.С.Гвамичава\**, *А.Н.Зиновьев\**, *Р.В.Комаев\*\**, *Б.З.Каневский\**, *Н.С.Кардашев\**, *Ю.А.Ковалёв\**, *Ю.Ю.Ковалёв\**, *А.В.Коваленко\**, *Ю.А.Корнеев\**, *В.И.Костенко\**, *Б.Б.Крейсман\**, *А.Ю.Кукушкин\**, *М.Г.Ларионов\**, *С.Ф.Лихачёв\**, *Л.Н.Лихачёва\**, *С.Ю.Медведев\*\*\**, *М.В.Мелёхин\*\**, *Т.А.Мизякина\**, *Н.Я.Николаев\**, *Б.С.Новиков\**, *И.Д.Новиков\**, *Ю.К.Павленко\*\*\**, *Ю.Н.Пономарёв\**, *М.В.Попов\**, *В.Н.Пышинов\**, *В.М.Рожков\*\*\*\**, *Б.А.Сахаров\*\*\**, *В.А.Серебренников\*\**, *А.И.Смирнов\**, *В.А.Степаньянц\*\*\*\**, *С.Д.Федорчук\**, *М.В.Шацкая\**, *А.И.Шейхет\*\**, *А.Е.Ширшаков\*\**, *В.Е.Якимов\**

*Российская Академия наук и Федеральное Космическое Агентство планируют в 2011 году осуществить запуск уникальной космической обсерватории «Радиоастрон» с 10-метровой рефлекторной антенной, которая вместе с крупнейшими наземными радиотелескопами и станциями слежения образует систему, позволяющую впервые проводить исследования с разрешением в миллионы раз лучше человеческого глаза.*

*Ключевые слова: космический радиотелескоп; интерферометр; угловое разрешение; чувствительность; атомный СВЧ генератор; испытания.*

**«RADIOASTRON» («SPEKTR-R» PROJECT) IS A RADIO TELESCOPE WHICH IS MUCH GREATER THAN THE EARTH. MAIN PARAMETERS AND TESTS** *Yu.A. Alexandrov, V.V. Andreyanov, N.G. Babakin, V.E. Babyshkin, A.A. Belyaev, K.G. Belousov, A.V. Biryukov, A.E. Bubnov, A.A. Bykadorov, V.I. Vasilkov, I.S. Vinogradov, A.S. Gvamichava, A.N. Zinoviev, R.V. Komaev, B.Z. Kanevskiy, N.S. Kardashev, Yu.A. Kovalev, Yu.Yu. Kovalev, A.V. Kovalenko, Yu.A. Korneev, V.I. Kostenko, B.B. Kreisman, A.Yu. Kukushkin, M.G. Larionov, S.F. Likhachev, L.N. Likhacheva, S.Yu. Medvedev, M.V. Melekhin, T.A. Miziakina, N.Ya. Nikolaev, B.S. Novikov, I.D. Novikov, Yu.K. Pavlenko, Yu.N. Ponomarev, M.V. Popov, V.N. Pyshnov, V.M. Rozhkov, B.A. Sakharov, V.A. Serebrennikov, A.I. Smirnov, V.A. Stepanyants, S.D. Fedorchuk, M.V. Shatskaya, A.I. Sheikhet, A.E. Shirshakov, V.E. Yakimov*

*The Russian Academy of Sciences and the Federal Space Agency are planning to launch the unique space observatory «Radioastron» with 10-meter reflector antenna in 2011, which, jointly with the largest ground radio telescopes and ground tracking stations, will establish the system, permitting to carry out studies with resolution million times better than a human eyesight.*

*Key words: space radio telescope; interferometer; angular resolution; sensitivity; atomic microwave oscillator; testing.*

**\*Учреждение Российской Академии Наук. Физический институт им. П.Н. Лебедева. Астрокосмический центр, Россия, г. Москва.**

**\*\*ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.**

**\*\*\*Закрытое Акционерное Общество «Время-Ч», Россия, г. Нижний Новгород.**

**\*\*\*\*Учреждение Российской Академии Наук. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Россия, г. Москва.**

**\*\*\*\*\*Открытое Акционерное Общество «Российские Космические Системы», Россия, г. Москва.**

Таблица 1. Основные параметры космического интерферометра.

Основные параметры интерферометра Радиоастрон				
Диапазоны частот [ГГц]	P 0,320-0,328	L 1,636-1,692	C 4,804-4,860	K 18,372-25,132
Круг. поляризации x ширина полосы [МГц]	2 x 4	2 x 32	2 x 32	2 x 32
Ширина лепестка на базе 350 000 км [микросекунды]	540	106	37	7-10
Чувствительность 1σ [мЯн] (GBT, накопление 5 мин и 3 ч - поляризация)	42/7	4/0.7	4/0.7	10/1.7

**Введение**

Перспектива текущего года – запуск космического радиотелескопа (КРТ) «Радиоастрон», который образует с наземными радиотелескопами интерферометр Земля-Космос. Создание первого космического радиоинтерферометра с базой намного больше размеров Земли имеет длительную и сложную историю. Подробная информация о космической радиообсерватории содержится в специальном электронном сайте [1] и публикациях [2-3].

Орбита спутника «Радиоастрон» [4] была выбрана так, что она специальным образом эволюционирует под действием Луны. Средний орбитальный период – 9.5 дней (изменение периода - от 7 до 10 дней), половина большой

оси 189 000 км, наклонение орбиты 51 градус. Радиус перигея – от 10 до 70 тысяч км, апогея – от 310 до 390 тысяч км, нормаль к плоскости орбиты за 3 года описывает на небесной сфере эллипс, большая ось которого 150 градусов, а малая – 40. Вследствие эволюции орбиты около 80% источников в какой-то момент оказываются вблизи плоскости орбиты, т.е. для таких источников возможно получать изображения и с высоким и с умеренным угловым разрешением.

В таблице 1 приведены основные параметры интерферометра Земля-Космос, определённые на основе измеренных в наземных испытаниях параметров КРТ и характеристик 100-метрового наземного радиотелескопа GBT (обсерватория Грин Бэнк, NRAO, США).

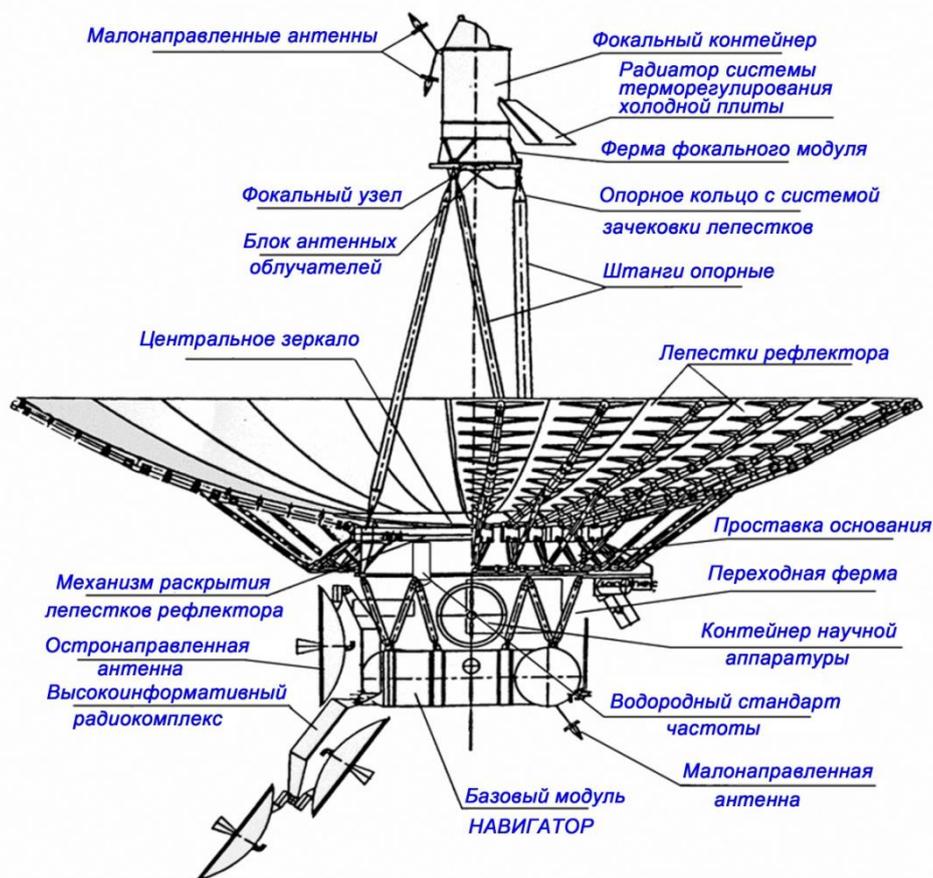
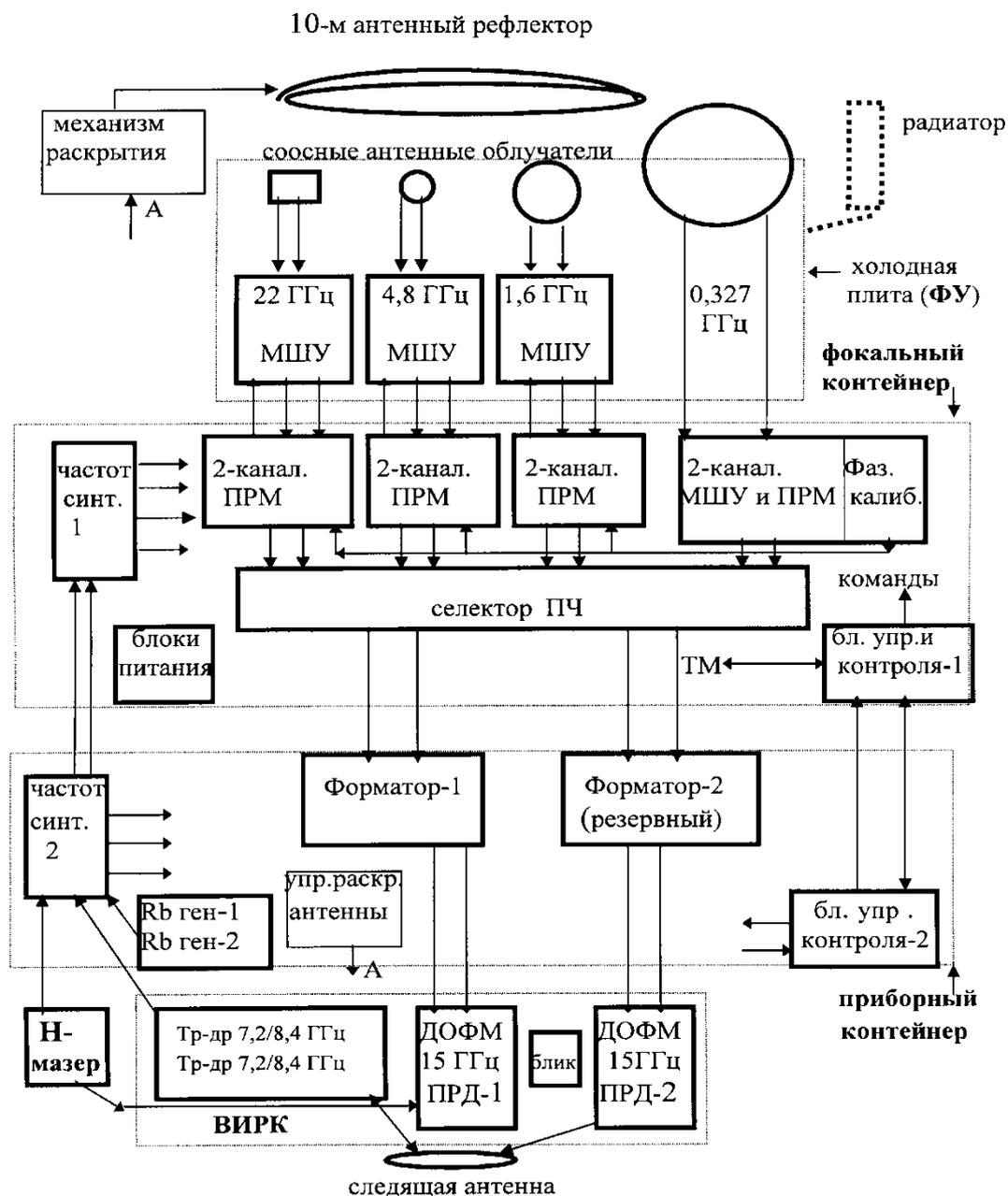


Рис. 1. Компоновка КРТ и космической платформы (базового модуля) «Навигатор»

На рисунке 1 показана общая схема КРТ с космическим аппаратом «Навигатор», на рисунке 2 – блок-схема КРТ. Рисунки 3-7 демонстрируют общий вид КРТ со спутником «Навигатор», а также основные компоненты космического радиотелескопа и некоторые наиболее важные этапы их наземных испытаний.

На рисунке 8 – участники 29-го международного совещания по проекту «Радиоастрон» в НПО им. С.А. Лавочкина.

Общий вид КРТ в закрытом (транспортном) состоянии представлен в этом номере журнала в статье В.В. Хартова.



МШУ – малозумящий усилитель; ФУ – фокальный узел, содержащий блок антенных облучателей и МШУ; ПРМ – приемник радиоастрономический; ПЧ – промежуточная частота; ТМ – телеметрия; Rb ген-1.2 – рубидиевые генераторы; Н-мазер – водородный генератор (два экземпляра); ВИРК – высоко-информативный радиокомплекс; Тр-др 7.2/8.4 – транспондер входной частоты 7.2 ГГц в выходную – 8.4 ГГц; ДОФМ – двойной относительный фазовый манипулятор; ПРД-1.2 – передатчики астрономических данных на несущей 15 ГГц.

Рисунок 2. Блок-схема КРТ



**Рисунок 3. Комплексные испытания КРТ с космической платформой (базовым модулем) «Навигатор», рефлектор раскрыт. (НПО им. С.А. Лавочкина, июнь 2011 г.)**



**Рисунок 4. Фокальный (слева) и приборный (справа) контейнеры КРТ**



Рисунок 5. Водородные стандарты частоты (мазеры), разработанные для проекта «Радиоастрон» в ЗАО «Время-Ч» (Нижний Новгород)



SRT petals test in ESTEC (1994)

Рисунок 6. Испытания отдельных углепластиковых лепестков антенны КРТ (ЕКА, Нидерланды, Нордвайк, 1994 г.)



**Рисунок 7. Испытания космического радиотелескопа по астрономическим объектам (Пушино, обсерватория Астрокосмического центра ФИАН, весна 2004 г.)**



**Рисунок 8. 29-е международное совещание по проекту «Радиоастрон» (около лётной модели КРТ в НПО им. С.А. Лавочкина, осень 2008 г.)**

### 1 Испытания конструкций КРТ

В мае 2011 года завершены с положительными результатами предусмотренные комплексной программой экспериментальной отработки испытания рефлектора, фокального и приборного контейнеров, водородных стандартов частоты и времени, высокоинформативного радиокомплекса (ВИРК), бортовой кабельной сети для обеспечения функционирования радиотелескопа вместе с космическим аппаратом «Навигатор». Конструкция КРТ и ее агрегатов (в составе полноразмерных технологических изделий для статических и вибродинамических испытаний, радиоастрономической проверки, тепловакуумных испытаний) многократно подверглись нагрузкам и воздействиям, возникающим в условиях наземного изготовления, хранения, транспортировки, при запуске ракеты-носителя, а также при рабочей эксплуатации в условиях орбитального функционирования.

В результате проведенных испытаний требования к конструкции подтверждены, и она допущена к летным испытаниям в составе бортового комплекса научной аппаратуры. Основные технические характеристики конструкции десяти метрового складного параболического рефлектора телескопа после его раскрытия: среднее квадратическое отклонение отражающей поверхности от идеального параболоида 0.7 мм, допустимое отклонение центра облучателя от фокуса параболоида  $\pm 1$  мм. Также подтверждены характеристики всех систем обеспечения теплового режима КРТ.

### 2 Комплекс приемников КРТ

Целью электрорадио испытаний являлись: проверка выполнения команд управления и регистрация телеметрируемых параметров, проверка работы термостатов и температурных режимов приборов комплекса, подтверждение окончательных параметров КРТ. Испытания проводились в экранной камере НПОЛ в соответствии с нормативными документами. В комплексе использовалась штатная кабельная сеть. Управление приборами осуществлялось штатной системой преобразования интерфейсов. Последовательность команд управления комплексом осуществлялась в соответствии с управляющими циклограммами с первым и вторым полукомплектами системы образования частот, форматом и высокоинформативным радиокомплексом (ВИРК).

Телеметрируемые параметры приборов регистрировались штатной телеметрической системой (ТМС) с записью в файл с расширением *tm1*. Состояние комплекса контролировалось в квазиреальном времени на мониторах компьютера при помощи специально разработанной в АКЦ ФИАН программы *P\_TMI\_Extract.exe*. Получение табличного файла данных из записанного файла телеметрии с расшире-

нием *tm1* для вторичной обработки осуществлялось специально разработанной автоматизированной системой обработки и визуализации сеансов телеметрии «АСОВИСТ». Визуализация параметров, в том числе для печати, осуществлялась стандартной программой операционной системы Windows типа Excel. В качестве источника питания использовался имитатор солнечной батареи НПОЛ. В таблице 2 приведены распределение шумовых температур в элементах бортовых приемных устройств и суммарная шумовая температура космического телескопа (в градусах Кельвина) в эксплуатационных условиях на орбите.

**Таблица 2. Шумовая температура каналов КРТ**

Диапазон	92 см	18 см	6 см	1.2 -1.7 см
$T_{\text{МШУ}}$	35	15	25	40
$T_{\text{каб}}$	9	6	11	-
$T_{\text{БАО}}$	54	5	22	20
$T_{\text{антенны}}$	6	4	5	7
$T_{\text{неба}}$	60	3	3	3
$T_{\text{системы}}$	164	33	66	70

### 3 Бортовой водородный стандарт частоты времени КРТ

В ходе реализации проекта «Радиоастрон» впервые появилась возможность установки на спутник высокостабильного водородного стандарта частоты-времени, использование которого позволяет увеличить чувствительность наземно-космического радиоинтерферометра и упростить обработку информации. По согласованному техническому заданию ЗАО «Время-Ч» были разработаны, изготовлены и испытаны (2007 г.) три комплекта активного бортового водородного стандарта частоты (БВСЧ), получивших индекс VCH-1010. Первый использовался в качестве технологического и образца для КДИ, второй – летный и третий – ЗИП, используемый в полете в качестве холодного резерва. Все три комплекта прошли полный цикл испытаний в соответствии с программами обеспечения надежности (ПОН) и наземной экспериментальной обработки (ПНЭО).

Важнейшими аспектами создания бортового водородного стандарта частоты были:

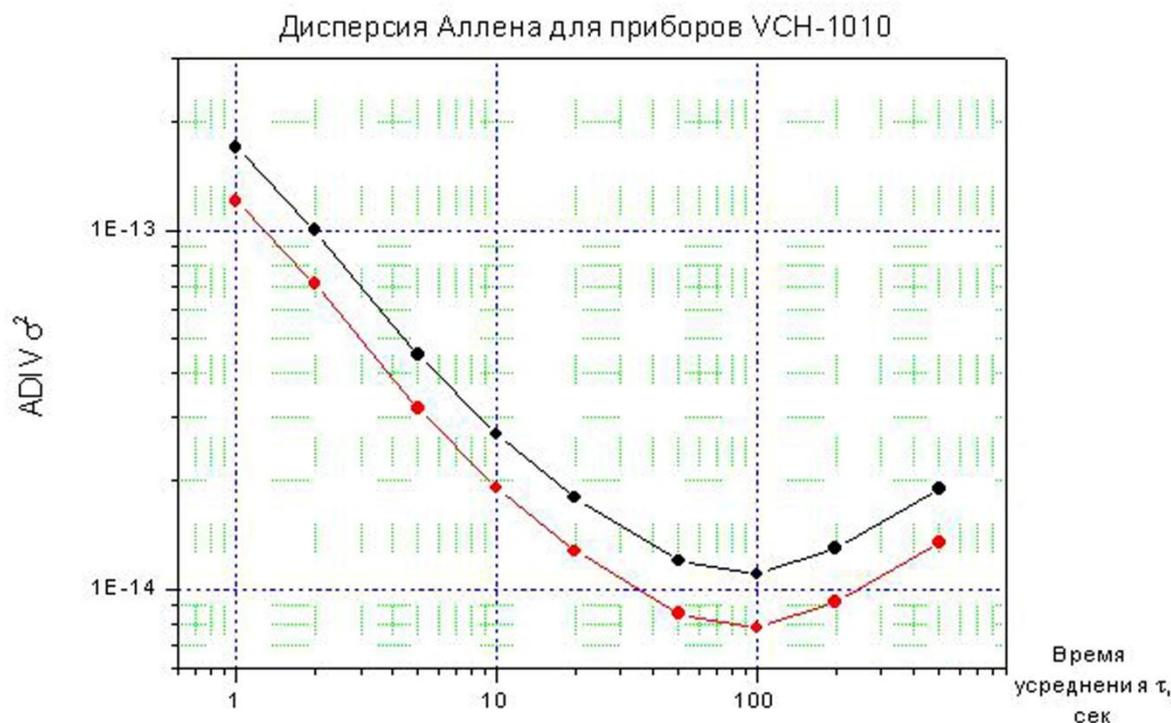
- создание надежной системы механического крепления накопительной колбы на основе углепластиковых материалов, предотвращающей ее разрушение при значительных механических нагрузках на участке вывода КА на орбиту;
- вакуумирование объема резонатора и термостатов за счет космического вакуума с одновременной возможностью наземных испытаний в нормальных климатических условиях (НКУ);

сохранение метрологических параметров, достигнутых на наземных образцах водородных стандартов.

Проведенные метрологические измерения в автономных испытаниях в ЗАО «Время-Ч», АКЦ и НПОЛ подтвердили выполнение выдвинутых в техническом задании требований.

Один из главных параметров приборов – нестабильность частоты стандарта – представлен на рисунке 9.

Ход кривой нестабильности до  $\tau = 100$  сек усреднения соответствует характеристике ТЗ. Превышение требований технического задания при  $\tau > 100$  сек связано с условиями испытаний в НКУ, когда невозможно компенсировать дестабилизирующие факторы: изменения температуры, давления и пр.



Черным цветом изображена измеренная относительная функция  $\sigma_2^2$  2-х одинаковых приборов зав. № 005 и 006. Красным цветом изображена функция  $\sigma_1^2$  одного прибора, как  $\sigma_2^2/\sqrt{2}$

**Рисунок 9. Измерения нестабильности стандарта частоты КРТ**

Важным моментом для осуществления метрологического контроля сигналов БВСЧ на орбите КРТ является использование широкополосного канала связи Борт – Земля для передачи научных данных (ВИРК). При условии осуществления синхронизации этого цифрового потока с сигналами 1 ppS БВСЧ и получения кросскорреляционной функции сигналов в наземно-космическом интерферометре по сильному радиосточнику автоматически осуществляется синхронизации бортовой и наземной (эталонной) шкал времени.

Комплексные испытания КРТ и КА «Навигатор» подтвердили их совместимость и соответствие параметров техническому заданию.

#### Список литературы

- 1 <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/en/rauh.pdf> (Radioastron User Handbook, 2010).
- 2 Крохин О.Н., Кардашев Н.С. Радиоастрономическая техника и методы. // Труды ФИАН, 2000. Т. 228, ч. 1, Космические проекты. С. 3-111.
- 3 Кардашев Н.С. «Радиоастрон» - радиотелескоп много больше Земли. Научная программа // УФН, 2009. Т. 179, № 11. С. 1191-1202.
- 4 Kardashev N.S., Kreisman B.B., Ponomarev Yu.N. New Orbit and New Possibilities of Radioastron Project, in the book «Radioastronomical Tools and Techniques», Kardashev N.S. & Dagkesamanski R.D. ed's. // Cambridge Sc. Publishers, 2007. P. 3-15.

УДК 629.78:522.59

**РАДИОАСТРОН (ПРОЕКТ «СПЕКТР-Р») –  
РАДИОТЕЛЕСКОП МНОГО БОЛЬШЕ ЗЕМЛИ.  
НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ  
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Ю.А.Александров\**, *В.В. Андреев\**, *Н.Г.Бабакин\**, *В.Е.Бабышкин\*\**, *К.Г.Белоусов\**, *А.А.Беляев\*\*\**, *А.В. Бирюков\**, *А.Е. Бубнов\**, *А.А. Быкадоров*, *В.И. Васильков\**, *И.С. Виноградов\**, *А.С. Гвамичава\**, *А.Н. Зиновьев\**, *Р.В. Комаев\*\**, *Б.З. Каневский\**, *Н.С. Кардашев\**, *Ю.А. Ковалёв\**, *Ю.Ю. Ковалёв\**, *А.В. Коваленко\**, *Ю.А. Корнеев\**, *В.И. Костенко\**, *Б.Б. Крейсман\**, *А.Ю. Кукушкин\**, *М.Г. Ларионов\**, *С.Ф. Лихачёв\**, *Л.Н. Лихачёва\**, *С.Ю. Медведев\*\*\**, *М.В. Мелёхин\*\**, *Т.А. Мизякина\**, *Н.Я. Николаев\**, *Б.С. Новиков\**, *И.Д. Новиков\**, *Ю.К.Павленко\*\*\**, *Ю.Н. Пономарёв\**, *М.В. Попов\**, *В.Н. Пышинов\**, *В.М. Рожков\*\*\*\**, *Б.А. Сахаров\*\*\**, *В.А. Серебренников\*\**, *А.И. Смирнов\**, *В.А. Степаньянц\*\*\*\**, *С.Д. Федорчук\**, *М.В. Шацкая\**, *А.И. Шейхет\*\**, *А.Е. Ширишаков\*\**, *В.Е. Якимов\**

*Космический интерферометр «Радиоастрон» работает совместно с крупнейшими радиотелескопами Мира. Наземные станции слежения обеспечивают приём информации, определение параметров орбиты для центров обработки информации. Проект рассчитан на систематические исследования изображений радиоизлучающих областей, их координат и изменений со временем в районах сверхмассивных чёрных дыр ядер галактик, черных дыр звёздных масс, нейтронных и кварковых звёзд, районов образования звёзд и планетных систем в нашей и других галактиках, структуры межпланетной и межзвёздной плазмы, гравитационного поля Земли.*

*Ключевые слова: космический интерферометр; синтез изображения; поток; интенсивность; поляризация; корреляционный центр обработки.*

**«RADIOASTRON» («SPEKTR-R» PROJECT) IS A RADIO TELESCOPE WHICH IS MUCH GREATER THAN THE EARTH. GROUND SEGMENT AND MAIN AREAS OF SCIENTIFIC STUDIES**

*Yu.A. Alexandrov, V.V. Andreyanov, N.G. Babakin, V.E. Babyshkin, A.A. Belyaev, K.G. Belousov, A.V. Biryukov, A.E. Bubnov, A.A. Bykadorov, V.I. Vasilkov, I.S. Vinogradov, A.S. Gvamichava, A.N. Zinoviev, R.V. Komaev, B.Z. Kanevskiy, N.S. Kardashev, Yu.A. Kovalev, Yu.Yu. Kovalev, A.V. Kovalenko, Yu.A. Korneev, V.I. Kostenko, B.B. Kreisman, A.Yu. Kukushkin, M.G. Larionov, S.F. Likhachev, L.N. Likhacheva, S.Yu. Medvedev, M.V. Melekhin, T.A. Miziakina, N.Ya. Nikolaev, B.S. Novikov, I.D. Novikov, Yu.K. Pavlenko, Yu.N. Ponomarev, M.V. Popov, V.N. Pyshnov, V.M. Rozhkov, B.A. Sakharov, V.A. Serebrennikov, A.I. Smirnov, V.A. Stepanyants, S.D. Fedorchuk, M.V. Shatskaya, A.I. Sheikhet, A.E. Shirshakov, V.E. Yakimov*

*Space interferometer «Radioastron» operates jointly with world's major radio telescopes. Ground tracking stations provide with data reception, determination of orbit parameters for data processing centers. The project is aimed at carrying out systematic analysis of images of radio emitting areas, its coordinates and changes with the lapse of time in regions of super massive black holes of galactic nuclei, black holes of stellar masses, neutron and quark stars, regions of stars and planetary systems formation in our and other galaxies, composition of interplanetary and interstellar plasma, the Earth gravitational field.*

*Key words: space interferometer; image synthesis; flow; intensity; polarization; correlation processing centre.*

\*Учреждение Российской Академии Наук. Физический институт им. П.Н. Лебедева. Астрокосмический центр, Россия, г. Москва.

\*\*ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

\*\*\*Закрытое Акционерное Общество «Время-Ч», Россия, г. Нижний Новгород.

\*\*\*\*Учреждение Российской Академии Наук. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Россия, г. Москва.

\*\*\*\*\*Открытое Акционерное Общество «Российские Космические Системы», Россия, г. Москва.

**Введение**

Перспектива начала исследований астрономических объектов с угловым разрешением в 30 раз лучше достигнутого определяется запуском космического радиотелескопа (КРТ), который образует с наземными радиотелескопами интерферометр Земля-Космос с базой до 350 000 км. В таблице 1 приведён список всех крупных радиотелескопов с эффективным диаметром антенны более 60 метров и указаны диапазоны КРТ, для которых возможны совместные интерферометрические наблюдения. Более подробные данные содержатся на сайте [1].

**1 Высокоинформативная радиолиния КРТ**

В процессе реализации проекта «Радиоастрон» была разработана и создана высокоинформативная радиолиния, предназначенная для передачи с борта космического аппарата на наземный приемный комплекс научной информации для последующей её об-

работки и служебной информации о состоянии КА и КРТ для передачи потребителям.

В состав высокоинформативной радиолинии входят бортовой радиокомплекс ВИРК (рисунок 1) и наземная станция слежения на базе радиотелескопа РТ-22 обсерватории АКЦ ФИАН в Пушино (рисунок 2).

В состав радиокомплекса ВИРК входят:

- передатчик на частоте 15 ГГц научных и служебных данных, полученных при проведении научных наблюдений; Мощность передатчика: 40 Вт Тип модуляции передатчика данных ДОФМ;
- передатчик на частоте 8.4 ГГц с выходной мощностью 2 Вт;
- высокочувствительный приемник сигналов на частоте 7.2 ГГц (Тш=70 К);
- антенно-фидерная система с остронаправленной антенной диаметром 1.5 м со следящим приводом, предназначенным для точного наведения на НСС.

**Таблица 1. Большие наземные радиотелескопы.**

Телескоп	Диаметр антенны (м)	Диапазоны КРТ
Аресибо (США)	300	P, L, C
GMRT (Индия)	246	P
VLA (США)	125	P, L, C, K
GBT (США)	100	P, L, C, K
Effelsberg (Германия)	100	L, C, K
WSRT (Нидерланды)	93	P, L, C
Jodrell Bank (Англия)	76	P, L, C
DSN Goldstone (США)	70	L, K
DSN Robledo (Испания)	70	L, K
DSN Tidbilla (Австралия)	70	L, K
Евпатория (Украина)	70	P, L, C, K
Уссурийск (Россия)		P, L, C, K ?
Parkes (Австралия)	64	P, L, C, K
Калязин (Россия)	64	L, C
Usuda (Япония)	64	L, C, K
Sardinia (Италия)	64	P, L, C, K

*Радиотелескопы с диаметром антенны более 60 м, привлекаемые по отдельным программам для наблюдений с радиотелескопом «Радиоастрон»*



**Рисунок 1. Бортовой высокоинформативный радиокомплекс**



**Рисунок 2. Наземная станция слежения на базе РТ – 22 (Пушино)**



**а - хранилище информации на 220 ТБ; б - устройство резервного копирования.  
Рисунок 3. Вычислительный кластер из 10 серверов (производительность 1 Тфлоп/с)**

Наземная станция слежения (НСС) предназначена для решения следующих задач:

1. Наведение антенны НСС на КА и слежение за ним в течение сеанса связи.
2. Прием с борта КА потока научных и служебных данных и регистрация их на магнитных носителях.
3. Передача на борт КА фазостабильного опорного сигнала, синхронизированного Н-мазером НСС.
4. Прием когерентно преобразованного на борту КА ответного сигнала, измерение текущей частоты остаточного доплеровского сдвига и текущей разности фаз ответного и запросного сигнала и их регистрацию с привязкой к текущему времени.
5. Прием внешних данных, необходимых для работы НСС и выдача потребителям информации о состоянии НСС.

Для решения этих задач был разработан и создан наземный аппаратный комплекс, работающий на совмещенных с бортовым комплексом ВИРК частотах: высокочувствительная система приема научных и служебных данных на частоте 15 ГГц, приемопередающая система на частотах 7.2/8.4 ГГц, система регистрации и первичной обработки научных и служебных данных, а также система опорных частот с Н-мазером и служба времени с GPS приемником. Антенна РТ-22 была оснащена специально разработанной антенно-фидерной системой (АФС), позволяющей работать на указанных выше частотах.

С бортовым ВИРК проведены все виды испытаний и проверок, в том числе, в составе бортового научного комплекса КРТ. Отработка комплекса наземной станции слежения (НСС) проведена по специальной программе наземной отработки, а также совместно с бортовым научным комплексом КРТ. Подтверждена надежная работа по приему научной и служебной информации по линии БОРТ-ЗЕМЛЯ.

## **2 Центр обработки информации космического интерферометра**

Конечная обработка и интерпретация результатов научных исследований на космическом интерферометре производится в центре обработки АКЦ ФИАН и в центрах обработки других участников проекта. Здесь в первую очередь выполняется кросскорреляционная обработка потоков данных, записанных на отдельных радиотелескопах, включая космический сегмент КРТ, с помощью созданной в АКЦ ФИАН системы регистрации RDR-1 с плотностью записи 256 Кбит/сек.

Программный FX-коррелятор АКЦ построен на базе эффективного вычислительного кластера с производительностью 1 Тфлоп/сек и RAID-системой хранения информации емкостью до 220 Тбайт (рисунок 3).

Компьютерная реализация вычисления кросскорреляционной функции сигналов отдельных интерферометров выглядит в виде следующей последовательности операций:

«Преобразование Фурье – Перемножение - Обратное преобразование Фурье».

По сравнению с существующими аппаратными корреляторами данная последовательность позволяет существенно повысить производительность обработки данных, управлять функциональностью и многомодовостью этого процесса без дополнительных финансовых затрат.

Программный коррелятор АКЦ ФИАН воспринимает данные в любом из существующих в текущей практике РСДБ форматов. Для синхронизации потоков данных с микросекундной точностью в миссии используются прецизионные аналитические модели движения космического аппарата «Радиоастрон» и фактические результаты дистанционных баллисти-

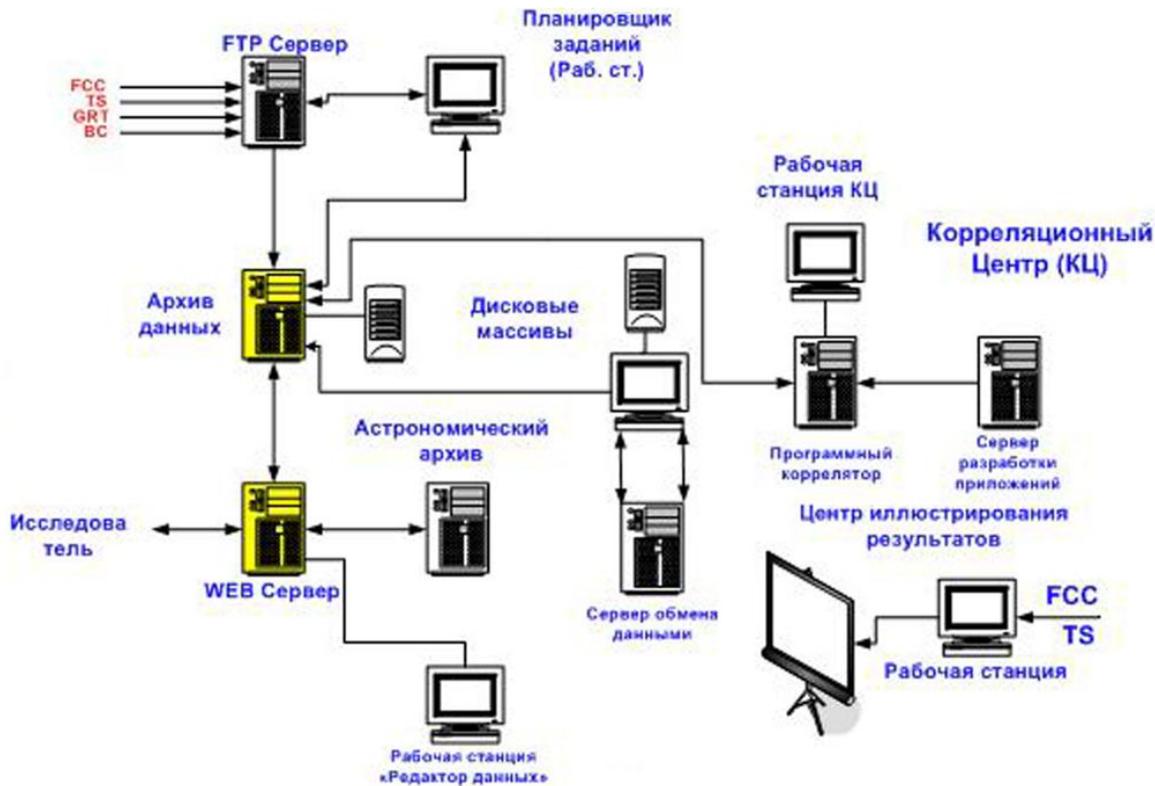


Рисунок 4. Схема функционирования центра обработки данных АКЦ ФИАН

ческих измерений параметров его орбиты, поставляемых центром интерпретации траекторных измерений Института прикладной математики РАН (рисунок 4).

Операционная скорость кластера АКЦ позволяет принимать поток данных от десяти станций (включая КРТ Радиоастрон) с общей плотностью 2.56 Гбит/сек и, соответственно, обрабатывать потоки от 45 формируемых в эксперименте интерферометров. Это происходит практически без снижения темпа поступающих в реальном времени данных наблюдений.

Помимо коррелятора, в центре обработки поддерживается собственное пользовательское приложение ASL, в котором реализованы конкретные программы решения астрофизических задач:

- для источников с непрерывным спектром излучения;
- для источников монохроматического мазерного излучения (молекулярные линии OH и H<sub>2</sub>O);
- для источников импульсного излучения с непрерывным спектром (пульсаров) и определения параметров среды распространения импульсов в Галактике.

В 2010 – 2011 гг. на диапазонах КРТ АКЦ ФИАН с участием отечественных и зарубежных радиотелескопов был проведен цикл интерферометрических экспериментов для проверки технического и программного обеспечения обработки проекта «Радиоастрон». Чувствительность эмулированного инструмента и качество результатов показали их полное соответствие принятым требованиям.

### 3 Основные направления научных исследований с КРТ

Предполагается, что для самых коротких волн (К-диапазон) в проекте РадиоАстрон будет реализовываться метод многочастотного синтеза (МЧС) изображений [2]. При этом один канал с круговой поляризацией будет работать на фиксированной частоте 22.232 ГГц. Второй, одновременно работающий, канал с круговой поляризацией противоположной ориентации, будет иметь возможность переключаться в интервале 18.392-25.112 ГГц, т.е.  $f_{\max} / f_{\min} = 1.37$ . Это позволит получать одномерные изображения за время, определяемое временем интегрирования для каждого канала, умноженного на число переключаемых частот. Двухмерные изображения можно будет получать дважды за виток с максимальным угловым разрешением и  $1 - (f_{\min} / f_{\max})^2 = 46\%$  заполнением эллиптической области на плоскости пространственных частот UV. Важно отметить, что эта величина не зависит от размеров и других параметров орбиты. В целом, канал с фиксированной частотой полностью совместим с наземными радиотелескопами. Канал с перестраиваемой частотой будет, совместим с такой же полосой К-диапазона специально подготовленных наземных радиотелескопов.

Некоторые преимущества МЧС-метода:

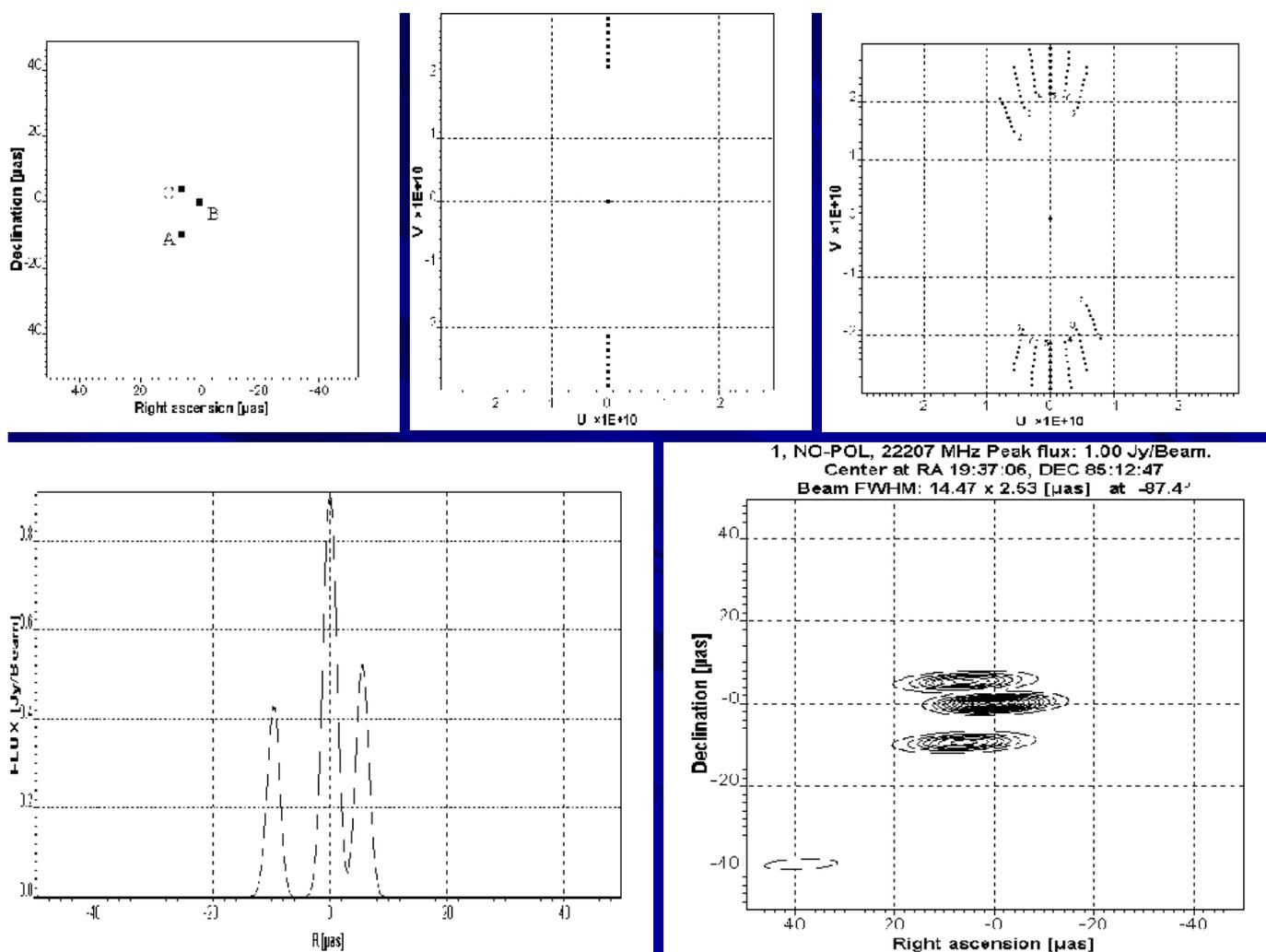
- возможность получения одномерных изображений источников с экстремально высоким угловым разрешением меньше чем за час и для любой части орбиты;

- двумерные изображения могут быть получены за 3-5 дней в любой части орбиты или за 0,5 - 1 день вблизи перигея;
- возможность получения спектра в К - диапазоне для различных деталей изображения;
- определение зависимости углового размера изображения от частоты, связанной с рассеянием, поглощением или другими физическими процессами;
- создание карты линейной поляризации и карты мер Фарадеевского вращения или карты круговой поляризации, а также определение зависимости степени поляризации от частоты;
- возможность определения дифференциальных координат и собственных движений с экстремально высокой точностью;

- исследование физической переменности структуры источников и/или переменности за счет межзвездной плазмы или плазмы в оболочке источника как функции частоты.

Для реализации указанных целей может быть выбрана соответствующая мода наблюдений, определяемая центральной частотой настраиваемого канала, а именно 18.392, 19.352, 20.312, 21.272, 22.232, 23.192, 24.152, 25.112 ГГц. Ширина полосы для каждой частоты равна 32 МГц.

На рисунке 5 показаны результаты численного моделирования одномерной и двумерной карты источника, состоящего из трёх точечных компонент [5].



Слева сверху – истинное изображение (три точечных источника с потоками  $F_A = 0.5$ ,  $F_B = 1.0$  и  $F_C = 0.5$  условных единиц,  $AB = 12$  мкс,  $AC = 15$  мкс,  $BC = 9$  мкс; в центре сверху – заполнение UV-плоскости при переключении 8 частот К канала; слева внизу – одномерное изображение в результате этого; справа сверху – заполнение UV-плоскости после пяти таких переключений частоты при движении по орбите в течение пяти дней; справа внизу – соответствующее двумерное изображение.

Рисунок 5. Моделирование применения МЧС метода в проекте «РадиоАстрон» [2]

Таблица 2 - Наиболее сильные и интересные компактные внегалактические источники

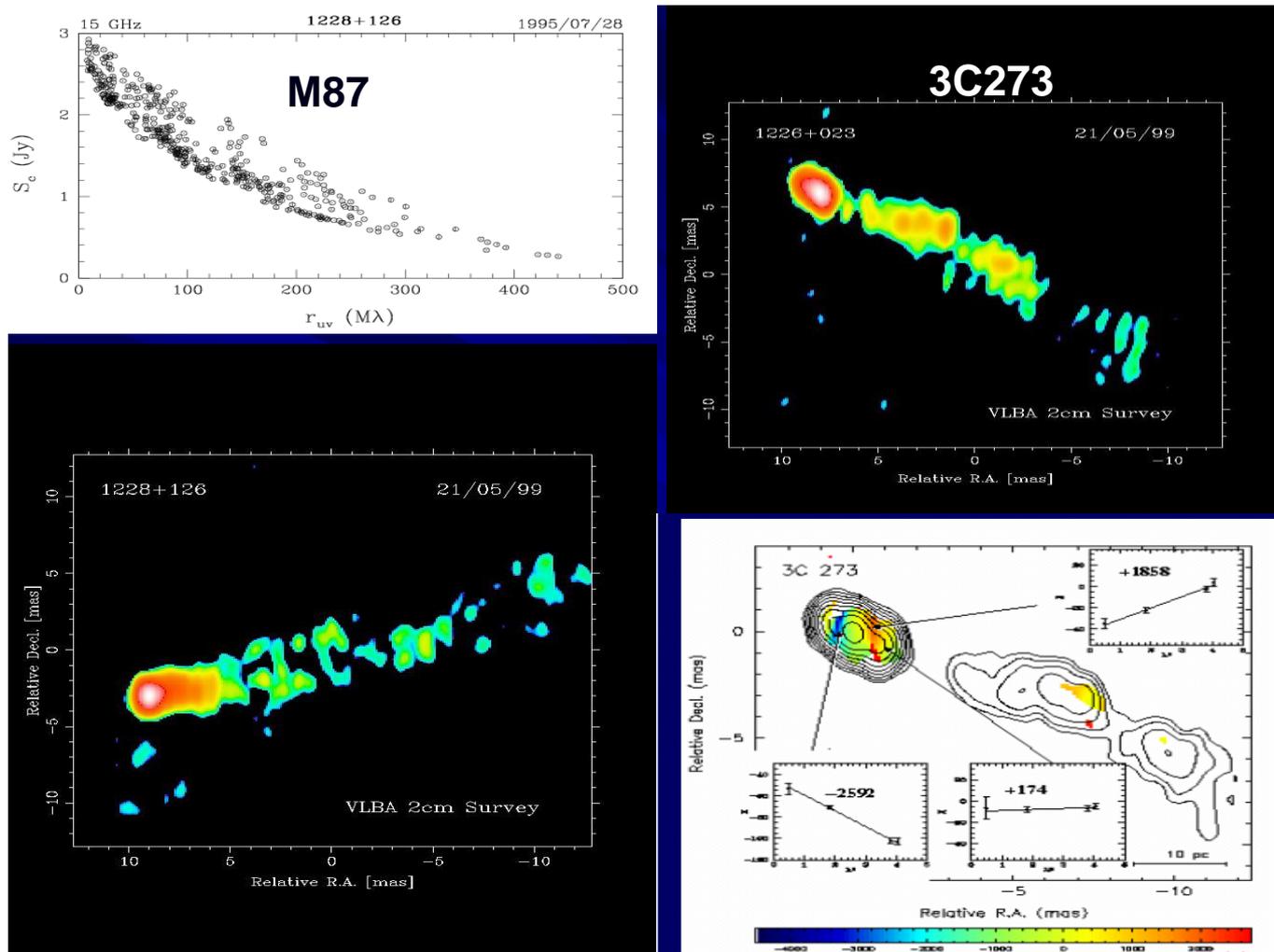
IAU И.А.З.В.А.Н.И.Е	Другие названия	z	S (Ян)	$\Theta_{\max}$ (мс дуги)	$\Theta_{\min}$ (мс дуги)	$T_b$ ( $10^{13}$ К)	$N_0$	N
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0420-014		0.915	7.62	0.09	<0.02	>5.18	6	4
0528+134		2.07	4.21	0.22	<0.03	>2.06	6	3
0716+714		(0.3)	2.51	0.08	<0.01	>1.85	6	5
1055+018	4C+01.28	0.888	4.28	0.23	<0.02	>1.36	8	5
1334-127		0.539	7.17	0.16	<0.01	>3.19	6	4
1730-130	NRAO530	0.902	7.49	0.23	<0.03	>1.50	7	5
1741-038	OT-068	1.057	4.55	0.16	<0.02	>2.03	3	1
1749+096	4C+09.57	0.320	5.13	0.16	<0.02	>1.34	6	4
2230+114	CTA 102	1.037	3.11	0.12	<0.03	>1.27	9	5
2255-282		0.927	5.50	0.13	<0.02	>2.24	2	1
0642+449	OH471	3.408	1.67	0.21	0.08	0.43	6	4
0851+202	OJ 287	0.306	3.32	0.12	<0.05	>0.39	10	7
1226+023	3C 273	0.158	7.36	0.13	<0.06	>0.17	15	11
1228+126	M87	0.004	0.73	0.41	<0.27	>0.007	13	5
1253-055	3C279	0.538	11.21	0.30	<0.05	>0.88	14	8
1508+572	VSOP	4.309	(0.1)					
1937-101		3.787	0.16	0.30	0.12	0.015	2	0
2200+420	BL Lac	0.069	2.78	0.37	<0.03	>0.15	14	10
2251+158	3C454.3	0.859	3.77	0.26	0.11	0.105	11	4

Колонки: 1 – IAU название источника; 2 – другие названия; 3 – красное смещение; 4, 5, 6, 7 – поток, максимальный и минимальный размер и яркостная температура неразрешенной детали на 15 ГГц; 8 – количество эпох наблюдений; 9 – количество эпох наблюдений, когда наблюдалась неразрешенная деталь [3].

Одной из основных задач научной программы космического интерферометра «Радиоастрон» будет исследование структуры и динамики центральных областей внегалактических радиоисточников синхротронного излучения, которые вероятно позволят получить информацию из районов вблизи горизонта событий сверхмассивных чёрных дыр. Массовое исследование структуры и спектров внегалактических объектов и выявление неразрешенных на Земле компонент было проведено на многих наземных радиотелескопах и глобальном интерферометре VLBA, на частоте 15 ГГц [3]. Некоторые наиболее сильные и интересные компактные источники собраны в таблице 1.

На рисунке 6 слева показаны изображение и зависимость величины наблюдаемого потока радиоизлучения от базы интерферометра, т.е. от углового разрешения при наблюдениях на волне 2 см с антенной решеткой VLBA радиогалактики Дева А (M87).

В центре M87 находится сверхмассивная черная дыра, одна из самых больших, которые известны в настоящее время. Её масса – 6.6 миллиардов солнечных масс [4]. Из рисунка видно, что центральная часть объекта не разрешается при самых больших базах. С помощью интерферометра «Радиоастрон» можно будет впервые исследовать строение самых внутренних частей этого объекта или даже заглянуть внутрь (если это не чёрная дыра, а, например, вход в кротовую нору). Минимальная ширина лепеска интерферометра «Радиоастрон» семь микросекунд дуги и, в зависимости от отношения сигнал-шум, можно будет измерить размер источника с точностью до доли лепестка, например одну десятую лепестка, т.е. ожидаемое угловое разрешение будет лучше микросекунды (мс) дуги. Ожидаемые размеры силуэта, т.е. диаметр Шварцшильдовской сферы чёрной дыры будет  $2R_S = 4GM/c^2 = 14.6$  мкс. Ожидаемый диаметр



Слева сверху – зависимость для M87 функции видности от проекции базы наземного интерферометра VLBA на частоте 15 ГГц; внизу – её изображение; справа сверху – изображение 3C273 на том же инструменте; внизу – зависимость угла поляризации от частоты наблюдений.

Рисунок 6. Радиогалактика M87 и квазар 3C273 – важнейшие внегалактические объекты для исследований в программе «Радиоастрон»

круговой орбиты для света около невращающейся черной дыры ( $a=0$ )  $(108)^{0.5}GM/c^2 = 37.8$  мкс. Диаметр силуэта с предельным вращением ( $a=1$ )  $9GM/c^2 = 32.8$  мкс, смещение центра изображения  $(5)^{0.5}GM/c^2 = 8.1$  мкс (4).

На рисунке 6 справа показаны также изображение квазара 3C273 на волне 2 см [3] и данные по исследованию изменения плоскости поляризации с частотой наблюдения [5]. Объект является одним из самых сильных по наблюдаемому потоку радиоизлучения. Он интересен особенно тем, что имеет, по видимому, односторонний выброс релятивистских частиц. Одно из возможных предположений для объяснения такой структуры – это не сверхмассивная чёрная дыра, а вход в кротовую нору [6].

Важнейшим при измерении поляризации обоих этих объектов является вопрос о том, какова структура

магнитного поля вокруг центрального объекта - дипольная или, может быть, монополярная? Или же, какая-то, более сложная? Если магнитное поле обусловлено вращающимся вокруг сверхмассивной черной дыры аккреционным диском, то ожидается дипольный характер поля. В работе [5] было выяснено по измерению Фарадеевского вращения около ядра 3C273, что противоположные края относительно центрального объекта имеют противоположный знак вращения и, следовательно, противоположный знак магнитного поля. Это, возможно, говорит о том, что наблюдается монополярная структура магнитного поля. А если это так, то указывает на возможность существования входа в кротовую нору или черной дыры с магнитным зарядом (бывшую кротовую нору).

Еще одно важное направление исследований – обнаружить, где во Вселенной находятся источники

космических лучей. По наблюдениям обсерватории им. Пьера Оже космические частицы около Земли самых высоких энергий прилетают из ближайшей радиогалактики Центавр-А (NGC5128), до которой расстояние 3.5 Мпс, масса чёрной дыры  $5.5 \times 10^7$  солнечных, т.е. примерно в сто раз меньше, чем M87. Тем самым показано, что внегалактические источники мощного синхротронного излучения являются одновременно генераторами космических лучей самых высоких энергий; а раз так, то и в самих этих источниках релятивистские протоны могут давать синхротронное излучение, которое можно попытаться обнаружить [8].

Отношение предельных яркостных температур для релятивистских протонов и электронов (если интенсивность ограничивается комптоновским рассеянием того же излучения)  $T_p/T_e = (m_p/m_e)^{6/5} = (1830)^{6/5} = 8821$ ,  $m_p$  и  $m_e$  – массы покоя протона и электрона. Если предельная температура синхротронного излучения релятивистских электронов  $T_e = 10^{12}$  К, то ожидаемая предельная температура излучения релятивистских протонов  $T_p = 8 \times 10^{15}$  К. Для заданного потока излучения  $F_\nu \propto (T/\lambda^2)\Omega \propto T/B^2$ , где  $T$  – яркостная температура;  $\Omega$  – телесный угол источника;  $B_e$  и  $B_p$  – проекции базы интерферометра на картинную плоскость (для излучающих в источнике электронов или протонов), необходимые для разрешения источника с данным потоком для предельных яркостных температур. Тогда  $B_p/B_e = (m_p/m_e)^{3/5} = 90$ . Поэтому для разрешения источников синхротронного излучения протонов требуются интерферометры с существенно большей базой, чем для электронов.

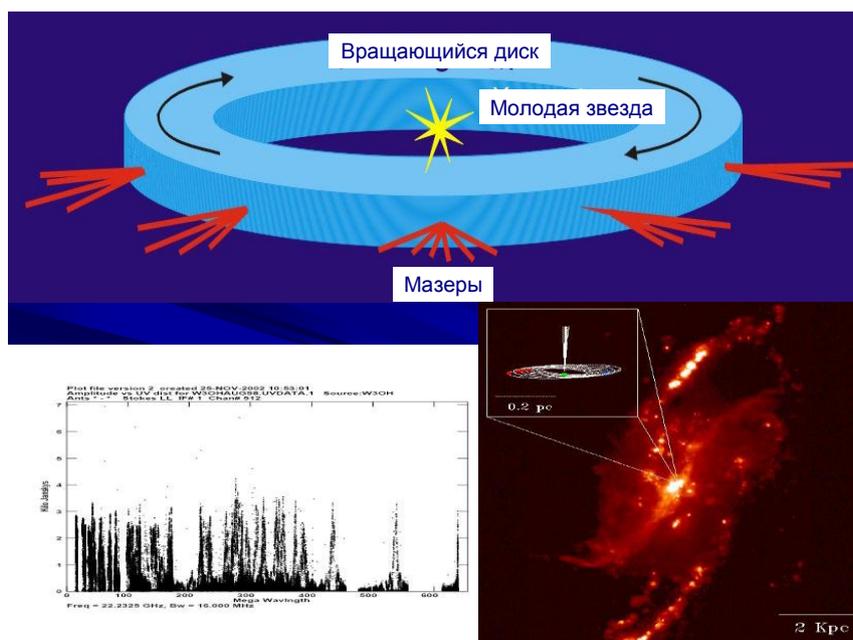
Синхротронное излучение релятивистских протонов может быть выявлено по обнаружении очень высоких яркостных температур, превышающих предел для релятивистских электронов. Здесь, при проведении наблюдений, важно будет также учесть возможное увеличение яркостной температуры за счёт движения источника в сторону наблюдателя (доплеровское усиление), что может контролироваться измерениями угловой скорости собственного движения или расширения источника. Только использование высокого углового разрешения позволит установить – наблюдается ли стабильный источник с температурой, например,  $10^{15}$  К. Это будет говорить о том, что действительно наблюдается генератор космических лучей, и все его параметры тем самым можно исследовать.

Многие внегалактические источники показывают сильную переменность наблюдаемого потока радиоизлучения. Эти наблюдения позволяют также дать нижнюю границу яркостной температуры. Так, из переменности на интервалах времени менее суток источника 0716+714 следует, что его яркостная тем-

пература более  $10^{15}$  К и даже  $10^{19}$  К [9]. Такая яркостная температура в модели доплеровского усиления должна соответствовать Лоренцовскому фактору 90, и это может быть проверено только с помощью космического интерферометра.

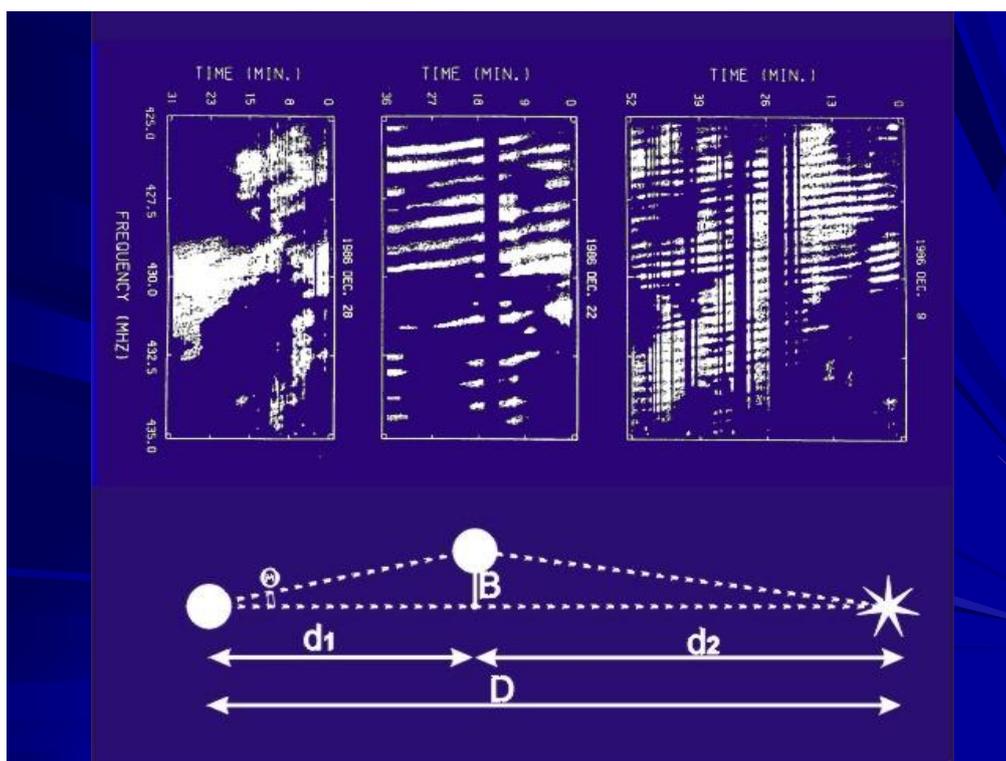
Предыдущие части программы исследований были связаны с изучением источников синхротронного излучения, охватывающего многие диапазоны частот. Качественно другой тип источников большой интенсивности – это объекты с узкополосным мазерным излучением. Мощное узкополосное излучение наблюдается в линиях некоторых молекул для областей образования молодых звёзд и планетных систем. На рисунке 7 показана модель формирования такого излучения для района звездообразования и результаты наблюдений линии водяного пара в диапазоне 22 ГГц на интерферометрической решетке VLBA источника W3(OH) [10]. По горизонтальной оси отложена база интерферометра, по вертикальной – коррелированный поток. Видно, что источник исключительно компактный и не разрешен для самых больших баз. Рисунок 7 показывает также источники мазерного излучения в той же линии около ядра другой галактики NGC4258 [11]. Вокруг центрального объекта (возможно, черной дыры) наблюдаются компактные области, излучающие в линии водяного пара. Они показаны точками; красные и синие точки означают движение от нас и на нас. Наблюдается целый класс подобных объектов (мегамазеры), отдельные детали которых до сих пор не разрешены и будут являться объектами для исследования. Ожидаемые предельные яркостные температуры до  $10^{16}$  К [10]. Кроме определения структуры комплексов звездообразования и размеров отдельных областей, очень важным направлением исследований с космическим интерферометром представляется определение параллаксов и собственных движений мазерных источников для построения модели нашей и других галактик, а также и космологии.

Когерентный механизм излучения обеспечивает и более высокие яркостные температуры. Этот механизм вероятно ответственен за радиоизлучение пульсаров – нейтронных звёзд. Однако их размеры настолько малы, что и космический интерферометр не сможет разрешить даже ближайšie объекты. На рисунке 8 показан метод, который фактически еще не использовался в радиоастрономии. Он может быть реализован только с помощью специальных наблюдений с космическим интерферометром. Этот метод предполагает наблюдения мерцаний коррелированного сигнала, обусловленных неоднородностями межзвёздной плазмы. Мерцания являются результатом сложения сигналов, прошедших через эту



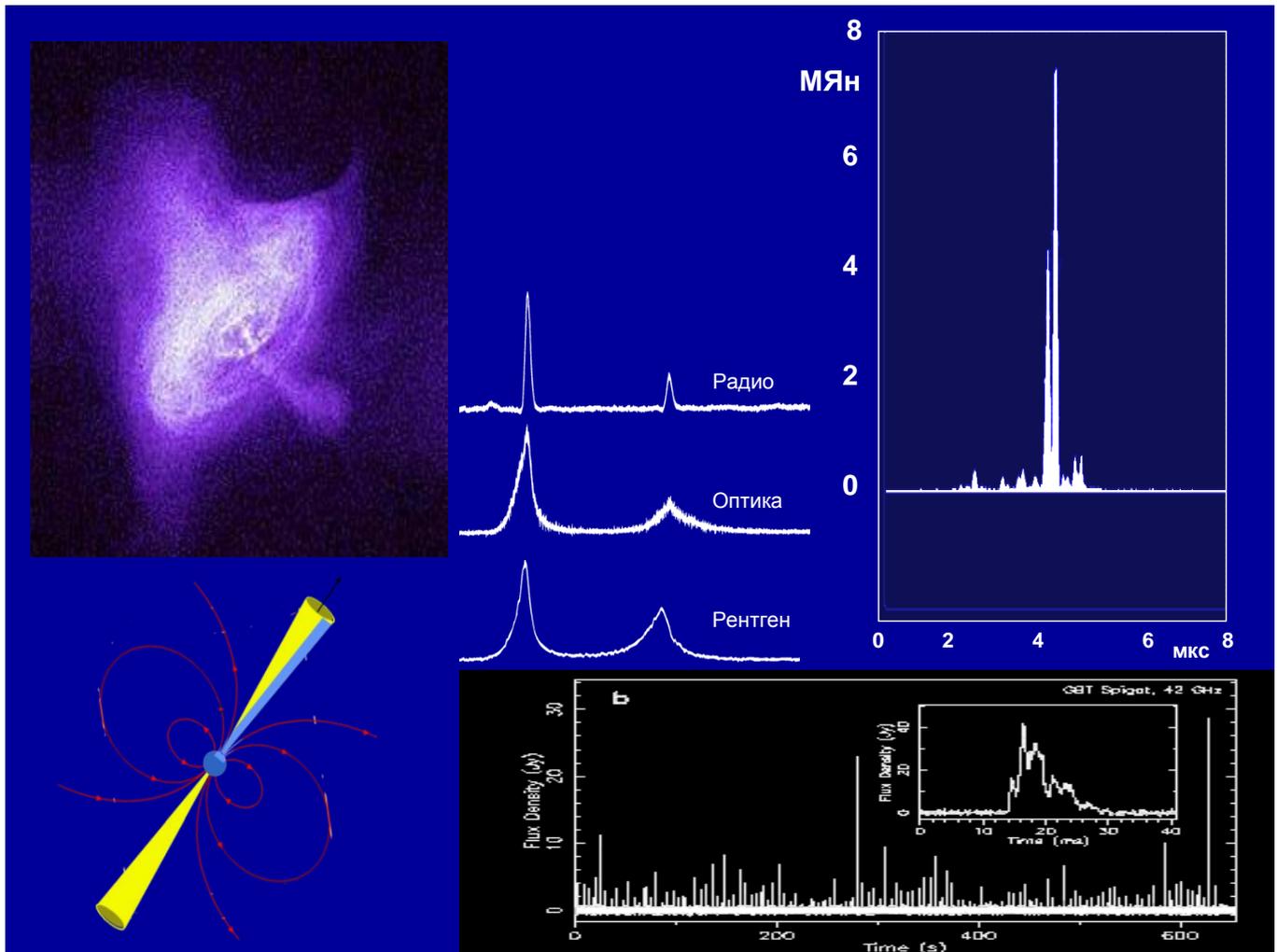
Вверху - модель области звездообразования с мазерами; внизу слева – зависимость наблюдаемого VLA коррелированного потока  $\text{H}_2\text{O}$  мазера (22 МГц) для области W3(OH) от базы интерферометра (на горизонтальной оси обозначения в миллионах длин волн) [10]; внизу справа –  $\text{H}_2\text{O}$  мегамазер и изображение в линии  $\text{H}\alpha$  галактики NGC4258, расстояние 6.4 Мпк [11].

Рисунок 7. Модель формирования узкополосного излучения



Вверху – динамический спектр пульсара PSR 1237+25, период 1.4 секунды, расстояние 560 пс, наблюдения на телескопе Аресибо, диапазон 430 МГц [12]; внизу – схема двулучевого «межзвёздного» интерферометра.

Рисунок 8. Результаты наблюдений динамического спектра мерцаний пульсара PSR1237+25 с радиотелескопом Аресибо на частоте 430 МГц [12]



Справа сверху - сверхгигантский радиоимпульс пульсара в Крабовидной туманности: поток около Земли 7 млн. Ян в диапазоне 2,2 ГГц, яркостная температура  $T > 10^{40}$  К, электромагнитное поле  $H > 10^{12}$  Гс, наблюдения на РТ-64 в Калязине [15]; слева – изображение Крабовидной туманности в рентгеновском диапазоне – обсерватория Chandra и модель вращающейся нейтронной звезды с магнитным полем; в центре – запись в течение периода вращения нейтронной звезды 33 миллисекунды нормальных импульсов в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах; справа внизу – запись источника ХТЕ J1810-540, это иногда радиоизлучающий магнетар, период 5.54 секунды, магнитное поле  $2.6 \times 10^{14}$  Гс, наблюдения с телескопом GBT на частоте 42 ГГц [14].

Рисунок 9. Данные наблюдений ХТЕ J1810-540

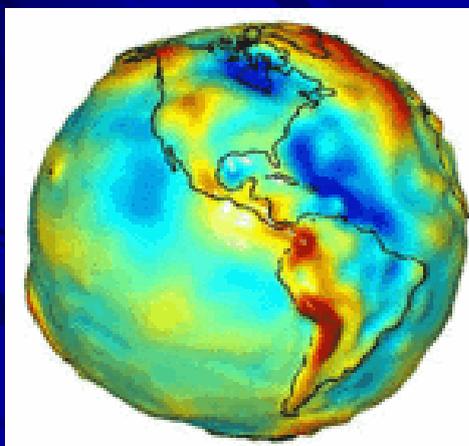
среду по разным траекториям. То есть интерферометр с много большими базами естественно возникает при прохождении лучей через облака межзвёздной плазмы. На рисунке 8 приведены также результаты наблюдений динамического спектра мерцаний пульсара PSR1237+25 с радиотелескопом Аресибо на частоте 430 МГц [12]. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной – частота. Чёткая полосатая картина соответствует ожидаемой для двухлучевого распространения сигналов, т.е. для двухантенного интерферометра с очень большой космической базой, но пока нет информации, как выглядит эта картина в разных частях пространства около Земли. Такая чёткая интерференция, соответствующая

двухлучевому распространению сигналов, наблюдается редко. Обычно виден более сложный динамический спектр и имеет место многолучевое распространение сигнала, но и в этих случаях можно определить параметры эффективного межзвёздного интерферометра [13]. С помощью «Радиоастрона» этот метод, вероятно позволит получить разрешение еще в сотни и тысячи раз более высокое, чем с помощью интерферометра Земля-Космос.

Недавно открыт новый класс пульсаров-магнетаров (PSR J1550-5418 – период 2.069 с и ХТЕ J1810-5408 – период 5.54 секунды), обладающих аномальным спектром – плоским или даже растущим для более высоких частот в сантиметровом и милли-

## Гравитационное поле Земли и ОТО

- Измерение аномальных ускорений с точностью  $10^{-10}$   $\text{м}/\text{с}^2$  и построение гравитационного потенциала Земли на больших расстояниях.
- Проверка эффектов ОТО (поперечный эффект Доплера, ход часов, уточнение величины красного смещения частоты на 2 порядка, проверка гравитационного взаимодействия тел  $1/R^2$ ).



**Рисунок 10. Направления изучения гравитационного поля Земли с помощью анализа данных, получаемых из интерферометрических наблюдений и высокоточных наблюдений орбиты и её эволюции для миссии «Радиоастрон»**

метровом диапазоне [14]. Проблема возникновения когерентного излучения на столь высоких частотах (т.е. образования мельчайших неоднородностей заряда) представляется исключительно интересной. Эти объекты одновременно являются транзитными рентгеновскими источниками, Их пульсирующее радиоизлучение тоже возникает спорадически. На рисунке 9 (справа внизу) показаны данные наблюдений XTE J1810-540.

Для некоторых пульсаров были обнаружены отдельные импульсы, амплитуда которых на много порядков превосходит среднее значение. В частности, такие импульсы от пульсара в Крабовидной туманности наблюдаются примерно раз в час. Для таких импульсов зарегистрирован абсолютный рекорд яркостной температуры  $10^{40}$  К [15]. Помимо исключительно интересного направления исследований, направленных на выяснение того, где и как возникают такие явления в магнитосфере нейтронной звезды, возможно очень важное прикладное применение наблюдений гигантских импульсов - синхронизация времени на всей Земле, если его наблюдать во многих точках и на «Радиоастроне» (рисунок 10).

На рисунке 10 показана также карта гравитационных аномалий, построенная по наблюдениям с низколетящего спутника GRACE [16], а «Радиоастрон» сможет построить гравитационное поле вплоть до очень больших расстояний.

Запуск космической обсерватории «Радиоастрон» планируется в текущем году, ресурс программы научных исследований, в соответствии с технологическими возможностями - не менее пяти лет.

### Список литературы

1. <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>.
2. Multi-frequency Reception Method for Radio Images Synthesis in the RADIOASTRON project, in the book «Radioastronomical Tools and Techniques» / V.V. Andreyanov [et al.] // Kardashev N.S. & Dagkesamanski R.D. ed's, Cambridge Sc. Publishers, 2007. P. 17-26.
3. Kovalev Y. Y., Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C., Vermeulen R. C., Cohen V. H., Ros E., Kadler M., Lobanov A. P., Zensus J. A., Kardashev N.S., Gurvits L.I., Aller M. F. & Aller H. D., AJ, 130, 2473, 2005; Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C., Vermeulen R. C., Cohen M. H., Ros E., Kadler M., Zensus J. A., and Kovalev Y. Y., ApJ, 609, 539 2004; Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Kardashev N. S., Larionov M. G., ARep, 52, 429, 2008; Mingaliyev M. G., Sotnikova Yu. V., Bursov N. N., Kardashev N. S., Larionov M. G.,
4. Gebhardt, K. A., J., Richstone, D., Lauer, T., Gultiken, K., Murphy, J., Faber, S., Tremaine, S., arXiv: 1101.1954; Broderick A.T. & Loeb F., arXiv: 0812.0366.
5. Zavala R. T. & Taylor G. B. Time-Variable Faraday Rotation Measures of 3C 273 and 3C 279 // ApJ, 550, L147, 2001.

6. Кардашев Н.С., Новиков И.Д., Шацкий А.А. Магнитные тоннели (кротовые норы) в астрофизике // *Астрономический журнал*, 2006. 83. 675 с.

7. Johannes Bluemer for the Pierre Auger Collaboration, arXiv:0807.4871.

8. Кардашев Н.С. Синхротронное радиоизлучение от протонов и электронов в пульсарах и квазарах // *Астрономический журнал*, 2000. 77. 813 с.

9. Fuhrmann L. and 34 coauthors Testing the inverse-Compton catastrophe scenario in the intra-day variable blazar S5 0716+71. III. Rapid and correlated flux density variability from radio to sub-mm bands // arXiv:0809.2227.

10. Slysh V.I. Self-Stark Limit on Brightness Temperature in Cosmic Masers // *ASP Conf. Proc.*, 2003. 300. 239 с.

11. Miyoshi, M., Moran, J., Herrnstein, J., Greenhill, L., Nakai, N., Diamond, P., Inoue, M. Evidence for a black hole from high rotation velocities in a sub-parsec region of NGC4258 // *Nature*, 1995. 373. 127 с.

12. Wolszczan A. & Cordes J.M. Interstellar interferometry of the pulsar PSR 1237+25// *ApJ*, 320, L35, 1987; Shishov V.I. Turbulent Interstellar Plasma and Ultrahigh Angular Resolution in Radio Astronomy // *ARep*, 2001.45. 195 с.

13. Шишов В.И. Межзвёздные мерцания и наносекундное разрешение в радиоастрономии // *Астрономический журнал*, 2010. Т. 87. С. 1-4.

14. Camilo, F., Ransom, S. M., Halpern, J. P., Reynolds, J., Helfand, D. J., Zimmerman, N., Sarkissian, J., Transient pulsed radio emission from a magnetar // *Nature*, 2006. 442. P. 892.

15. Popov, M. V., Soglasnov, V. A., Kondratiev, V. I., Bi-lous, A. V., Moshkina, O., Oreshko, V. V., Ilyasov, Yu. P., Sekido, M., Kondo, T. Multifrequency Study of Giant Radio Pulses from the Crab Pulsar with the K5 VLBI Recording Terminal // arXiv:0903.2652; Soglasnov V.; Amazing properties of giant pulses and the nature of pulsar's radio emission // arXiv:astro-ph/0701190.

16. <http://nasascience.nasa.gov/missions/grace/>.

УДК 629.78.054 «Фобос-Грунт»

## ПРОЕКТ «ФОБОС-ГРУНТ»: ПРИБОРЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

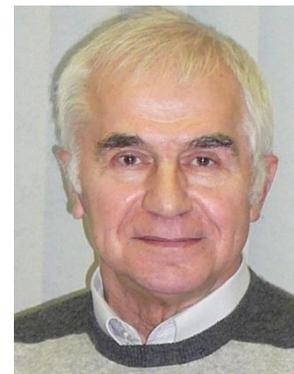
*Л.М. Зеленый, А.В. Захаров*



### ЗЕЛЕНЬЙ

**Лев Матвеевич**

академик РАН,  
Институт Космических  
Исследований Российской  
Академии Наук (ИКИ РАН),  
E-mail: lzelenyi@iki.rssi.ru



### ЗАХАРОВ

**Александр Валентинович**

доктор физико-математических  
наук,  
Институт космических  
исследований РАН,  
E-mail: zakharov@iki.rssi.ru

*В статье приводится краткий обзор научных задач проекта «Фобос-Грунт», указан перечень научных приборов, установленных на борту космического аппарата, и основные задачи, решаемые этими приборами.*

*Ключевые слова: Фобос; Марс; реликтовое вещество; приборы для научных исследований.*

**«PHOBOS-GRUNT» MISSION: SCIENTIFIC INSTRUMENTS L.M. Zelenyi, A.V. Zakharov**

*The article provides a review of scientific objectives of «Phobos-Grunt» mission, contents of the scientific instruments, included in the payload and main goals of the instruments.*

*Key words: Phobos; Mars; relic matter; scientific instruments.*

Основной целью проекта «Фобос-Грунт» является доставка на Землю образцов вещества с Фобоса для их последующих всесторонних исследований в земных лабораториях. Подробное описание научных задач проекта и отдельных экспериментов представлены в статье академика Л.М. Зеленого [1]. Задачи лабораторных исследований доставленных на Землю образцов реголита Фобоса рассматриваются в статье академика Э.М. Галимова [2]. На посадочном аппарате, помимо грунтозаборного устройства и манипулятора установлен комплекс научных приборов, предназначенных для прямых (*in situ*) измерений физико-химических свойств поверхности в области места посадки аппарата. Наряду с этим, предполагаются исследования системы Марса, включающей саму планету, его спутники и околомарсианское пространство путем дистанционных измерений с орбитального аппарата.

Основные научные задачи проекта нацелены на решение широкого спектра проблем, связанных, в первую очередь, с генезисом Солнечной системы. Решение этой главной задачи должно быть обеспечено путем исследования физико-химических свойств реликтового вещества с Фобоса. Другие научные задачи включают в себя:

- исследования физико-химических характеристик Фобоса как небесного тела (рисунок 1), что позволит приблизиться к пониманию происхождения марсианских спутников и, возможно, происхождения спутниковых систем у других планет;
- определение детальных параметров орбитального и собственного вращения Фобоса, что важно для изучения внутреннего строения этого малого тела и эволюции его орбиты;
- исследования физических условий среды вблизи Марса – электрических и магнитных полей, характеристик взаимодействия солнечного ветра с плазменным окружением Марса, в том числе регистрация «убегающих» из атмосферы Марса ионов кислорода, что позволит расширить представления об истории воды на Марсе;
- исследования вариаций атмосферы Марса.

Для решения научных задач проекта на борту перелетно-орбитального модуля установлены научные приборы. Программа научных исследований и экспериментов на борту космического аппарата включает исследования Фобоса и околомарсианского пространства на этапе орбитального движения космического аппарата вокруг Марса (до посадки на Фобос), а также на поверхности Фобоса (после посадки).

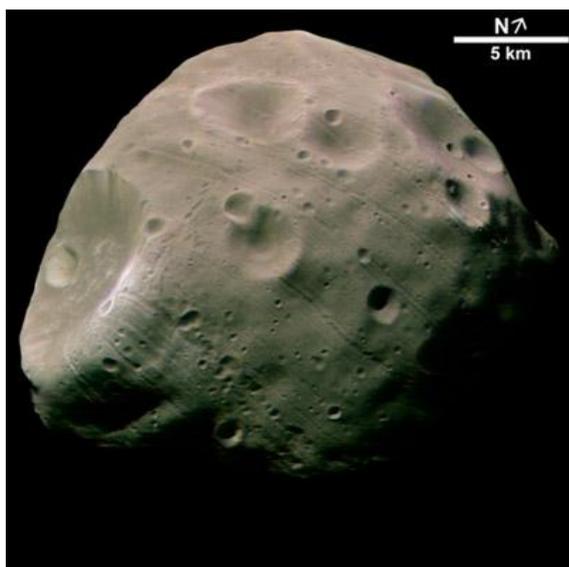


Рисунок 1. Телевизионное изображение Фобоса, полученное камерой высокого разрешения, установленной на космическом аппарате ЕКА «Марс-Экспресс»

Несколько приборов, установленных на аппарате, будут исследовать реголит Фобоса в области посадки аппарата. Область таких контактных исследований ограничена возможностью манипулятора, позволяющего обеспечить исследования реголита на расстоянии до метра от посадочного аппарата. На манипуляторе установлено устройство захвата образцов реголита для доставки их в возвращаемую капсулу космического аппарата и к аналитическим приборам на корпусе аппарата. Это дает возможность исследовать образцы грунта в нескольких местах в области посадки аппарата. Кроме того, исследования *in situ* в сочетании с наиболее сложной частью экспедиции – доставкой на Землю образцов грунта Фобоса, необходимы, повышения надежности выполнения всей экспедиции. Для исследования реголита предназначены приборы, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Приборы для исследований реголита

Приборы	Исследования
Хромато-масс-спектрометрический комплекс включает приборы: - Термо-дифференциальный анализатор ТДА, - Хроматограф ХМС-1Ф, - Масс-спектрометр МАЛ-1Ф	Исследование летучих компонентов реголита, выделяемых при пиролизе образцов вещества поверхности Фобоса. Прибор ТДА создан в ИКИ РАН в сотрудничестве с Гонконгским политехническим институтом (Китай). Прибор ХМС-1Ф создан в ИКИ РАН в сотрудничестве с научными группами Франции и Германии. Прибор МАЛ-1Ф создан в ГЕОХИ РАН.
Массбауэровский спектрометр, МИМОС	Определение минералогического состава соединений железа в грунте Фобоса. Прибор МИМОС создан в сотрудничестве ИКИ РАН и Гутенбергского университета (Германия).
Гамма-спектрометр, ФОГС	Исследование элементного состава пород Фобоса, изучение содержания основных породообразующих элементов (от Н до Fe) и естественных радиоактивных элементов (К, Th, U). Прибор создан в ГЕОХИ РАН.
Нейтронный спектрометр, ХЕНД	Изучение состава грунта Фобоса и составление карты распределения породообразующих химических элементов методами нейтронной и гамма-спектроскопии. Прибор создан в ИКИ РАН с участием ЕКА.
Лазерный времяпролетный масс-спектрометр, ЛАЗМА	Определение элементного и изотопного состава реголита Фобоса до глубины 2-3 мм. Прибор создан в ИКИ РАН в сотрудничестве с Университетом Берна (Швейцария).
Масс-спектрометр вторичных ионов, МАНАГА	Определение элементного и изотопного состава вторичных ионов, генерируемых с поверхности Фобоса под воздействием первичных ионов солнечного ветра. Прибор создан в ИКИ РАН.
Термодетектор, ТЕРМОФОБ	Измерение температуры и теплофизических свойств грунта поверхности Фобоса на основе решения обратной задачи теплопроводности. Прибор создан в ГЕОХИ РАН.
Фурье-спектрометр, АОСТ	Исследование минералогического состава поверхностного слоя Фобоса и Марса, а также изучение атмосферы Марса методами солнечных затмений и прямыми методами (суточных вариаций). Прибор создан в ИКИ РАН.
Микроскоп, МикрОмега	Получение изображений микроструктуры грунта Фобоса. Прибор создан в ИКИ РАН в сотрудничестве с научной группой Франции.

Исследования внутренней структуры Фобоса будет проводиться с помощью длинноволнового радара, а также сейсмическими методами. Эти исследования, наряду с данными телевизионной системы ТСНН, направлены на уточнение фигуры Фобоса, его массы, плотности, внутреннего строения, гравитационного поля, магнитного поля, морфологии поверхности, т.е. характеристик Фобоса как небесного тела. Для исследования внутреннего строения Фобоса предназначены приборы, представленные в таблице 2.

Несколько приборов направлены на изучение свойств околосолнечного пространства – взаимодействия солнечного ветра с плазменным окружением Марса, регистрацию микрометеоритов, а также для выполнения небесно-механических экспериментов. Здесь следует упомянуть, что одновременно с

работой космического аппарата «Фобос-Грунт» на орбите Марса будет находиться китайский научный спутник YN-1, доставляемый на орбиту Марса одновременно с КА «Фобос-Грунт». Учитывая это обстоятельство, планируется выполнить несколько экспериментов с использованием двух одновременно работающих у Марса космических аппаратов. Описание этих совместных российско-китайских экспериментов и перечень научной аппаратуры по плазменным и небесно-механическим экспериментам представлены в таблице 3. К этой же группе приборов относится дозиметр ЛЮЛИН, предназначенный для мониторинга радиационной обстановки на трассе перелета Земля-Марс, в окрестностях Марса и на поверхности Фобоса.

**Таблица 2 - Приборы для исследования внутреннего строения Фобоса**

Приборы	Исследования
Длинноволновый планетный радар, ДПР	Радиолокационное исследование поверхности и подповерхностной структуры грунта Фобоса до глубин порядка ста метров. Прибор создан в ИРЭ РАН.
Гравиметр, ГРАС-1	Исследование гравитационного поля Фобоса. Прибор создан в ИКИ РАН.
Сейсмометр, СЕЙСМО	Исследование внутреннего строения Фобоса; анализ проявления внешних импульсных воздействий и полей. Регистрация сейсмических сигналов и волновых полей Фобоса, измерение сейсмогравитационных колебаний на поверхности Фобоса. Прибор создан в ГЕОХИ РАН с участием ИФЗ РАН.

**Таблица 3 - Приборы для исследования околосолнечного пространства**

Приборы	Исследования
Плазменный комплекс, ФПМС	Изучение плазменно-волновых процессов взаимодействия солнечного ветра с марсианской плазмой. Прибор создан в ИКИ РАН с участием научных групп Украины и Швеции.
Детектор микрометеоритов, МЕТЕОР	Исследование физико-динамических параметров метеорных тел, измерение распределения метеорных тел по массе, скорости и пространственной плотности вдоль трассы перелета и вблизи Фобоса. Контроль метеорной обстановки в полете. Прибор создан в ГЕОХИ РАН.
Дозиметр, ЛЮЛИН	Мониторинг радиационной обстановки на трассе Земля – Марс, в окрестностях Марса и на поверхности Фобоса. Прибор создан в сотрудничестве ИМБП РАН и научной группой Болгарии.
<b>Небесно-механические эксперименты</b>	
Ультростабильный осциллятор, УСО	Эксперименты в области небесной механики и фундаментальной физики. Прибор создан в ИКИ РАН.
Детекторы положения звезд и Солнца, ЛИБРАЦИЯ	Измерение либрационных параметров Фобоса для изучения особенностей собственного вращения этого малого тела и определения его внутренней структуры. Прибор создан в ИКИ РАН.

Таблица 4 – Состав вспомогательных приборов

Телевизионные приборы	
Телевизионная система, ТСНН	Обеспечение посадки КА на поверхность Фобоса, выбор места посадки. Научные исследования и картографирование поверхности Фобоса. Система создана в ИКИ РАН.
Система технического зрения, Стерео и Панорамные ТВ камеры	Получение стерео и панорамного изображений поверхности, поиск и отбор образцов грунта Фобоса. Система создана в ИКИ РАН в сотрудничестве с научной группой Франции.
Приборы для обеспечения научных измерений	
Манипулятор, ГЗУ, устройство Chomik	Загрузка образцов реголита Фобоса в приемное устройство для перемещения их в возвращаемый аппарат, а также для обеспечения приборов ТДА комплекса ХМС-1Ф, ЛАЗМА, МикрОмега образцами реголита для бортовых исследований и обеспечение выполнения измерений прибором МИМОС. Манипуляторный комплекс создан в ИКИ РАН, устройство Chomik создано в Центре космических исследований Польской академии наук.
Система информационного обеспечения комплекса научной аппаратуры КНА, СИОК	Управление комплексом научной аппаратуры в полете. Система создана в ИКИ РАН.

Состав научной аппаратуры содержит также несколько вспомогательных приборов, в частности манипулятор и грунтозаборное устройство (упомянутые выше), систему технического зрения для получения панорамных и стереоизображений поверхности Фобоса в месте посадки. Кроме того, несколько ТВ-камер предназначены в основном для решения служебной задачи, связанной с навигацией и управлением космическим аппаратом при его сближении и посадке на поверхность Фобоса. Управление комплексом научной аппаратуры осуществляется с помощью специального компьютера, реализующего различные программы работы бортовых приборов, сбор и формирование информационных блоков с научными данными для передачи на Землю. Состав этих, вспомогательных приборов представлен в таблице 4.

Кроме того, в состав спускаемого аппарата проекта Фобос-Грунт включены несколько капсул с образцами различных биокультур. Этот эксперимент, БИОФОБОС, предназначен для проведения исследований с покоящимися формами биологических объектов, принадлежащих к различным таксономическим группам, в условиях длительного межпланетного перелета для решения вопросов планетарного карантина, астробиологии (проблема панспермии), результаты этого эксперимента могут быть использованы при решении медико-биологических проблем пилотируемой космонавтики. Капсулы с образцами биокультур подготовлены ИМБП РАН и Планетным обществом США.

Кроме научных исследований по программе проекта «Фобос-Грунт», планируется также выполнение совместных экспериментов, выполняемые научными приборами, установленными на КА «Фобос-Грунт» и на китайском малом спутнике Марса УН-1. Программа этих исследований использует уникальную

возможность одновременной работы двух спутников Марса. По этой программе предполагаются одновременные измерения параметров околосолнечной плазмы на двух космических аппаратах. Такие «двухточечные» измерения будут выполнены впервые и дают уникальную возможность разделить пространственные и временные эффекты в динамике околосолнечной плазмы. Кроме того, предполагается выполнение совместного российско-китайского эксперимента, зондирующего марсианскую ионосферу радиосигналами на двух частотах. Такие исследования позволят получить данные о структуре и плотности марсианской ионосферы при различных условиях освещенности (суточная зависимость).

Научная программа, выполняемая на борту космического аппарата «Фобос-Грунт», готовится под руководством научного руководителя экспедиции академика РАН Л.М. Зеленого в Институте космических исследований (ИКИ) РАН с участием Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (ИРЭ) РАН и ряда других научных организаций. В подготовке научной аппаратуры принимают участие большое число научных и промышленных организаций нашей страны, а также научных групп Германии, Китая, Франции, Украины, Швеции, Швейцарии. Кроме того, среди участников проекта ученые многих стран Европы, США, Китая.

#### Список литературы

- 1 Проект экспедиции к Фобосу / Л. М. Зеленый [ и др.] // *Астрономический Вестник*, 2010. Т. 44, № 1. С.17.
- Галимов Э. М. Научное обоснование проекта доставки грунта с Фобоса // *Астрономический Вестник*, 2010. Т. 44, № 1. С.7.

УДК 629.785

## ПЛАНИРУЕМЫЕ НАЗЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА ФОБОСА

Э.М. Галимов, Ю.А. Костицын



**ГАЛИМОВ**

**Эрик Михайлович**  
академик Российской Академии наук, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН



**КОСТИЦЫН**

**Юрий Александрович**  
доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией изотопной геохимии и геохронологии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
E-mail: kostitsyn@geokhi.ru

*В статье рассмотрены научные задачи исследований вещества Фобоса, доставка которого запланирована в рамках российской космической программы Фобос-Грунт. Показана их тесная связь с современными проблемами в науках о Земле, с исследованиями происхождения жизни. Составлен перечень наиболее очевидных на сегодняшний день исследований, которые предстоит провести в лабораторных условиях после доставки грунта на Землю, а также перечень необходимой для этого аппаратуры.*

*Ключевые слова:* Фобос; аналитические исследования; внеземное вещество.

**PLANNED GROUND STUDIES OF PHOBOS MATTER E.M. Galimov, Yu.A. Kostitsyn.**

*The article describes scientific challenges of analysis of Phobos matter, the delivery of which is planned within the framework of the Russian Phobos-Grunt space program. A close connection of the above challenges with the present-day problems in the Earth sciences and with the origin of life studies is indicated. The list of the most obvious up-to-date studies, which are to be carried out in laboratory environment after the soil delivery to the Earth, and also the list of the equipment required for that, are prepared.*

*Key words:* Phobos; analytical studies; extraterrestrial matter.

### Введение

Многие фундаментальные вопросы о строении и образовании Земли, о процессах ранней дифференциации и формировании её оболочек, о зарождении и развитии жизни, не могут быть решены только в рамках исследования земного вещества. Для их разрешения важны знания о вещественном составе и строении планет Солнечной системы, малых тел (спутников), метеоритов, межпланетных микрочастиц. На получение этих новых знаний направлены многие международные и национальные проекты, в том числе две Российские федеральные программы "Фобос-грунт" и "Луна-Глоб" и Российско-Индийская "Луна-Ресурс".

Эти проекты предполагают доставку на Землю вещества – с Фобоса, спутника Марса, и с Луны. Исследования этого вещества возложены на Российскую Академию Наук, головная организация – Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского.

Изучение грунта Фобоса важно по многим причинам. Оно позволит найти ответы на целый ряд важнейших вопросов, в частности установить, было ли протопланетное облако, в той его части, где формировались планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) однородно или гетерогенно. Правильно ли общепринятое на сегодня допущение, что первичное вещество Земли отвечает по составу углистым хондритам? Исследования изотопного и элементного состава позволят узнать, сформировались ли Марс и Фобос из единого газопылевого сгустка, или спутники планет – чужеродные тела, захваченные планетами из первоначального хаоса. Уместно ли допущение о мегаимпакте, сформировавшем Луну? Каков характер первичного органического вещества в этой области, имело ли оно отношение к зарождению жизни? Фобос крайне важен для этих исследований, прежде всего потому, что он, во-первых,

не претерпел плавления и магматической дифференциации, в отличие от планет и более крупных спутников, таких, как Луна, а во-вторых, доставленное с него вещество будет иметь точную привязку к положению в Солнечной системе, в отличие от падающих на Землю метеоритов.

Очевидно, что для проведения исследований внеземного вещества на современном уровне необходимо иметь лабораторную базу, отвечающую сегодняшним требованиям, причём сроки создания этой базы оказываются очень жёсткими с учётом того, что обычный период изготовления таких сложных приборов, как SIMS Cameca-1280, составляет 18 месяцев с момента 30%-ной предоплаты. Чтобы к 2013 году такие приборы были запущены, отъюстированы и опробованы на менее ответственных образцах, на них необходимо выделить средства до конца 2011 года. Нельзя допустить, чтобы роль России в этом проекте свелась к транспортировке грунта на Землю, а основные научные достижения по исследованию ценнейшего внеземного вещества оказались бы в активе зарубежных лабораторий.

После исследований материала Фобоса эта лабораторная база будет использоваться для выполнения последующих программ, таких как "Луна-Глоб" и др., а также для изучения на новом аналитическом уровне метеоритов, крупнейшая коллекция которых хранится в Академии Наук, в ГЕОХИ. Важной функцией этого проекта будет также воспитание и сохранение в стране научных кадров. Не секрет, что многие российские учёные, особенно молодые, уезжают работать в зарубежные лаборатории по причине их лучшей оснащённости.

## **1 ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА ФОБОСА**

Одно из важнейших направлений в науках о Земле – исследование происхождения и эволюции планет и их спутников. Чтобы лучше понять Землю, условия её формирования, эволюции, дифференциации на оболочки, образование земной коры, наконец, условия зарождения жизни – нам необходимы знания о строении и составе Солнечной системы, ближайших планет и их спутников, как они устроены сейчас и как они формировались.

Очень важную информацию мы получаем из изучения метеоритов, количество которых сейчас приближается к 20 тысячам. На этой основе в совокупности с телеметрическими данными разработаны различные модели образования планет и их спутников. Но чтобы от моделей, часто очень дискуссионных, перейти к теории, нам необходимо иметь вещество, отобранное непосредственно с их поверхности.

Поэтому важнейшая научная цель проекта Фобос-грунт – доставка на Землю образцов с поверхности Фобоса для комплексного исследования этого вещества.

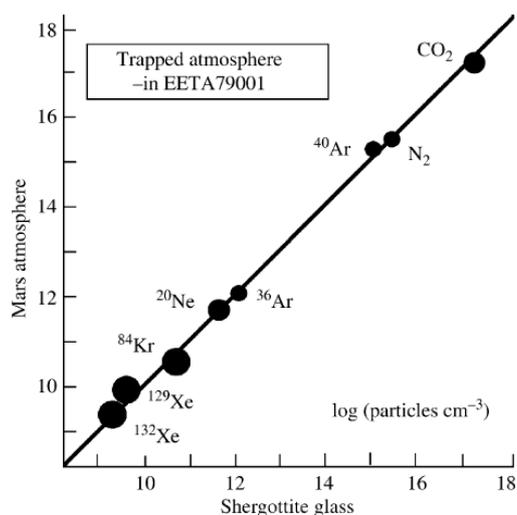
Фобос – спутник Марса – относится к категории малых тел Солнечной Системы. Это тело неправильной формы с размерами  $27 \times 22 \times 19$  км и массой  $1.082 \times 10^{14}$  г. Малая средняя плотность Фобоса,  $\sim 1.85$  г/см<sup>3</sup> означает, что либо Фобос – очень пористое тело, примерно на треть пустое, либо, что более вероятно, он наполовину состоит из льда. Поэтому есть все основания полагать, что слагающее его вещество не подверглось изменениям, связанным с эндогенной активностью, характерной для планет или их крупных спутников, таких, как Марс, Земля или Луна. Скорее всего, вещество Фобоса не претерпевало плавления и никогда не было фрагментом более крупного тела. На Фобосе могло сохраниться первичное вещество Солнечной Системы, сформированное непосредственно из газопылевого облака протосолнечной туманности и впоследствии испытавшее лишь воздействие солнечного ветра, космических частиц и импактных процессов.

Мы знаем, что американские исследователи, NASA, сейчас активно изучают Марс, регулярно посылают орбитальные и спускаемые аппараты, от которых поступает важная научная информация. Прямо сейчас у них выполняется пять самостоятельных программ, очередной запуск Mars Science Laboratory запланирован на осень 2011 года. На это расходуются большие деньги и мы, к сожалению, сейчас не в состоянии в исследовании Марса конкурировать с ними, или, если не конкурировать, то быть равноценными партнёрами. Но получение и исследование грунта с Фобоса обеспечило бы российской науке достойное место в общей картине исследований; внесло бы в неё уникальный, независимый вклад, в некоторых отношениях даже более интересный, чем исследование самого Марса. Это становится ясно даже из самого общего рассмотрения основных научных вопросов, которые могут быть решены в результате наземных исследований грунта Фобоса.

### **1.1 Имеется ли генетическая связь между Марсом и Фобосом?**

Современные гипотезы связывают происхождение Фобоса и другого спутника Марса, Деймоса, либо с захватом Марсом астероидов, либо с процессами совместного образования системы планета-спутники из газопылевого облака. У каждой из гипотез есть свои доводы "за" и "против", и разрешить эту проблему можно будет в результате исследований доставленных с Фобоса образцов грунта. Если Фобос – захваченный астероид, то его состав, скорее всего, будет близок какому-либо из известных классов обыкновенных или углистых хондритов.

Если Фобос образовался вместе с Марсом, то его состав должен быть близок к группе SNC метеоритов, материал которых, как полагают, был выбит с поверх-



**Рисунок 1. Сравнение газового состава атмосферы Марса (по данным миссии Викингов) и газовых включений в шерготите EETA79001 [1]. На основе этих и ряда других данных шерготиты, наклиты и шассиньиты (метеориты группы SNC) признаны веществом Марса, выбитым с его поверхности импактными событиями**

ности Марса импактными событиями (рисунок 1). Таким образом, исследование вещества Фобоса даст ответ на фундаментальный вопрос о том, как возникли спутники у планет в Солнечной системе. Так, если по геохимическим признакам Фобос окажется генетически близким Марсу, как это имеет место для Луны и Земли, то гипотеза совместного формирования планет и их спутников из газо-пылевого облака получит очень весомое подтверждение. Если же обнаружится несоответствие между составом Фобоса и Марса, то подтвердится гипотеза захвата, как бы ни

была мала вероятность такого события с точки зрения механики. Конечно же, в образце Фобоса необходимо будет проанализировать благородные газы.

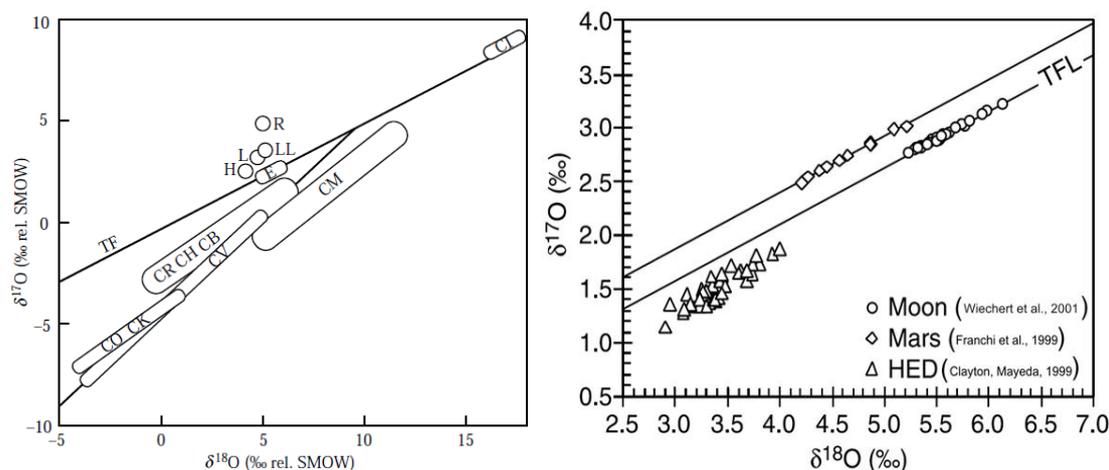
### 1.2 Совпадает ли Фобос с Марсом по изотопному составу кислорода?

Наиболее весомый ответ на вопрос о генетической связи Фобоса и Марса даст изотопный анализ кислорода, причём всех трёх изотопов. Если Фобос совпадёт по изотопному составу кислорода с SNC метеоритами, окажется с ними на единой линии фракционирования (рисунок 2) это решит сразу несколько проблем:

1. Будет окончательно доказана марсианская природа SNC.
2. Будет доказано генетическое родство Фобоса и Марса, происхождение из одного вещества.
3. Будет доказана возможность образования системы планета – спутник из единого исходного материала и опровергнута модная сейчас гипотеза мегаимпакта.

Очевидно, ответ на этот вопрос имеет прямое отношение не только к системе Фобос-Марс, но и к системе Земля-Луна. Таким образом, доставка и исследование грунта Фобоса по ожидаемому научному значению важнее получения образцов с Марса.

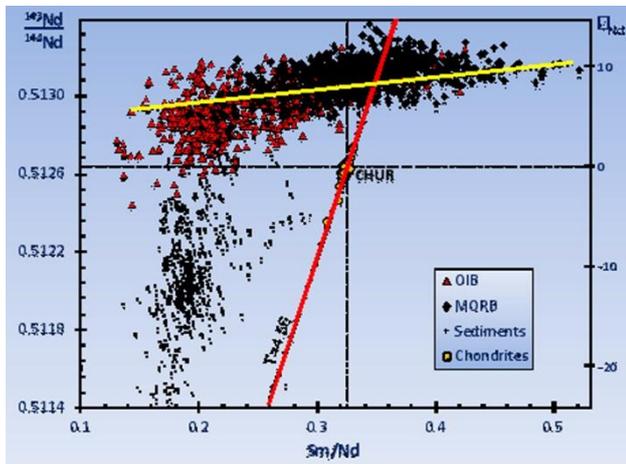
Кроме того, в хондритах наблюдается изотопная неравновесность по кислороду между минералами – они лежат на линии с единичным наклоном. Эта неравновесность возникла из-за эффекта самоэкранирования при диссоциации  $\text{CO}_2$  под действием солнечной радиации, в результате чего вода оказалась обеднена 16-м изотопом кислорода. Очень важно проверить, имеет ли место такая неравновесность в материале Фобоса. Если вода на Фобосе окажется



**Рисунок 2. Изотопный состав кислорода в породах Луны и Земли не различается по  $\Delta^{17}\text{O}$  [2–5]. Данные для Луны лежат на земной линии масс-зависимого фракционирования (TFL) изотопов с наклоном  $\approx 0.52$ . Марсианские метеориты (SNC) – выше TFL по  $\Delta^{17}\text{O}$  на 0.3‰. CAI и фрагменты углистых хондритов группируются вдоль линии с наклоном  $\approx 1$  [6]**

неравновесной с силикатами по изотопному составу кислорода, это будет означать, что планеты земной группы захватили воду после аккреции твёрдого материала, по крайней мере, часть воды. В противном случае, при полном равновесии между силикатами и водой по  $\Delta^{17}\text{O}$ , летучие были захвачены планетами непосредственно в ходе аккреции. Таким образом, это позволит решить вопрос, вода на Земле – экзотическая, или своя. Земля и Луна очень гомогенны по  $\Delta^{17}\text{O}$ , т.е. все анализы земных пород и минералов лежат на линии масс-зависимого фракционирования. Если в небуле кислород был изотопно-гетерогенен, то когда произошла эта гомогенизация на стадии аккреции или позже?

В случае доставки ожидаемого количества (100-200 г) образца будет возможен классический анализ изотопного состава кислорода в минералах с фторированием, но если вещества будет предельно мало, то единственным пригодным инструментом для анализа станет ионно-ионный зонд (SIMS) Cameca-1280.



**Рисунок 3. Зависимость изотопного отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  от  $\text{Sm}/\text{Nd}$  отношения в породах мантии Земли (MORB – базальты срединно-океанических хребтов, OIB – базальты океанических островов), земной коры (осадки) и хондритов. На этой диаграмме средний изотопный состав примитивной мантии находится вблизи точки пересечения красной линии (геохроны) и жёлтой (тренд мантийных пород). Этот состав на ~9 единиц  $\epsilon_{\text{Nd}}$  выше, чем средний состав хондритов [7]. Соответственно и среднее  $\text{Sm}/\text{Nd}$  отношение земной мантии (0.350) выше, чем у хондритов (0.325)**

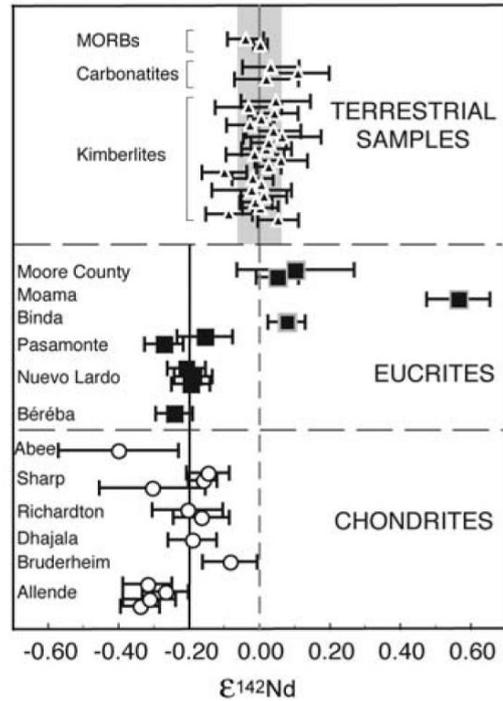
### 1.3 Примитивно ли вещество Фобоса?

В частности, отвечает ли оно по элементному и изотопному составу углистым хондритам? Ответ на этот вопрос позволит установить, было ли протопланетное облако химически гомогенным, что весьма важно для геохимии, так как мы принимаем во всех моделях эволюции земного вещества, что первичный

состав Земли отвечает углистым хондритам. Так ли это было на самом деле, позволят установить планируемые исследования образцов с Фобоса.

Исследования последних лет обнаружили систематические различия между изотопным отношением  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в хондритах и в земных мантийных породах (рисунок 3).

Эти различия изотопных отношений обусловлены различиями в величине  $\text{Sm}/\text{Nd}$  отношения земной мантии и хондритов. Причём, рисунки 4 и 5 показывают, что различия в химическом составе Земли и хондритов



**Рисунок 4. Различия в изотопном отношении  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  хондритов и земных пород [8] также указывают, что  $\text{Sm}/\text{Nd}$  отношение мантии и хондритов различны. Только в отличие от долгоживущей изотопной системы  $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$  (рисунок 3) система  $^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$ , представленная на этом рисунке, определённо указывает, что разница в  $\text{Sm}/\text{Nd}$  отношении земной мантии и хондритов возникла на самых ранних этапах формирования планет Солнечной системы**

возникли, скорее всего, на самых ранних стадиях формирования Солнечной Системы. Если в протосолнечной небуле имела место химическая гетерогенность, то результаты исследования материала Фобоса должны это показать со всей определённостью.

Поскольку вещество Фобоса вряд ли подверглось магматической дифференциации из-за малого размера и малой плотности этого тела, положение результатов  $\text{Sm}-\text{Nd}$  изотопного анализа на рисунке 3 сразу покажет, имеются ли различия в величине  $\text{Sm}/\text{Nd}$  отношения Фобоса и хондритов.

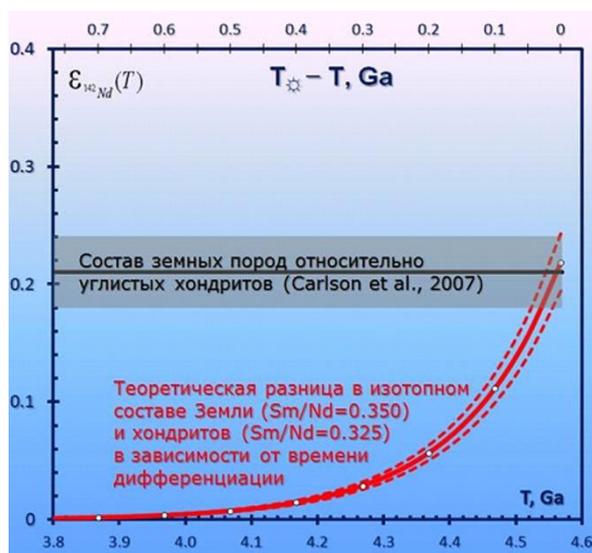


Рисунок 5. Различия в величине Sm/Nd отношения хондритов и Земли есть результат каких-то космогонических процессов, протекавших в солнечной небуле на самых ранних стадиях её эволюции. Задержка времени дифференциации хотя бы в сто миллионов лет уменьшила бы сдвиг по  $^{142}\text{Nd}$  вдвое

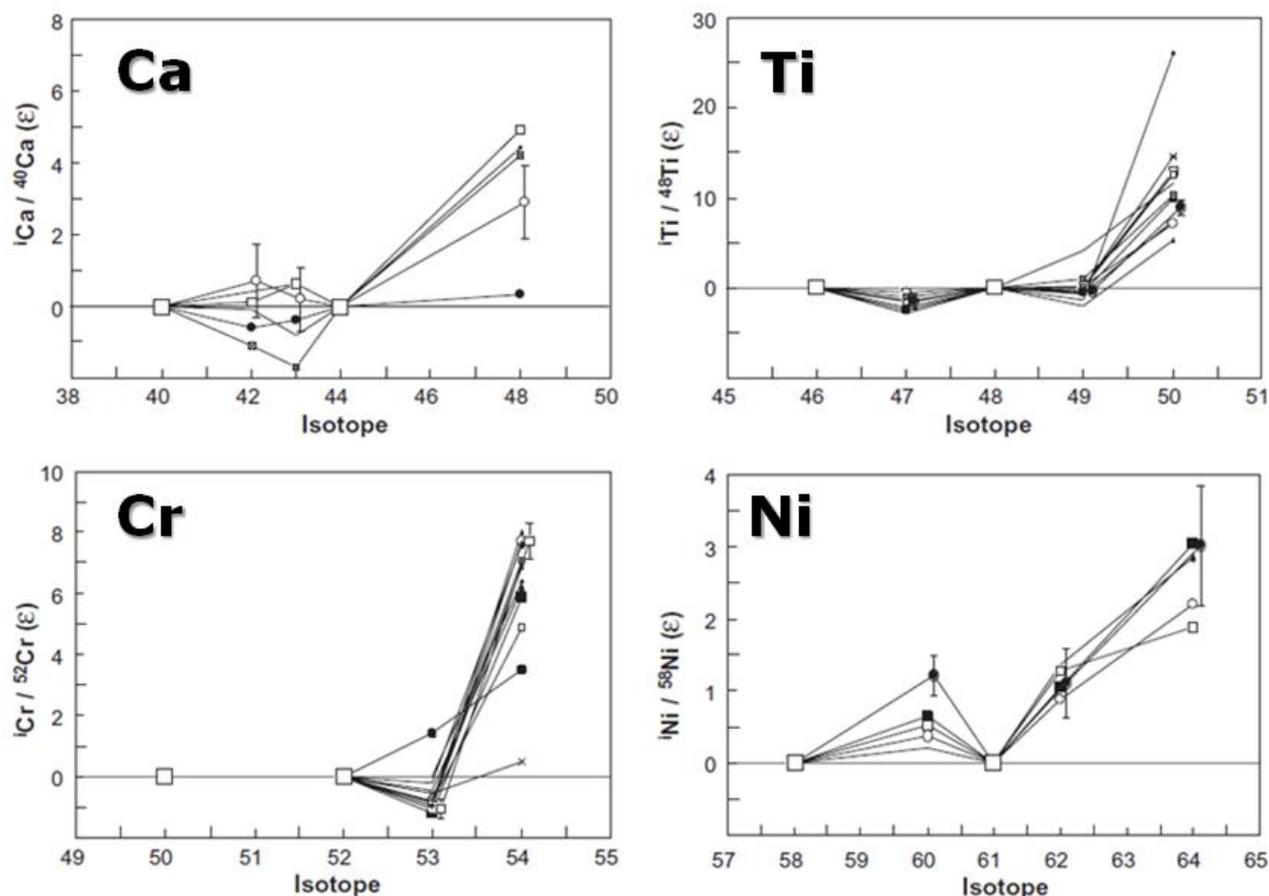


Рисунок 6. Результаты исследования изотопных аномалий в металлах Ca-Al включений метеорита Allende [9]. Максимальные аномалии наблюдаются для нейтронно-избыточных изотопов, образованных под действием потока быстрых нейтронов (r-процесс)

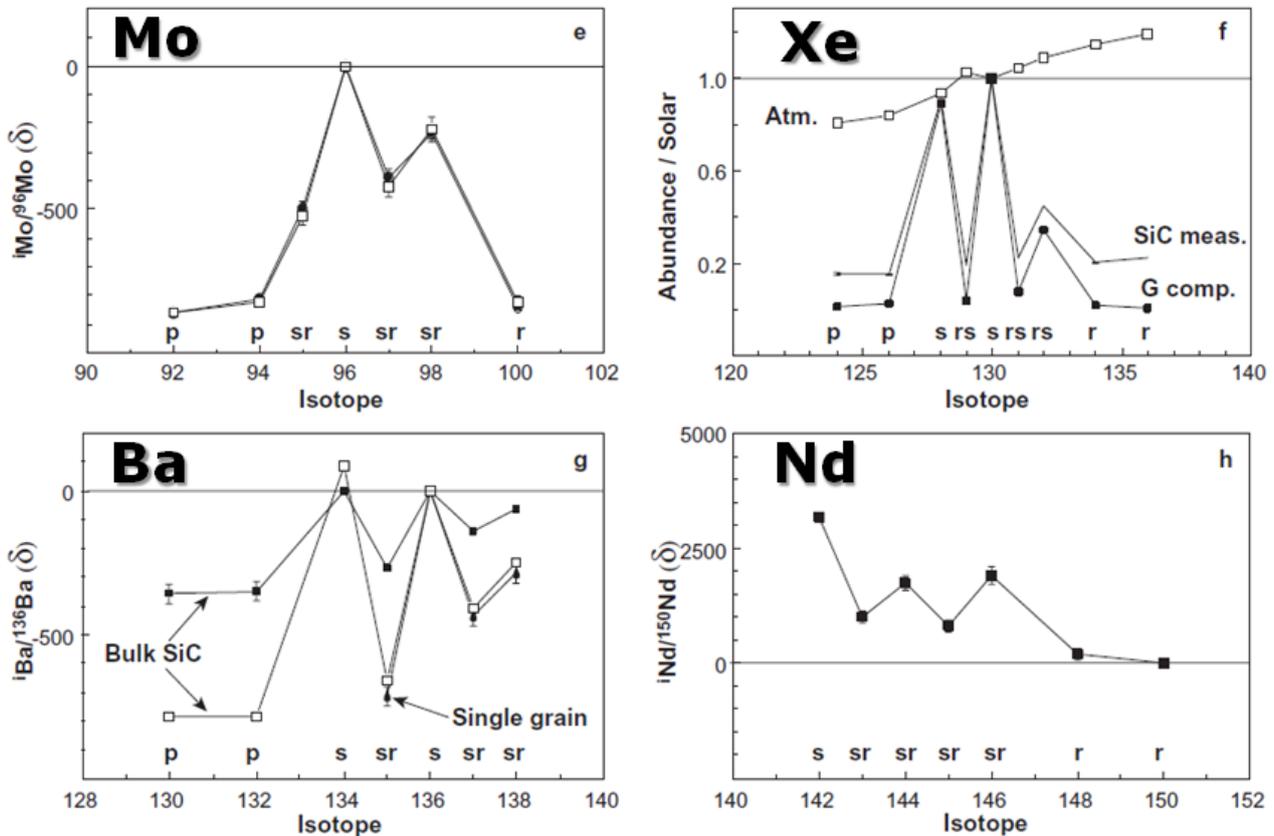


Рисунок 7. Изотопные аномалии в зёрнах SiC и графита в углистом хондрите Murchison (CM2). В них наблюдаются избыток s-изотопов и дефицит p- и g-изотопов, что указывает на формирование этих частиц в недрах звёзд [9]

#### 1.4 Содержит ли Вещество Фобоса реликтовые компоненты?

В ранних образованиях Солнечной системы максимальные вариации наблюдаются для тяжёлых, т.е. нейтронно-избыточных изотопов каждого из элементов (рисунок 6). Это характерная черта самых ранних твёрдых образований Солнечной системы, их визитная карточка, и указывает она на мощный поток нейтронов в то время. Этот поток мог быть следствием взрыва сверхновой где-то в окрестностях будущего Солнца.

Всё остальное вещество в то время было ещё в состоянии газа и имело возможность очень эффективно перемешаться, гомогенизироваться. В матрице метеоритов самых разных классов и групп мы видим те же изотопные отношения, что и на Земле. За исключением, конечно, вполне объяснимых вариаций, связанных с фракционированием изотопов и радиоактивным распадом.

Зёрна карбида кремния и графита, обнаруженные в некоторых углистых хондритах (рисунок 7) сформировались ещё до попадания в протосолнечное газопылевое облако. Здесь мы видим иной характер изотопных аномалий. Избыточная распространённость s-изотопов и дефицит g- и p-изотопов в элементах этих включений указывает на то, что они были сформирова-

ны в недрах звёзд главной последовательности, при умеренных нейтронных потоках. А потоки протонов и быстрых нейтронов на них оказали значительно меньшее влияние, чем на протосолнечное вещество.

Разные по происхождению включения (рисунки 6 и 7) имеют различный «изотопный облик» и могут быть надёжно идентифицированы, что раскроет многие фундаментальные вопросы формирования планет и их спутников. На планетах и крупных спутниках, образцы с которых нам доступны (Земля, Марс, Луна), таких включений обнаружить невозможно из-за их дифференцированности. Также, если подобные включения будут обнаружены в материале Фобоса, это будет важным свидетельством его примитивного состава.

#### 1.5 Какие процессы могли изменить вещество Фобоса?

Помимо очевидных ударных событий, грунт Фобоса подвергался облучению солнечными и галактическими частицами, которые вызывают различные ядерные превращения и, соответственно, появление изотопных аномалий. Исследование наведённой активности и продуктов распада вымерших изотопов позволит лучше понять долговременные вариации потоков солнечных и галактических лучей в районе

Марса. Эти данные, быть может, не столь важны непосредственно для наук о Земле, но они необходимы для того, чтобы мы могли отличать первичные особенности состава Фобоса от вторичных.

### 1.6 Хронология событий на Фобосе. Исследование продуктов распада долгоживущих и короткоживущих нуклидов

Изотопно-геохронологические исследования доставленного материала позволят развернуть картину формирования вещества Фобоса во времени. Детальность этой картины во многом зависит от количества доставленного вещества и его минерального состава. Необходимо будет исследовать различные долгоживущие изотопные системы (K-Ar, U-Th-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Re-Os, Lu-Hf) и короткоживущие системы (таблица 1), т.к. они различаются по степени устойчивости к возможным ударным событиям, а также по тем временным интервалам, которые они могут охарактеризовать.

В таблице 1 показаны короткоживущие нуклиды и их продукты распада, по которым они были или могут быть (нижние четыре строчки) изучены [10]. Образование этих короткоживущих изотопов связывается со взрывом сверхновой, который, как полагают, спровоцировал гравитационную нестабильность газопылевого облака и запустил процесс образования Солнца и планет. Каждая из этих пар родительских и дочерних нуклидов представляет свой интерес в зависимости от их химических свойств и периода

полураспада. Обращает на себя внимание, что исходные количества радиоактивных нуклидов очень невелики, поэтому измерение эффектов от их распада – работа очень кропотливая, нередко просто виртуозная. Для анализа благородных газов необходимы масс-спектрометры типа HELIX (Thermo) или Noblesse (Nu Instruments); для  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  системы – твердофазный масс-спектрометр Triton-PLUS; для остальных – мультиколлекторный ICP-MS типа Neptune (Thermo) или Nu-Plasma-II (Nu-Instruments), причём в комбинации с хорошим ультрафиолетовым фемтосекундным лазером. Мы должны быть готовы и к такому случаю, если доставленного вещества будет ничтожно мало и невозможно будет взять несколько десятков миллиграмм для химического разложения пробы. Тогда нужно будет уповать лишь на локальные методы анализа.

Маловероятно, чтобы на Фобосе обнаружился аномалии на  $^{26}\text{Mg}$  из-за распада  $^{26}\text{Al}$ . Скорее всего, он образовался с некоторой задержкой, когда весь алюминий уже распался. Тела, образовавшиеся в первые 2 миллиона лет, плавилась из-за тепловыделения от распада алюминия-26. А вот изотопные эффекты, связанные с более долгоживущими нуклидами –  $^{146}\text{Sm}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{182}\text{Hf}$  вполне могут дать полезную информацию о времени образования Фобоса. Система  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  также очень интересна, т.к. уже есть сведения, что распределение  $^{53}\text{Mn}$  в ранней Солнечной системе было гетерогенным (рисунок 8).

Таблица 1 Короткоживущие нуклиды в материале Солнечной системы и их продукты распада [10]

Радиоактивный (материнский) изотоп	$T_{1/2}$ , млн.лет	Дочерний изотоп	Стабильный изотоп сравнения	Первоначальная распространённость изотопа	относительная радиоактивного
$^{41}\text{Ca}$	0.1	$^{41}\text{K}$	$^{40}\text{Ca}$	$^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca} \sim 1.5 \times 10^{-8}$	
$^{36}\text{Cl}$	0.3	$^{36}\text{Ar}$	$^{35}\text{Cl}$	$^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl} \sim 10^{-4}$	
$^{26}\text{Al}$	0.74	$^{26}\text{Mg}$	$^{27}\text{Al}$	$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 5 \times 10^{-5}$	
$^{10}\text{Be}$	1.5	$^{10}\text{B}$	$^9\text{Be}$	$^{10}\text{Be}/^9\text{Be} \sim 10^{-3}$	
$^{60}\text{Fe}$	1.5	$^{60}\text{Ni}$	$^{56}\text{Fe}$	$^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} \sim (0.2-1) \times 10^{-6}$	
$^{53}\text{Mn}$	3.7	$^{53}\text{Cr}$	$^{55}\text{Mn}$	$^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn} \sim (1.4-4) \times 10^{-5}$	
$^{107}\text{Pd}$	6.5	$^{107}\text{Ag}$	$^{108}\text{Pd}$	$^{107}\text{Pd}/^{108}\text{Pd} \sim 4.5 \times 10^{-5}$	
$^{182}\text{Hf}$	9	$^{182}\text{W}$	$^{180}\text{Hf}$	$^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf} \sim 10^{-4}$	
$^{129}\text{I}$	16	$^{129}\text{Xe}$	$^{127}\text{I}$	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \sim 10^{-4}$	
$^{244}\text{Pu}$	82	Спонтанное деление		$^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U} \sim 7 \times 10^{-3}$	
$^{146}\text{Sm}$	103	$^{142}\text{Nd}$	$^{144}\text{Sm}$	$^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} \sim 5 \times 10^{-3}$	
$^7\text{Be}$	53 дня	$^7\text{Li}$	$^9\text{Be}$	$^7\text{Be}/^9\text{Be} \sim 6 \times 10^{-3}$	
$^{99}\text{Tc}$	0.21	$^{99}\text{Ru}$	$^{99}\text{Ru}$	$^{99}\text{Tc}/^{99}\text{Ru} \sim 10^{-4}$	
$^{205}\text{Pb}$	15	$^{205}\text{Tl}$	$^{204}\text{Pb}$	$^{205}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 3 \times 10^{-4}$	
$^{92}\text{Nb}$	36	$^{92}\text{Zr}$	$^{93}\text{Nb}$	$^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} \leq 2 \times 10^{-5}$	

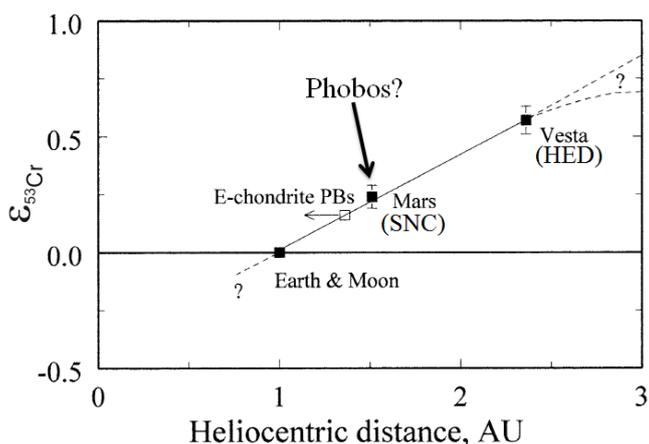


Рисунок 8. Изотопные аномалии  $^{53}\text{Cr}$  в объектах Солнечной системы в зависимости от гелиоцентрического расстояния [11]

### 1.7 Имеется ли на Фобосе органическое вещество и следы АТФ?

Спектр отражения поверхности Фобоса допускает присутствие органических соединений в его составе. Поэтому весьма вероятно, что ответ на это вопрос будет положительным, его лучше сформулировать так: какое органическое вещество присутствует на Фобосе; как оно соотносится с Земным, с органикой, изученной в хондритах; каков изотопный состав элементов, слагающих органическое вещество? Была ли эта органика в изотопном равновесии с силикатным

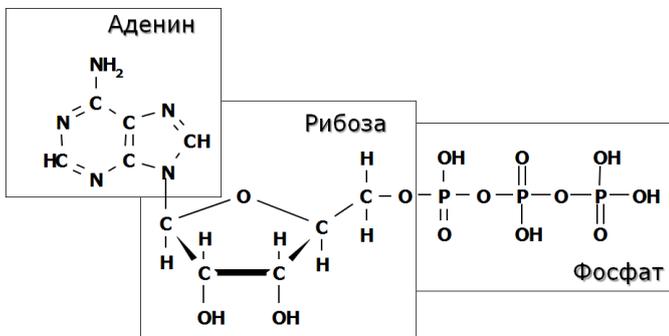


Рисунок 9. Структура аденозинтрифосфата, возможного катализатора при формировании первых биологически важных органических соединений на Земле [12]

веществом Фобоса? Насколько сложными будут органические соединения Фобоса? Также существенно, что это ближайший к нам недифференцированный объект, возможно, с первичной органикой. Очень много органического углерода содержат кометы (до четверти массы), но они приходят издалека, с периферии Солнечной Системы, углистые хондриты – тоже формировались дальше от Солнца, а Фобос – гораздо более близкий сосед, и его набор органических соединений может дать лучшее представление

о том, что было в самом начале на Земле, какова роль космической органики в зарождении жизни.

Все эти вопросы крайне важны для понимания эволюции органических соединений Солнечной Системы и для того, чтобы понять, из какого бульона и как возникла жизнь на Земле.

Так же важно проверить присутствие на Фобосе аденозинтрифосфата (АТФ), его предшественников (аденина, рибозы) или, напротив, продуктов разрушения (рисунок 9). Весьма вероятно, что АТФ была катализатором в формировании первых биологически важных органических соединений на Земле, и её обнаружение на Фобосе было бы крайне важным для понимания путей зарождения жизни на Земле [12].

## 2 ОБЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ НАЗЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТА ФОБОСА

Ожидается, что доставленное вещество может быть в виде тонкого порошка (реголита), а также в виде небольших обломков горных пород в количестве не более 100 – 200 г. Однако надо быть готовыми и к случаю, если будет доставлено минимальное количество вещества, вплоть до нескольких зёрен.

Решением Президиума РАН руководство наземными исследованиями доставленного грунта и их общая организация возложена на ГЕОХИ РАН и персонально на академика Э.М. Галимова. Эта работа включает в себя, в частности, организацию рабочих групп по различным направлениям исследований, в которые могут привлекаться не только исследователи из институтов Российской Академии Наук, но и из других российских и зарубежных научных заведений. При этом приоритетной задачей нужно считать проведение как можно большей доли исследований силами российских учёных.

Содержание многих литофильных элементов-примесей в грунте Фобоса ожидается намного ниже, чем в земных породах, что характерно для внеземного вещества, поэтому требования к проведению элементного и, особенно, изотопного анализа оказываются гораздо более жёсткими, чем при любом другом рядовом исследовании. Для анализа будет доступно предельно ограниченное количество вещества, и эти ограничения будут более жёсткими, чем даже при изучении лунных и метеоритных образцов. Всё это определяет необходимость чёткого предварительного планирования последовательности аналитических работ, тщательного распределения вещества по видам исследования с сохранением необходимого резерва.

Первая и важнейшая составляющая всей процедуры исследования грунта Фобоса – его безопасное длительное хранение, исключающее контаминацию веществом Земли (пылью, атмосферными газами и пр.). Поэтому необходимо спроектировать и изготовить приёмное оборудование с учётом имеющегося в ГЕОХИ РАН опыта обработки и хранения лунного грунта.

### 3 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТА ФОБОСА

Исследование минерального, химического и изотопного состава вещества, доставленного с Фобоса, позволит ответить на многие вопросы об образовании и эволюции Солнечной системы, об условиях зарождения жизни. По видам аналитических работ эти исследования, с некоторой долей условности, можно разделить на несколько групп.

#### 3.1 Первичные физические и петрографо-минералогические исследования

Эти исследования включают в себя предварительную диагностику вещества, оценку его массы, физического состояния, гранулометрических характеристик, фазового состава. Возможность и целесообразность проведения тех или иных видов детальных исследований образцов в целом и их отдельных минеральных фаз будет определяться этими первичными исследованиями. Основные методы исследования на этом этапе – оптическая микроскопия и рентгеновская дифрактометрия для надёжной идентификации фаз. Для идентификации и исследования минеральных выделений размером порядка 1 мкм и менее необходимо применение сканирующего электронного микроскопа с энерго-дисперсионным детектором (EDS) и детектором дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD). Электронный микроскоп в такой конфигурации позволяет проводить быстрый поиск мельчайших минеральных фаз, определять их структуру и состав в отношении главных элементов.

Подготовка проб к различным видам анализа для такого уникального материала должна осуществляться с особенной тщательностью. Такие процедуры, как изготовление шлифов, аншлифов, выделение отдельных минералов для специальных исследований, в том числе для поиска досолнечных частиц, будут проводиться в основном вручную и наиболее опытными специалистами в этой области. В случае доставки ожидаемого (100 – 200 г) количества образцов часть вещества необходимо будет разделить на минеральные фракции для их индивидуального анализа, что особенно важно для различных видов изотопно-геохронологических исследований. Механическое дробление образцов, при котором значительная и непредставительная часть материала превращается в пыль, в данном случае недопустимо. Для деликатного разделения образцов на отдельные минеральные зёрна по их границам, по естественным трещинам и прочим дефектам необходимо использовать электроимпульсный селективный фрагментатор selfFrag-Lab, изобретённый более 30 лет назад в СССР в объединении "Механобр" и выпускаемый

теперь в Швейцарии фирмой selfFrag AG. Этот прибор практически исключает передрабывания образцов, т.е. образования большого количества пылевой фракции, которое неизбежно происходит при механическом дроблении твёрдых образцов всевозможной природы.

#### 3.2 Элементный анализ

Это очень широкая группа исследований, направленных на определение содержания главных элементов и примесей. Полученные данные позволят установить степень дифференцированности вещества Фобоса, связь с другими типами внеземного вещества. В целом задача перед этим видом исследования состоит в определении как можно большего числа элементов в доставленных образцах и в отдельных минеральных фазах. Поскольку поведение большинства элементов в различных природных процессах изучено достаточно хорошо, сведения о содержании каждого элемента будут весьма полезны для расшифровки истории формирования и эволюции Фобоса.

Элементный анализ реально будет представлять широкий набор различных видов и методов исследования, которые можно разделить на локальные методы (микрозонд, просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализатором, лазерная абляция с ICP-MS, масс-спектрометрия вторичных ионов) и методы, требующие приготовления порошковых проб (РФА, ИНАА), растворения в кислотах (ICP-MS, ICP-AES, AAS), дробления или нагревания в вакууме небольших навесок образцов до состояния плавления (масс-спектрометрия благородных газов). Возможность применения деструктивных методов анализа будет определяться количеством доставленного вещества. Аналитические возможности многих методов в значительной мере перекрываются, однако у каждого из них есть свои устоявшиеся области применения, обусловленные определёнными преимуществами при анализе тех или иных элементов и их групп.

- Сканирующий электронный микроскоп необходим в качестве первого шага неразрушающей диагностики минералов (в виде реголита, мелких зёрен, пыли...). Низковакуумный вариант такого прибора не требует никакой предварительной подготовки пробы, в том числе и проводящего напыления (углерод, золото). Он позволяет оценивать морфологию и элементный состав отдельных зёрен и их взаимосвязь и, при наличии манипулятора, извлечь зерно размером несколько микрон для более детального исследования.

- Просвечивающая электронная микроскопия предназначена для высоколокальных комплексных исследований малых количеств вещества, обеспечивает структурный и количественный элементный анализ в диапазоне от бора до урана при содержании

элемента 0.п% и выше с участка образца размером около 5 нанометров. Современные приборы оснащены комплексом программного обеспечения для обработки, расчёта и моделирования структур и визуализации атомных мотивов; содержат базу эталонных структур минералов и синтетических фаз. Подготовка проб к этому анализу осуществляется приготовлением ультратонких срезов сначала механическим способом, затем методом ионного утонения либо диспергированием вещества с помощью ультразвука.

- Локальные исследования с помощью микрозонда позволяют определять элементный состав от В до U с чувствительностью ~0.п% и менее в точке размером несколько микрон; исследовать вариации состава в пределах минеральных зёрен; исследовать распределение элементов по площади. Для исследования необходимо приготовить аншлиф, после этого анализ можно считать неразрушающим.

- Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) позволяет определять содержание широкого круга элементов-примесей из растворов с чувствительностью анализа на уровне  $10^{-9}$  г/г. Для проведения анализа достаточно растворить в кислотах несколько миллиграмм образца. Имеются трудности в определении некоторых элементов из-за взаимных наложений в масс-спектре или наложений аргона и его соединений (Ca, Fe, V и др.). В сочетании с методом изотопного разбавления рассматриваемый метод не имеет конкурентов по чувствительности и точности анализа таких "трудных" элементов, как платиноиды, рений и др.

- Лазерная абляция в тандеме с ICP-MS позволяет проводить локальный анализ вещества с чувствительностью порядка  $10^{-7}$  г/г. В настоящее время этот метод бурно развивается и по ряду направлений составляет конкуренцию более дорогим методам масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) в части элементного и некоторых видов изотопного анализа. Так же, как и при ICP-MS анализе растворов, для некоторых элементов имеются ограничения, связанные со спектральными наложениями. Строго говоря, этот метод является деструктивным, т.к. вещество лазером испаряется, однако масса сжигаемого вещества в единичном анализе обычно не превышает 1 мкг.

- Масс-спектрометрия вторичных ионов (SIMS) на приборах высокого разрешения (SHRIMP или Cameca-1280) применяется в первую очередь для изотопных исследований (см. ниже), однако всё чаще используется и для элементного анализа. В этом виде анализа расходуется на порядок меньшее количество вещества, чем при лазерной абляции, что может оказаться критичным при исследовании минералов Фобоса.

- Масс-спектральные исследования распределения благородных газов чрезвычайно важны при исследовании грунта Фобоса, т.к. хондриты и SNC ме-

теориты имеют характерные различия, и именно на основании распределения благородных газов было выдвинуто предположение, что шерготиты, наклиты и шассиниты имеют марсианское происхождение. Такие анализы проводят с помощью масс-спектрометров, специально сконструированных для исследования благородных газов – HELIX и ARGUS.

- Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) традиционно используется как диагностический метод при исследовании метеоритного вещества, особенно для определения сидерофильных и халькофильных элементов.

- Оптическая (атомно-эмиссионная) спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) позволяет определять содержание широкого круга элементов-примесей из растворов с чувствительностью анализа на уровне  $10^{-7}$  г/г твёрдой породы. Для анализа необходимо растворить в кислотах 10-20 мг образца. Из-за спектральных наложений не все элементы могут быть надёжно определены без обогащения, которое также используется и при анализе малораспространённых элементов. Этот метод хорошо дополняет ICP-MS и нейтронно-активационный анализ для того, чтобы круг определяемых элементов был наиболее полным.

- Рентгено-флюоресцентный анализ (РФА) – определение состава в отношении главных элементов и примесей с относительно высокой распространённостью (0.0п% и выше). Метод может найти применение в случае, если количество доставленного материала позволит приготовить таблетку из ~3 г мелко истёртого материала.

- Спектральный анализ позволяет определять фтор, хлор, серу, фосфор, бор и другие анионы и катионы, легколетучие и с высоким потенциалом возбуждения из навесок в первые миллиграммы.

### 3.3 Изотопные исследования

Эти виды исследования удобно разделить на группы по типам изотопных эффектов: вариации стабильных изотопов, распад долгоживущих радиоактивных изотопов, распад первичных (т.е. ровесников Солнечной системы) короткоживущих изотопов, распад наведённых космогенных радиоактивных изотопов. Каждый из этих видов исследований даст свою информацию о различных процессах, протекавших в разное время в Солнечной системе.

Исследования вариаций в составе стабильных изотопов (H, C, O, S, Fe, Cu, Mo) играют ключевую роль в расшифровке процессов, потенциально связанных с фракционированием вещества – конденсация/испарение, плавление/кристаллизация – как в локальном масштабе, т.е. в пределах Фобоса, в системе Марс-Фобос, так и в масштабе Солнечной системы. Для исследования вариаций D/H,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,

$^{18}\text{O}/^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  используют масс-спектрометры с газовым источником (MAT-253) и соответствующие системы пробоподготовки, т.е. выделения нужного элемента (соединения) в виде, пригодном для изотопного анализа. Для изотопного анализа железа, а также многих других элементов, необходим многоколлекторный масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой (MC-ICP-MS) типа Neptune или NU-Plasma. Фракционирование изотопов железа наиболее заметно при низкотемпературных поверхностных процессах с участием воды и в процессах разделения вещества на силикатную и металлическую фазы. Для этих исследований очень важным будет выделение минеральных фракций и их индивидуального анализа.

• Как уже отмечалось, ключевую роль в установлении родственных связей Фобоса с другими объектами Солнечной Системы должен сыграть изотопный анализ кислорода, определение всех трёх его изотопов. Исследование представительной порошковой пробы размером порядка 1 мг производится путём лазерного фторирования образца с последующей очисткой кислорода и его изотопным анализом в масс-спектрометре с газовым источником (MAT-253). Такой анализ даёт наиболее точные результаты с погрешностью на уровне 0.0n %. Локальный изотопный анализ кислорода может быть выполнен с помощью масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS). При этом виде анализа практически не расходуется образец, но погрешности измерений заметно больше, около 0.1-0.3 % на приборе Cameca-1280 и 0.3-0.6% на SHRIMP-II. Различия по  $\Delta^{17}\text{O}$  между земным кислородом и SNC метеоритами составляет 0.3 %. Это означает, что весьма желательно провести изотопный анализ кислорода по классической схеме с максимально достижимой точностью. Однако, в случае доставки предельно малого количества вещества, локальный неразрушающий анализ может оказаться единственной возможностью получить достоверный результат. Тогда для достижения приемлемой погрешности анализа придётся наращивать статистику.

• Анализ изотопных систем с долгоживущими материнскими нуклидами ( $^{238,235}\text{U}$ - $^{206,207}\text{Pb}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$ ,  $^{176}\text{Lu}$ - $^{176}\text{Hf}$ ,  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$ ,  $^{190}\text{Pt}$ - $^{186}\text{Os}$ ) в минералах позволит установить возраст пород Фобоса, а также время возможных преобразований вследствие, например, ударных процессов. Разные изотопные системы имеют различную устойчивость по отношению к различным событиям в соответствии с геохимическими свойствами входящих в эти пары элементов. Поэтому для получения достоверной истории формирования и эволюции вещества Фобоса необходимо исследовать разные изотопные

системы. Для исследования U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, Re-Os систем используют мультиколлекторный твердофазный масс-спектрометр TRITON. Для Lu-Hf анализа необходим мультиколлекторный ICP-MS спектрометр Neptune, на котором также можно определять калий для анализа K-Ar системы. Анализ аргона требует специального газового масс-спектрометра ARGUS с соответствующей системой выделения.

• Исследование изотопных систем с короткоживущими материнскими нуклидами ( $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{182}\text{Hf}$ - $^{182}\text{W}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{129}\text{I}$ - $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ - $^{136}\text{Xe}$  и др.) позволит расшифровать наиболее ранние процессы формирования и эволюции вещества Фобоса, протекавшие ещё во время распада этих короткоживущих изотопов. В данном случае исследованию подлежат продукты распада вымерших материнских изотопов. Так, например, наличие изотопных аномалий  $^{26}\text{Mg}$  в различных минералах покажет, что Фобос был сформирован в первые миллионы лет существования Солнечной системы, т.к. период полураспада  $^{26}\text{Al}$  составляет всего 0.72 млн.лет, а аномалии на  $^{182}\text{W}$  несут важнейшую информацию о времени и самом факте дифференциации первичного вещества на силикатную и металлическую составляющие. Для проведения этих исследований также необходимы уже упоминавшиеся выше мультиколлекторный ICP-MS спектрометр Neptune и газовый масс-спектрометр ARGUS.

• Исследование изотопного состава основных и примесных химических элементов (Si, C, N, Al, Ti и др.) в индивидуальных зёрнах реликтов протопланетного вещества (например, SiC, графит) необходимо для решения проблемы происхождения и эволюции вещества Солнечной системы. Аномальный изотопный состав этих элементов позволяет определить нуклеогенные процессы, ответственные за их образование и, тем самым, идентифицировать астрофизические источники вещества Солнечной системы. Реликты протопланетного вещества содержатся в наиболее примитивных объектах Солнечной системы, а именно, в метеоритах. Перспективным источником их могут быть также астероиды и спутники планет, в частности, Фобос. В ГЕОХИ разработаны и используются применительно к метеоритам основные методики выделения межзвёздных реликтов, например, наноалмаза и SiC, основанные либо на химическом травлении вещества, либо на физической сепарации. Для проведения этих исследований необходим NanoSIMS-50L, обладающий гораздо большей локальностью, чем SIMS Cameca-1280 – доли микрона – хотя и сильно уступающий последнему по точности анализа. Однако ожидаемые изотопные аномалии в досолнечных частицах вполне отвечают возможностям этого прибора.

• Гамма-спектрометрические исследования распределения по глубине колонки грунта космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада:  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{26}\text{Al}$ , в том числе и долгоживущих K, U, Th, а также трековые исследования позволят расшифровать историю грунта (накопление, перемешивание) и долговременные вариации потоков солнечных и галактических космических лучей в районе Марса.

### **3.4 Исследования органического вещества**

Спектр отражения поверхности Фобоса допускает присутствие органических соединений в его составе. Исследования органического вещества, хотя и связаны тесно с элементным и изотопным анализом, вынесены в отдельный раздел в силу особой важности и специфики планируемых работ. Выяснение состава органических веществ, в том числе выявление предбиологических соединений, таких, как аминокислоты, нуклеиновые основания, имело бы большое значение для решения вопроса о зарождении жизни в Солнечной системе.

• Изотопные исследования органического вещества (H, C, O, S) и отдельных его фракций. В первом приближении это могут быть сравнительно простые приборы: CHNS/O-анализатор типа Perkin Elmer 2400, ИК-фурье спектрометр типа Nicolet, ГЖХ-МС.

• В случае анализа сложнополимеризованного вещества типа керогена потребуется применение химических методов деструкции с последующим использованием пиролитической обработки и анализом на приборах типа Puy GC-МС и GCTC-IRMS.

• Анализ индивидуальных соединений требует разработки соответствующих методов экстракции с последующим анализом на высоко разрешающей масс-спектрометрической аппаратуре.

• В своё время в ГЕОХИ [13] была разработана теория внутримолекулярных изотопных эффектов. В настоящее время имеются высоко разрешающие приборы, предназначенные для анализа внутримолекулярного фракционирования изотопов углерода (GC-Puy-IRMS).

• Для решения проблемы происхождения жизни важны идентификация и анализ органических соединений, которые могли иметь предбиологическое значение: аминокислот, органических кислот, нуклеиновых оснований, предшественников АТФ. Такой анализ позволяют провести современные масс-спектрометры и ЯМР-спектрометры высокого разрешения.

Перечисленные выше виды анализа не охватывают всех направлений исследования вещества, которые необходимо будет применить к образцам, доставленным с Фобоса. Предполагается широкое международное участие в исследовании вещества. Многие дополнительные вопросы и вытекающие из них задачи возникнут по мере исследования и накопления информа-

ции о составе и происхождении этого спутника Марса. Тем не менее, планируемые сегодня исследования позволят ответить на наиболее важные вопросы, которые можно сформулировать сегодня, опираясь на современный уровень наших знаний: из какого вещества состоит Фобос, как и когда он образовался, есть ли на нём вода и органическое вещество, насколько оно зрелое с точки зрения зарождения жизни. Ответы на эти вопросы позволят лучше понять процессы формирования других планет Солнечной системы, в частности, Земли и Луны, возможные условия возникновения жизни.

### **3.5 Аппаратурное обеспечение исследований**

Очевидно, что для проведения исследований внеземного вещества на современном уровне необходимо иметь лабораторную базу, отвечающую требованиям 2013 года, когда ожидается доставка образца на Землю. К сожалению, организации Российской Академии Наук, в силу известных причин, в последние десятилетия финансировались крайне скудно и серьёзно отстали от общемирового уровня в плане инструментального оснащения. Сегодня в России нет ни одной лаборатории, ни одного института, которые были бы способны провести необходимые комплексные исследования минерального, химического и изотопного состава внеземного вещества на уровне, отвечающем требованиям современной науки. И даже объединение усилий всех институтов РАН не позволило бы провести исследования лунного грунта или грунта Фобоса с достаточной полнотой и достоверностью, чтобы ответить на поставленные выше вопросы. В порядке подготовки наземных исследований по программе Фобос-грунт проводился опрос директоров ряда институтов, круг задач которых и направления исследований (геохимия, в т.ч. изотопная, минералогия, петрология) подразумевают проведение анализа вещества. Полученные ответы показывают весьма низкий уровень аналитических возможностей Академии Наук в сравнении с тем, который достигнут сейчас в мире в области исследования внеземного вещества. Это положение вещей, конечно, нельзя ставить в вину ни руководству институтов, ни руководству Академии, но его необходимо срочно исправлять.

Научный центр для анализа внеземного вещества должен быть оснащён следующим современным исследовательским оборудованием (указаны только наиболее важные и дорогостоящие аналитические приборы и системы):

• Ионно-ионный зонд высокого разрешения SIMS Cameca-1280 для проведения изотопного и элементного анализа микрочастиц с локальностью в 15-20 мкм.

• NanoSIMS NS-50L с 7 коллекторами, Cs и O ионными источниками, детектором вторичных элект-

тронов для исследования межзвёздных реликтов (SiC, наноалмаз) в матричном веществе, что позволит идентифицировать астрофизические источники, внёсшие вклад в формирование вещества Фобоса.

- Газовый масс-спектрометр MAT-253 с системой фторирования для прецизионного изотопного анализа кислорода.

- Газовый масс-спектрометр MAT-253 в паре с хроматографом для выделения и изотопного анализа органического вещества.

- Масс-спектрометр HELIX для изотопного и элементного анализа благородных газов с системой их выделения и очистки.

- Масс-спектрометр ARGUS для изотопного анализа аргона и K-Ar геохронологии с системой выделения очистки и изотопного разбавления.

- Мультиколлекторный ICP-MS Neptune для изотопного анализа широкого круга элементов из подготовленных растворённых препаратов, в том числе тех, которые сегодня ещё называются "нетрадиционными" (Fe, Ti, Cu, Hg, Zn, Mo и др.).

- Мультиколлекторный ICP-MS Neptune в паре с фемтосекундным лазером для локального изотопного анализа широкого круга элементов in situ.

- Одноколлекторный ICP-MS Element-XR для элементного анализа вещества из растворённых препаратов на широкий круг элементов.

- Одноколлекторный ICP-MS Element-XR в паре с фемтосекундным лазером для локального элементного анализа широкого круга элементов in situ.

- Мультиколлекторный твердофазный масс-спектрометр Triton Plus для исследования Rb-Sr, U-Th-Pb, Sm-Nd изотопных систем.

- Мультиколлекторный твердофазный масс-спектрометр Triton Plus для исследования Re-Os изотопной системы.

- Сканирующий низковакуумный электронный микроскоп для диагностики и исследования структуры минералов.

- Просвечивающий электронный микроскоп типа JEM-2100 с системой подготовки срезов, системой ионного утонения, микродифракции с прецессией и детектором отражённых ионов.

- Микрозонд для локального определения состава вещества.

- Низкофоновая гамма-спектрометрическая установка с детектором из сверхчистого Ge с активной и пассивной защитой и многоканальным анализатором импульсов (Canberra) для измерения радиоактивности внеземного вещества для изучения радиационной истории внеземного вещества.

- Рентгено-флюоресцентный анализатор для определения состава макрообразцов в отношении главных элементов.

- Необходимо оборудовать охраняемое хранилище уникальных образцов внеземного вещества.

- Для каждого прибора необходимо оборудовать лабораторные помещения, а также лабораторные помещения пробоподготовки класса 10000 с отдельными рабочими зонами класса 100, в том числе три чистых помещения – коррозионностойкие, для работы с кислотами.

- Электроимпульсный селективный фрагментатор selFrag-Lab для деликатной сепарации образцов на минеральные фракции с минимальным разрушением минеральных зёрен.

Представляется, что перечисленное выше оборудование должно заблаговременно поступить в исследовательские организации соответствующего профиля, прежде всего в институты Российской Академии Наук. Организации, участвующие в этих исследованиях, необходимо объединить в консорциум, координация усилий которых, возложена на ГЕОХИ РАН.

### Заключение

Идея о доставке на Землю образца Фобоса для исследования в лабораторных условиях обсуждается уже давно, с начала 90-х годов и сейчас мы как никогда близки к её реализации. В контексте предстоящих исследований Фобос – это не далёкий астрономический объект, а часть Солнечной системы, в которую входит и Земля. Вещество Фобоса позволит расшифровать историю образования и эволюции Земли, получить многие стартовые параметры этой истории. Исследование вещества Фобоса, в случае успешного завершения космической экспедиции «Фобос-Грунт», безусловно, явится крупным шагом в понимании процессов образования планет Солнечной системы и условий возникновения жизни.

### Список литературы

- 1 Treiman A. H., Gleason J. D., Bogard D. D. The SNC Meteorites Are from Mars // *Planetary and Space Science*, 2000. 48 (12-14). P. 1213-1230.

- 2 Clayton R. N., Mayeda T. K. Oxygen isotope studies of achondrites. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996. 60 (11). P. 1999-2017.

- 3 The Oxygen-Isotopic Composition of Earth and Mars / I. A. Franchi [et al.] // *Meteoritics & Planetary Science*, 1999. 34 (4). P. 657-661.

- 4 Oxygen isotopes and the Moon-Forming giant impact / U. Wiechert [et al.] // *Science*. 2001. 294: 345-348.

- 5 Oxygen isotope constraints on the origin and differentiation of the Moon / M. J. Spicuzza // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. 253. P. 254-265.

- 6 Clayton R. N. *Oxygen Isotopes in Meteorites, Meteorites, Comets and Planets*, 2003. A. M. Davis, Elsevier Ltd. 1. P. 129-142. Костицын Ю. А. Sm-Nd и

- LuHf изотопные системы Земли: отвечают ли они хондритам? // Петрология, 2004. 12. P. 451-466.
- 7 Boyet M., Carlson R. W.  $^{142}\text{Nd}$  Evidence for Early ( $>4.53$  Ga) Global Differentiation of the Silicate Earth. // *Science*, 2005. 309. P. 576-571.
- 8 Birck J. L. An Overview of Isotopic Anomalies in Extraterrestrial Materials and Their Nucleosynthetic Heritage. *Geochemistry of non-traditional stable isotopes*. 2004. C. M. Johnson, B. I. Beard and F. Albarède. Washington, DC, Mineralogical Society of America. P. 25-64.
- 9 Goswami J. N., Marhas K. K., Chaussidon M. Origin of Short-lived Radionuclides in the Early Solar System. *Chondrites and the Protoplanetary Disk*. 2005. A. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth. P. 485-514.
- 10 Shukolyukov A., Lugmair G. W. Manganese-chromium isotope systematics of enstatite meteorites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004. 68 (13). P. 2875-2888.
- 11 Галимов Э. М. Феномен жизни. Между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. М.: Едиториал УРСС, 2011.
- 12 Галимов Э. М. Биологическое фракционирование изотопов. М.: Наука, 1984.

УДК 629.78.001.5 «Фобос-Грунт»

## КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «ФОБОС-ГРУНТ» - ОСНОВА ПЕРСПЕКТИВНЫХ РОССИЙСКИХ ПЛАНЕТНЫХ ЭКСПЕДИЦИЙ

*М.Я. Маров*



**МАРОВ**

**Михаил Яковлевич**

академик РАН,  
заведующий отделом Института  
геологии и аналитической химии  
им. В.И. Вернадского  
Российской Академии наук  
E-mail: marovmail@yandex.ru

*В статье отмечается уникальность проекта «Фобос-Грунт», предназначенного для исследований на поверхности спутника Марса Фобоса и в околомарсианском пространстве.*

*Ключевые слова: проект «Фобос-Грунт»; дистанционные исследования; забор и доставка образцов пород.*

**«PHOBOS-GRUNT» SC IS THE BASIS FOR ADVANCED RUSSIAN PLANETARY MISSIONS**  
**M.Y. Marov.**

*The article emphasizes uniqueness of «Phobos-Grunt» mission, aimed at research of Phobos surface and near-Mars space.*

*Key words: «Phobos-Grunt» mission; remote studies; soil sampling and delivery.*

Основой современной стратегии в исследованиях дальнего космоса служит создание высокотехнологичных и, вместе с тем, доступных с учетом бюджетных ограничений, космических аппаратов для решения актуальных научных задач. Проект «Фобос-Грунт», предназначенный для забора образцов пород с поверхности спутника Марса Фобоса и доставки их на Землю и одновременно проведения комплекса исследований на самом Фобосе и окружающей космической среде, полностью отвечает этим критериям. Данный проект – первая после длительного перерыва российская планетная миссия с использованием космического аппарата нового поколения, существенно отличающегося от его предшественников. Реализуемость проекта достигается за счет использования передовых технологий и носителей среднего класса.

Проект призван, в первую очередь, решить важную научную задачу современной космохимии – изучение в земных лабораториях первичного вещества, не сильно модифицированного в процессе эволюции Солнечной системы. Предусмотрена также обширная программа прямых и дистанционных

исследований на поверхности Фобоса и в околомарсианском пространстве при помощи комплекса бортовых научных приборов. Одновременно проект должен продемонстрировать высокую эффективность заложенных оригинальных технических решений при разработке базового космического аппарата. Создание такого космического аппарата и его летные испытания при реализации проекта «Фобос-Грунт» открывают перспективы осуществления долгосрочной программы космических исследований планет и малых тел Солнечной системы и решения широкого круга других научных и прикладных задач.

Исторически нашей стране принадлежит выдающаяся роль в исследованиях Солнечной системы, отмеченная пионерскими достижениями в период 1960-1980 гг. в изучении Луны, планет земной группы – Венеры, Марса и кометы Галлея, с использованием автоматических космических аппаратов. К сожалению, ситуация резко изменилась в последующие годы, особенно в постперестроечный период, когда было резко сокращено финансирование работ по космосу. Так, не была полностью выполнена программа полета в 1989 г. двух космических аппаратов

(КА) к Фобосу. Тем не менее, дистанционные измерения при помощи бортовых фотометров дали определенные сведения о свойствах поверхности (реголита) этого небесного тела [1; 2]. Катастрофические последствия для отечественной программы планетных исследований имел неудачный запуск «Марс-96» в 1996 г., КА не вышел на расчетную орбиту из-за отказа разгонного блока ракеты-носителя. Не суждено было сбыться амбициозным планам, включавшим, помимо спутника Марса, доставку на его поверхность марсианской станции и двух пенетраторов, оснащенных аппаратурой для прямых измерений на поверхности и в приповерхностном слое грунта.

В результате российская планетная программа оказалась в глубочайшем кризисе, утратив на несколько лет поддержку как со стороны Совета по космосу Российской Академии наук и руководств космической отрасли, так и со стороны коллег в рамках широкой международной научной кооперации.

Возродить отечественную программу планетных исследований призван проект «Фобос-Грунт». Чтобы начать работы по этому проекту, потребовались немалые усилия, предпринятые первоначально небольшой группой энтузиастов уже вскоре после гибели «Марса-96», на фоне глубокой депрессии в нашем научном (прежде всего, планетном) сообществе. Несмотря на то, что секция Совета РАН по космосу «Планеты и малые тела Солнечной системы» отметила в своем решении от 20.03.1998 г., что исследования Марса, Луны и Фобоса имеют ряд общих научных и технических проблем, и указала, что доставка образца вещества Фобоса на Землю является важнейшей научной задачей, финансирование лунно-планетной программы осуществлялось в течение многих лет на минимальном уровне. Львиная доля выделяемых средств уходила на подготовку астрофизических проектов «Спектр», запуски которых, тем не менее, до сих пор не удалось осуществить. История этого сложного периода в российской программе космических исследований и неэффективности руководства при выборе целевых направлений исследований обстоятельно изложена в книге Э.М. Галимова [3].

Тем не менее, благодаря энергичной работе упомянутой выше группы специалистов – представителей ряда ведущих научных и промышленных организаций, в первую очередь НПО им. С.А. Лавочкина, НИИ ПМЭ МАИ, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ЦНИИМАШ, ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН и ИКИ РАН удалось в сжатые сроки провести в полном объеме этап научно-исследовательских работ (НИР) по созданию базового аппарата нового поколения – универсального космического модуля, пред-

назначенного для решения широкого круга задач планетных исследований [4; 5]. Это позволило после завершения НИР в 1999 г. перейти с начала 2000 г. к этапу эскизного проектирования КА «Фобос-Грунт» и начать опытно-конструкторские работы. К большому сожалению, из-за хронического недофинансирования этого проекта сроки его реализации дважды смещались от первоначально намеченного 2003 г. на 2005 г., а затем на 2009 г. и, наконец, на 2011 г.

Проект «Фобос-Грунт» рассматривается в качестве первого КА на базе универсального космического модуля для планетных исследований, реализуемого в начале второго десятилетия нового столетия. Одновременно он обеспечивает необходимый задел для осуществления комплексного плана космических исследований дальнего космоса на последующий период при резком сокращении финансовых затрат. Удешевление процесса создания и запуска аппаратов на носителях среднего класса («Союз-Фрегат», «Зенит»), наряду с использованием новейших технологий, прорывных технических решений, существующей технологической и производственной базы и, к счастью, сохранившегося богатого опыта в НПО им. С.А. Лавочкина и в ряде смежных организаций, служат необходимой основой такой принципиально новой долговременной стратегии.

Выбор в качестве актуальной научной задачи планетных исследований полета к Фобосу и доставка на Землю образцов пород с этого небесного тела не случаен. Детальное изучение в условиях земных лабораторий внеземного вещества, «закапсулировавшего» в своем составе процессы химических и фазовых превращений на протяжении миллиардов лет, способно дать ответы на принципиально важные вопросы относительно происхождения и эволюции небесных тел и Солнечной системы в целом, и тем самым внести бесценный вклад в решение ключевых проблем современного естествознания – космогонии, космохимии, астробиологии. Следует подчеркнуть, что проблемы космохимии выходят на передний план исследованиях планет и малых тел, поскольку только детальное изучение внеземного вещества способно дать ответы о генезисе Солнечной системы, реконструировать основные механизмы ее формирования. С этими проблемами непосредственно связаны также интригующие вопросы относительно эволюции в космосе и на небесных телах первичного органического вещества и зарождения жизни, в частности возникновения ранней биосферы Земли [6; 7].

Образцы пород с Фобоса представляют особый интерес еще и в силу до конца не решенной проблемы происхождения спутников Марса (Фобоса и Деймоса): являются ли они реликтовыми телами со времени аккреционной стадии, или астероидами,

позднее захваченными гравитационным полем планеты. Сценарий захвата в целом отвечает концепции, согласно которой постоянно происходит миграция комет и астероидов с периферии Солнечной системы (включая пояс Эджеворта-Койпера) в ее внутренние области – зону расположения планет земной группы [8]. Наиболее интенсивно миграция происходила на самых ранних этапах эволюции Солнечной системы, которая была заполнена многочисленными первичными телами астероидных размеров (планетезималей) и ее конфигурация сильно отличалась от современной. С процессами миграции связывается, в частности, доставка основной массы летучих на планеты земной группы в более поздний период гетерогенной аккреции и формирования их атмосфер/гидросфер [9; 10]. Согласно этим оценкам, количество воды, доставленной на Землю кометами и астероидами класса углистых хондритов, могло быть сопоставимым с массой земных океанов. Моделирование миграции малых тел непосредственно связано также с анализом роли столкновительных процессов и транспорта вещества в Солнечной системе и оценками эффективности переходов астероидов на орбиты, пересекающиеся с орбитами Земли, Венеры, Марса, в частности с проблемой астероидной опасности. В свою очередь, миграция пылевых частиц могла внести существенный вклад в перенос биогенных форм материи [11].

Доставленные на Землю образцы вещества с Фобоса станут самыми первыми породами, слагающими астероидоподобное тело. Можно ожидать, что в слое реголита на поверхности Фобоса частично присутствуют также частицы вещества с Марса, покидавшие его вследствие импактных процессов. О такой возможности определенно свидетельствуют найденные на Земле метеориты класса SNC, происхождение которых с высокой степенью вероятности связывается с Марсом. Если аналогичные фрагменты будут найдены среди пород, доставленных с Фобоса, это значительно повысит надежность выводов относительно хронологии эволюционных процессов на Марсе, а возможно, и о совместном происхождении планеты и ее спутников (как это имеет место в системах планет-гигантов), что имеет неопределимое значение для сравнительной планетологии. Для понимания процессов эволюции вещества в пределах Солнечной системы первостепенный интерес представляет получение данных измерений элементного, минералогического и изотопного состава, в первую очередь, изотопных отношений кислорода и основных породообразующих элементов.

Одновременно предполагаются длительные исследования поверхности Фобоса и его ближайшего космического окружения при помощи комплекса

разнообразных научных инструментов. Они дадут важные сведения о физико-химических свойствах поверхности и природе этого тела, особенностях его внутреннего строения и собственного движения, физических условиях околопланетной среды в окрестностях Марса и Фобоса (пылевые частицы тора вдоль орбиты Фобоса, плазма и ее вариации и др.). Будут получены данные и о самом Марсе при его дистанционных наблюдениях как в процессе сближения КА с Фобосом, так и после старта возвратной ракеты при помощи оставленного на его поверхности модуля, оснащенного научной аппаратурой для прямых измерений на поверхности Фобоса и дистанционных измерений характеристик окружающей среды в системе Фобоса и Марса. Заметим, что естественный спутник впервые становится платформой для длительных исследований самой планеты.

Научные задачи, решаемые с использованием комплекса научных приборов, вместе с описанием конструкции, технических характеристик КА «Фобос-Грунт» и сценария экспедиции, рассчитанной почти на три года, подробно изложены в работе [12], а описанию установленной на КА научной аппаратуры был посвящен специальный номер журнала «Астрономический вестник» [13]. О задачах, связанных с контролем радиационной и метеорной обстановки в окрестности Фобоса, говорится в упомянутой выше работе [6], а вопросы выбора и аттестации мест посадки аппарата на поверхность Фобоса подробно рассмотрены в [14].

Успех проекта зависит как от надежности космического аппарата, представляющего собой сложный комплекс современных компьютеризированных систем и автоматических исполнительных органов, работающих с высокой степенью автономии, так и от баллистико-навигационного обеспечения миссии в едином контуре функционирования бортового и наземного комплексов управления. Потребуется высокая точность и надежность их работы на всех многочисленных этапах полета, обеспечивающая гибкость маневрирования, формирование промежуточной орбиты вокруг Марса и орбиты сближения с Фобосом, мягкую посадку на его поверхность, взлет с поверхности и выход на околомарсианскую орбиту, перевод возвращаемого аппарата на траекторию полета к Земле, вход в ее атмосферу и посадку капсулы с грунтом в заданном районе. Этим проблемам посвящена обстоятельная работа [15].

Как видим, проект «Фобос-Грунт» находится на самых передовых рубежах современной науки о Вселенной и вносит весомый вклад в развитие космической техники. Он удачно вписывается в международную стратегию изучения Солнечной системы и призван дать ответы на ряд вопросов фундаменталь-

ного научного значения, позволяя, вместе с тем, избежать дублирования с космическими проектами других стран, в частности с амбициозной широкомасштабной марсианской программой НАСА. Мы здесь занимаем вполне определенную собственную нишу.

В проведении ряда научных экспериментов участвуют европейские и американские ученые. Перспективы широкого международного сотрудничества открываются при изучении доставленных с Фобоса на Землю образцов реликтового вещества в лабораториях мира, которым, несомненно, будет предоставлена такая возможность. На КА «Фобос-Грунт» установлен спутник Марса массой 120 кг, созданный учеными и инженерами Китайской Народной Республики, который будет отделен от орбитального аппарата вскоре после его выхода на марсианскую орбиту. Это позволит ученым КНР, вслед за началом осуществления программы исследований Луны, реально включиться в программу исследований Марса. Планетное общество США, в сотрудничестве с российскими и немецкими биологами, устанавливает на возвращаемом аппарате специальную небольшую канистру с микроорганизмами (эксперимент LIFE). Цель эксперимента – изучение влияния на микроорганизмы факторов космической среды за три года экспонирования в открытом космосе.

Перспективные российские проекты исследования космоса на основе универсального базового модуля предусматривают полеты к кометам, астероидам главного пояса, астероидам, сближающимся с Землей (NEO), и в систему Юпитера (в первую очередь, к наиболее интересным из галилеевых спутников - Европе и/или Ганимеду, предположительно обладающим глубоким водным океаном), обеспечивая решение актуальных задач изучения планет и малых тел на основе гибкой стратегии и широких технических возможностей многофункционального базового КА, включая оснащение его электрореактивными двигателями малой тяги. Естественно, что технические решения, положенные в основу проекта «Фобос-Грунт», подвергнутся при реализации этих перспективных проектов определенным модификациям в зависимости от решаемых конкретных задач. Важно, вместе с тем, еще раз подчеркнуть, что КА «Фобос-Грунт» является первым необходимым этапом на данном стратегически важном направлении космических исследований Солнечной системы.

#### **Список литературы**

1 Ксанфомалити Л.В., Петрова Е.В., Хартманн У.К. Неоднородность реголита Фобоса по степени зрелости // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 1997. Т. 31, № 5. С. 422-426.

2 Ksanfomality L.V., Moroz V.I. Spectral reflectivity of the Phobos regolith // *Icarus*, 1995. V. 117. P. 383-401.

3 Галимов Э.М. Замыслы и просчеты: Фундаментальные космические исследования в России последнего двадцатилетия. Двадцать лет бесплодных усилий. М.: Едиториал УРСС, 2010. 304 с.

4 Космический проект «Фобос-Грунт»: Основные характеристики и стратегия развития / В.С. Авдудевский [и др.] // *Космонавтика и ракетостроение*, 2000. № 2.

5 Phobos-Grunt: Russian sample return mission / M.Ya. Marov [et al.] // *Advance Space Research*, 2004. 33. P. 2276-2280.

6 Галимов Э.М. Научное обоснование проекта доставки грунта с Фобоса // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2010, Т. 44, № 1, С. 7-16.

7 Проблемы зарождения и эволюции биосферы / Под ред. Э.М. Галимова. М.: Книжный дом Либроком, 2008. 552 с.

8 Marov M.Ya., Ipatov S.I. Volatiles inventory and formation of planetary atmospheres // In: *Collisions in the Solar System* (M.Ya. Marov and H. Rickman eds.). Kluwer Academic Publishers, 2001.

9 Маров М.Я. Малые тела и некоторые проблемы космогонии // *УФН*, 2005. Т. 175, № 6. С. 668-678.

10 Маров М.Я., Ипатов С.И. Миграция пылевых частиц и доставка летучих на планеты земной группы // *Астрономический Вестник. Исследования Солнечной системы*, 2005. Т. 39, № 3.

11 Маров М.Я. Приток пыли и летучих на планеты земной группы. В сб.: *Космическая пыль на Земле // Материалы рабочего совещания Космическая (метеорная) пыль на поверхности Земли, 28-30 августа 2009 г. Миасс: ИГЗ УрО РАН*, 2010. С. 54-70.

12 Проект экспедиции к Фобосу / Л.М. Зеленый [и др.] // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2010. Т. 44, № 1. С. 17-28.

13 *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. Специальный выпуск: проект «Фобос-Грунт»*. Приборы для научных исследований, 2010. Т. 44, № 5.

14 Базилевский А.Т., Шингарева Т.В. Выбор и характеристика места посадки КА «Фобос-Грунт» // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2010. Т. 44, № 1. С. 4-47.

15 Доставка на землю реликтового вещества с Фобоса. Проект «Фобос-Грунт»: баллистика, навигация и управление полетом / Э.Л. Аким [и др.] // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2010. Т. 44, № 1. С. 29-40.

УДК 629.785 «Фобос-Грунт»

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ФОБОС-ГРУНТ»

*М.Б. Мартынов*



**МАРТЫНОВ**

**Максим Борисович**

заместитель генерального конструктора – руководитель ОКБ, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», кандидат технических наук  
E-mail: maxim.martynov@laspase.ru

*В статье приведены основные характеристики Российского научного космического проекта «Фобос-Грунт», основной задачей которого является доставка на Землю образцов вещества спутника Марса Фобоса.*

*Показана концепция проекта, рассмотрены основные схемные решения, а также эволюция проекта в процессе разработки.*

*Ключевые слова: Фобос-Грунт; концепция; образцы вещества.*

### **DESIGN PHILOSOPHY OF «PHOBOS-GRUNT» SPACE COMPLEX M.B. Martynov**

*The article covers main parameters of the Russian scientific space mission «Phobos-Grunt», which primary goal is delivery of soil samples from the Martian satellite Phobos to the Earth.*

*Also the mission concept is shown, the basic design solutions, and evolution of the project during its development are considered.*

*Key words: Phobos-Grunt; concept; soil samples.*

Научные космические исследования направлены на решение фундаментальных проблем происхождения, эволюции и дальнейшего развития Вселенной, Солнечной системы и Земли.

Для того чтобы определить наше место во Вселенной, мы должны понимать окружение, в котором мы находимся. Необходимо знать, как образовались планеты Солнечной системы, чем определены их характеристики, насколько случайным было зарождение жизни, является ли она редким феноменом, могут ли в обычном случае выживать планеты земного типа, или они обычно поглощаются объектами, подобными Юпитеру.

Планеты Солнечной системы и большинство их спутников за время своей эволюции претерпели в той или иной степени изменения под действием внешних факторов.

Эти процессы коренным образом преобразовали вещество планет и практически стерли память о первородном веществе. Принципиально иная ситуация обстоит с малыми телами в Солнечной системе. Они

представляют собой «строительный материал», из которого были сформированы планеты и их спутники. Исследования этих тел представляют особый интерес, так как позволяют заглянуть в ранние этапы формирования Солнечной системы.

Хорошо известно, что на малых телах, таких как астероиды и кометы, отсутствуют процессы, существенно изменяющих их первоначальный состав. Поэтому сравнение свойств первородного вещества с физико-химическими свойствами вещества планет, измененных, в основном, их внутренними вулканическими и тектоническими процессами, позволит уточнить космогонические теории происхождения и эволюции Солнечной системы. На рубеже нового тысячелетия возникла необходимость создания космических аппаратов нового поколения для исследования планет и малых тел Солнечной системы. Одновременно требовался вариант научно-значимой миссии, способной объединить усилия ученых и технических специалистов. Такой экспедицией стал проект «Фобос-Грунт».

Основной, «пионерской» научно-технической задачей проекта является доставка на Землю образцов вещества спутника Марса Фобоса, с целью их комплексного изучения в земных лабораториях. Кроме этого, предполагается исследование Марса и Фобоса дистанционными и контактными методами.

Основная причина научного интереса к Фобосу заключается в том, что он относится к числу малых тел Солнечной системы, состоящих, возможно, из первородного, реликтового вещества. Согласно гипотезе о происхождении Фобоса, он мог быть астероидом, захваченным гравитационным полем Марса.

Реалии сегодняшнего дня говорят о том, что наибольший научный результат могут дать исследования образцов реликтового вещества в земных лабораториях, с использованием всего арсенала научных методов и приборов, что, конечно, пока недоступно на автоматических космических аппаратах.

За время проектирования, в силу различных обстоятельств, научные и технические задачи проекта претерпевали изменения, что приводило к изменению состава космического комплекса и корректировке концепции экспедиции, которая в целом была окончательно завершена только в 2007-2008 годах.

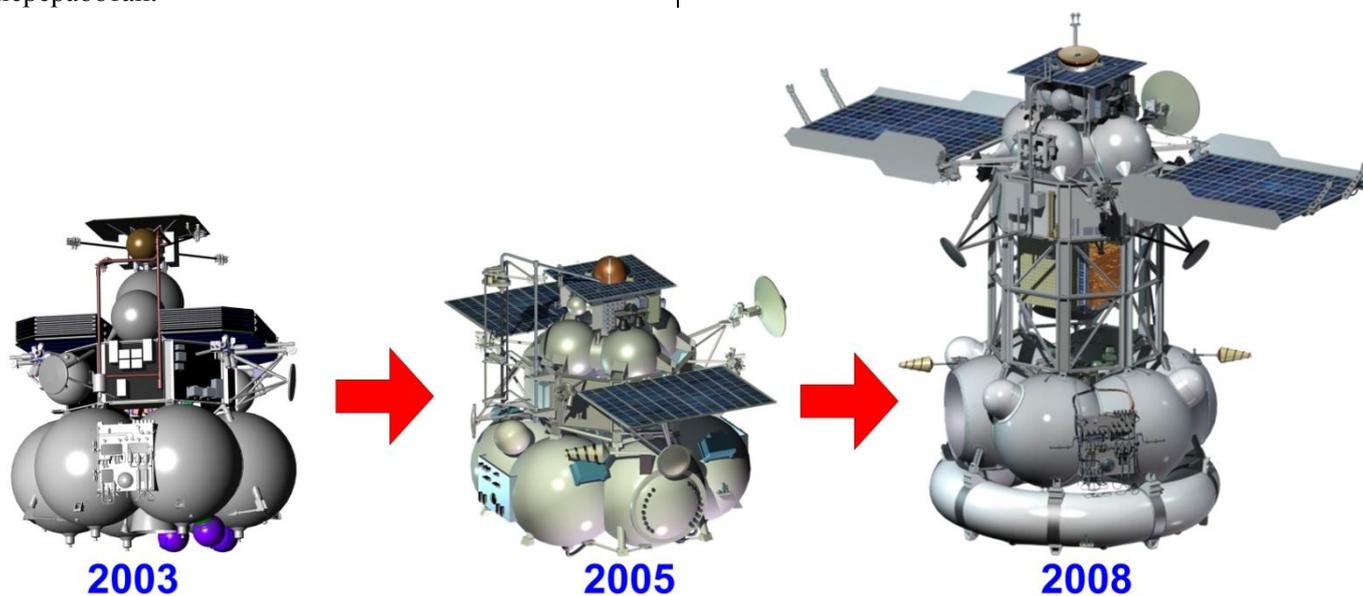
Первоначально, экспедицию предполагалось осуществить с использованием электроракетной двигательной установки с запуском на РН «Союз», но, в силу унификации с последующими планетными миссиями, от этой концепции пришлось отказаться, и, в связи с этим, в 2005 году проект был полностью переработан.

Следует отметить, что менялись не только отдельные элементы космического комплекса и космического аппарата, но и их структура в целом. Так, например, по соглашению между Роскосмосом и Китайской национальной космической администрацией в состав космического аппарата был включен китайский микроспутник «УН-1», при помощи которого российский КА «Фобос-Грунт» впервые в истории человечества осуществит «двухточечные» измерения параметров околомарсианской плазмы и проведет эксперименты по радиопросвечиванию марсианской ионосферы радиосигналами на двух частотах.

Это изменение привело к повторной переработки проекта в 2007-2008 годах. Был осуществлен переход на РН «Зенит», в состав космического аппарата был введен отдельный автономный модуль с китайским микроспутником, к маршевой двигательной установке был добавлен сбрасываемый блок баков, потребовались доработки бортового комплекса управления, элементов системы электроснабжения и т.д.

Но, несмотря на такие существенные изменения, а также учитывая модульный принцип, заложенный при проектировании космического аппарата, удалось сохранить основные проектно-конструкторские решения без изменений.

Также, следует отметить, что в проекте наиболее полно применяется принцип междисциплинарности, т.е. получения значимой научной информации для максимально возможного количества различных научных дисциплин.



**Рисунок 1. Эволюция космического аппарата «Фобос-Грунт»**

Например, в рамках экспедиции «Фобос-Грунт» будет проведен попутный биологический эксперимент. Для обеспечения этого в спускаемый аппарат помещаются капсулы с образцами биокультур, которые совершат путешествие до Марса и обратно на Землю. Таким образом, предполагается проверить теорию панспермии - возможность переноса жизни во Вселенной с одного космического тела на другое при помощи метеоритов или под действием давления света.

Научная программа, выполняемая на борту космического аппарата «Фобос-Грунт», разработана при головной роли Института космических исследований РАН с участием Института геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и ряда других научных организаций.

Космический аппарат «Фобос-Грунт» разрабатывается головным предприятием ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» при тесном содействии предприятий - соисполнителей, основными из которых являются: ФГУП «ЦНИИМаш», ОАО «РКС», ФГУП «НИИМаш», АНО «НТИЦ «Техком», ОАО «Сатурн», ОАО «Концерн «Вега», ОАО «НПЦ «Полос», ОАО «ТКС-Оптика», ФГУП «НПО ИТ», ЗАО Инженерная фирма «Орион-ХИТ», ГКБ «Южное», ИКИ РАН, ОАО «ИСС им. М.Ф. Решетнева», АНО «АКНИИПО», ОАО «НИАИ «Источник» и др.

Проект «Фобос-Грунт» реализуется с широким международным участием. Кроме доставки к Марсу китайского микроспутника, в соответствии с соглашением между Роскосмосом и ЕКА привлекаются наземные станции управления ЕКА; ученые Германии, Италии,

Китая, Франции, Украины, Швеции, Швейцарии и Польши вносят большой вклад в создание научной аппаратуры.

Если выделить основные параметры, определяющие концепцию проекта «Фобос-Грунт», то можно выделить следующие:

- дата запуска – октябрь - ноябрь 2011;
- ракета-носитель – «Зенит-2»;
- прилет к Марсу - сентябрь 2012;
- время межпланетного перелета Земля – Марс - 10 – 11 месяцев;
- старт с Фобоса - февраль – март 2013;
- время межпланетного перелета Марс – Земля - 10 – 11 месяцев;
- дата подлета к Земле - август 2014;
- общее время миссии ~ 33 – 34 месяцев;
- масса КА (заправленного) - 13500 кг;
- масса научной аппаратуры - 50 кг;
- масса образцов грунта Фобоса - 0.2 кг.

Концепция миссии и ее основные элементы показаны на рисунке 2.

Следует отметить, что одной из особенностей проекта является высокая «массовая стоимость» доставки на землю вещества Фобоса. Первоначальная масса заправленного космического аппарата с китайским микроспутником на момент старта с опорной орбиты ИСЗ составляет порядка 13.5 тонн, масса спускаемого аппарата, который обеспечит торможение в атмосфере Земли капсулы с грунтом - не более 7 килограммов, а масса доставляемых на Землю образцов вещества - всего порядка 200 грамм.

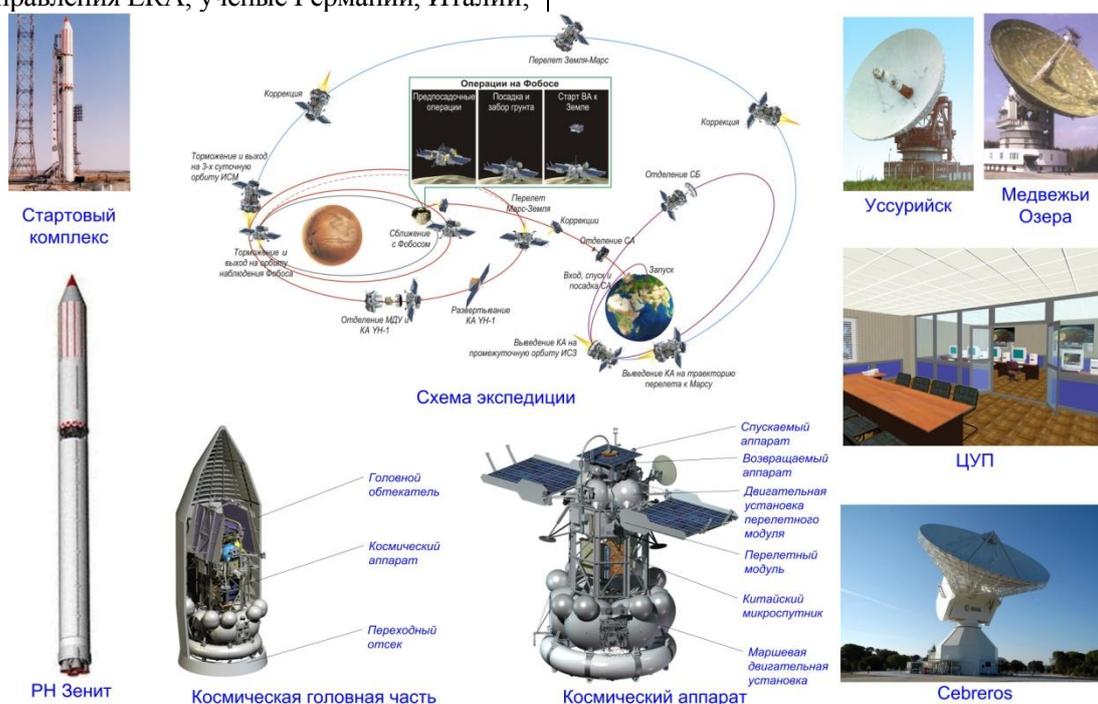


Рисунок 2. Концепция экспедиции «Фобос-Грунт»

На этапах проектных проработок рассматривались различные схемы экспедиции, в том числе и с применением электроракетных двигателей. В результате была выбрана схема прямого полета с возвращением к Земле.

Выведение космического аппарата на низкую орбиту искусственного спутника Земли осуществляется ракетой-носителем «Зенит» с космодрома Байконур. После отделения от ракеты-носителя космический аппарат при помощи трех включений маршевой двигательной установки осуществляет переход на траекторию полета к Марсу.

Особенностью схемы выведения является то, что первые два импульса осуществляются по программе, заложенной на Земле еще до старта, а параметры третьего маневра до старта в бортовой комплекс управления не заносятся. После выполнения второго включения маршевой двигательной установки и перехода космического аппарата на вторую промежуточную орбиту, предусматривается полет КА по этой орбите примерно в течение семи суток. За это время уточняются фактические параметры орбиты, определяются время проведения и параметры третьего маневра, которые передаются на борт КА в виде командно-программной информации.

На перелете проводятся три коррекции траектории, что по сравнению с двумя позволяет минимизировать значение суммарного корректирующего импульса и повысить точность подлета к Марсу.

Подлет к Марсу происходит по пролетной траектории с высотой перицентра около 700...1000 км.

Следующий этап экспедиции – формирование орбиты для сближения с Фобосом. Идеология этого этапа уже была отработана в предыдущей экспедиции к Фобосу и осуществляется по трехимпульсной схеме.

В соответствии с этой схемой при помощи маршевой двигательной установки выдается первый импульс, и космический аппарат выводится на начальную эллиптическую орбиту вокруг Марса с высотой перицентра ~900 км, апоцентра ~ 77000 км и периодом обращения порядка трех суток. На этой орбите осуществляется отделение китайского микроспутника.

Далее вторым импульсом, который выполняется в апоцентре, увеличивает перицентр КА до высоты, несколько превышающей высоту орбиты Фобоса.

Третий импульс в перицентре формирует круговую орбиту с радиусом приблизительно 9900 км (на ~500 км выше орбиты Фобоса) в плоскости орбиты Фобоса.

Период обращения КА на этой круговой орбите 8.3 часа. Находясь на этой орбите, космический аппарат раз в четверо суток будет сближаться с Фобосом на расстояния в несколько сот километров.

Функционирование на орбите наблюдения необходимо для проведения точных навигационных измерений взаимного движения космического аппарата и Фобоса, что требуется для перехода на еще более близкую к Фобосу «квазисинхронную» орбиту.

«Квазисинхронная» орбита космического аппарата имеет равный с орбитой Фобоса период обращения, но отличается от нее по высоте на несколько десятков километров в меньшую и в большую стороны на разных частях орбиты.

Двигаясь по такой орбите, космический аппарат будет постоянно находиться вблизи Фобоса на расстоянии 50-130 км. Более того, особенность «квазисинхронной» орбиты состоит в том, что в системе координат Фобоса космический аппарат совершает оборот вокруг этого спутника Марса за 7.36 часа.

Функционирование на этой орбите необходимо для уточнения взаимного положения двух тел и изучения места посадки на поверхности Фобоса.

Посадка запланирована в экваториальной области Фобоса, невидимой с Марса. Такое положение космического аппарата на поверхности Фобоса позволяет избежать попадания космического аппарата в тень Марса и обеспечивает требуемую энергетику.

Посадка космического аппарата на поверхность Фобоса сводится, по сути, к стыковке двух тел. Выполнение операций по стыковке осуществляется на значительных дальностях от Земли, при которых наземная поддержка этих операций ограничена. Кроме того, Фобос – тело неправильной формы, гравитационное поле которого недостаточно изучено.

Все эти особенности диктуют необходимость автономного, автоматического проведения заключительного этапа сближения с поверхностью Фобоса и посадки.

Для выполнения автономной посадки космического аппарата будут задействованы несколько приборов: телевизионные камеры для получения изображений предполагаемой зоны посадки, лазерный высотомер-вертиконт и доплеровский измеритель скорости и дальности.

Ввиду незначительной силы тяготения на Фобосе, в момент контакта космического аппарата с поверхностью будут включены двигатели малой тяги, обеспечивающие прижим и устойчивость КА на поверхности.

Разработано несколько алгоритмов забора грунта. В случае нештатной посадки или проблем с энергетикой выполняется короткий алгоритм «вслепую», без осуществления связи с Землей. Забор будет произведен грунтозаборным устройством пенетрационного типа, а питание будет осуществляться от специального химического источника тока.

В случае если системы космического аппарата функционируют нормально, будут осуществлены предварительные исследования грунта Фобоса научными приборами, выбор предпочтительных образцов, после чего будет произведен забор образцов грунта.

Образцы грунта укладываются в герметичную капсулу, которая впоследствии перегружается в спускаемый аппарат. После этого возвращаемый аппарат готов к старту с Фобоса.

При помощи механических толкателей возвращаемый аппарат отделяется с относительной скоростью около 1 м/с от перелетного модуля, который остается на поверхности Фобоса.

После отхода возвращаемого аппарата на безопасное расстояние включается его двигательная установка, и аппарат выходит на орбиту вокруг Марса с высотой, несколько меньшей высоты орбиты Фобоса.

Далее, откорректировав орбиту, удобную для старта к Земле, выполняются операции по переводу возвращаемого аппарата на межпланетную траекторию Марс – Земля. Этот перевод производится по трехимпульсной схеме, подобной той, которая использовалась для перевода КА с межпланетной траектории на круговую орбиту вокруг Марса, но в обратной последовательности.

Траектория полета возвращаемого аппарата обеспечивает прямой вход его в атмосферу и посадку в заданном районе на поверхности Земли. С этой целью при подлете аппарата выполняются несколько коррекций траектории.

За несколько суток перед подлетом к Земле от возвращаемого аппарата отделяется спускаемый аппарат. В результате аэродинамического торможения спускаемого аппарата при спуске в атмосфере происходит снижение скорости аппарата приблизительно с 12 км/с до 70 м/с, с которой и осуществляется посадка на Землю.

Разброс места падения представляет собой эллипс с характерными размерами до тридцати километров. Поиск спускаемого аппарата на поверхности Земли осуществляется с помощью наземных стационарных и мобильных средств.

Завершающей задачей спускаемого аппарата является доставка капсулы с образцами грунта Фобоса на Землю для лабораторных исследований при обязательном выполнении международных требований обеспечения карантина для внеземного вещества.

Доставкой образцов грунта с Фобоса на Землю экспедиция не заканчивается. Перелетный модуль остается на поверхности Фобоса для продолжения выполнения научной программы экспедиции в течение одного года.

Для реализации научно-технических задач проекта космический аппарат спроектирован по модульному принципу, при этом параметры модулей превосходят существующие российские и зарубежные аналоги (рисунок 3).

Основным структурным элементом космического аппарата является перелетный модуль, обеспечивающий управление работой КА «Фобос-Грунт» на всех этапах его автономного функционирования, кроме этапа полета от Марса к Земле.

Для забора образцов грунта Фобоса в составе перелетного модуля предусмотрены два манипулятора с различными типами грунтозаборных устройств.

Грунтозаборное устройство цангового типа предназначено для многократного забора грунта. Пенетрационное грунтозаборное устройство предназначено для внедрения керна в грунт и перекладки его вместе с грунтом в возвращаемую капсулу. Оно является одноразовым, но впоследствии может быть использовано для рыхления грунта.

Кроме того, после выполнения целевой задачи – забора грунта манипулятор будет обеспечивать доставку образцов вещества Фобоса к аналитическим приборам, расположенным на корпусе аппарата.

В проекте реализована усовершенствованная схема выведения – «самовыводящийся» космический аппарат. Отличительной особенностью схемы является отсутствие разгонного блока как автономной составной части ракетно-космического комплекса; выведение осуществляется при помощи маршевой двигательной установки космического аппарата, а управление – при помощи системы управления и исполнительных органов КА.

Двигательная установка перелетного модуля предназначена для создания импульсов скорости движения центра масс космического аппарата на этапе перелета, торможения, посадки на поверхность Фобоса, а также обеспечения движения вокруг центра масс на всех вышеперечисленных этапах и во время работы маршевой двигательной установки.

Основным конструктивным элементом возвращаемого аппарата является двигательная установка, к которой крепятся панели сотовой конструкции с установленными на них служебными приборами, панель солнечной батареи, а также спускаемый аппарат.

Двигательная установка возвращаемого аппарата предназначена для создания импульсов скорости движения центра масс и вокруг центра масс на этапе взлета с поверхности Фобоса, перелета Марс-Земля и формирования траектории входа спускаемого аппарата в атмосферу Земли.

Спускаемый аппарат (СА) предназначен для торможения в атмосфере Земли и посадки на Землю герметичной капсулы с образцами грунта Фобоса.

Одним из основных этапов экспедиции «Фобос-Грунт» является посадка спускаемого аппарата с образцами вещества Фобоса на Землю, его поиск и эвакуация, что накладывает повышенные требования по надежности, как на системы спускаемого аппарата, так

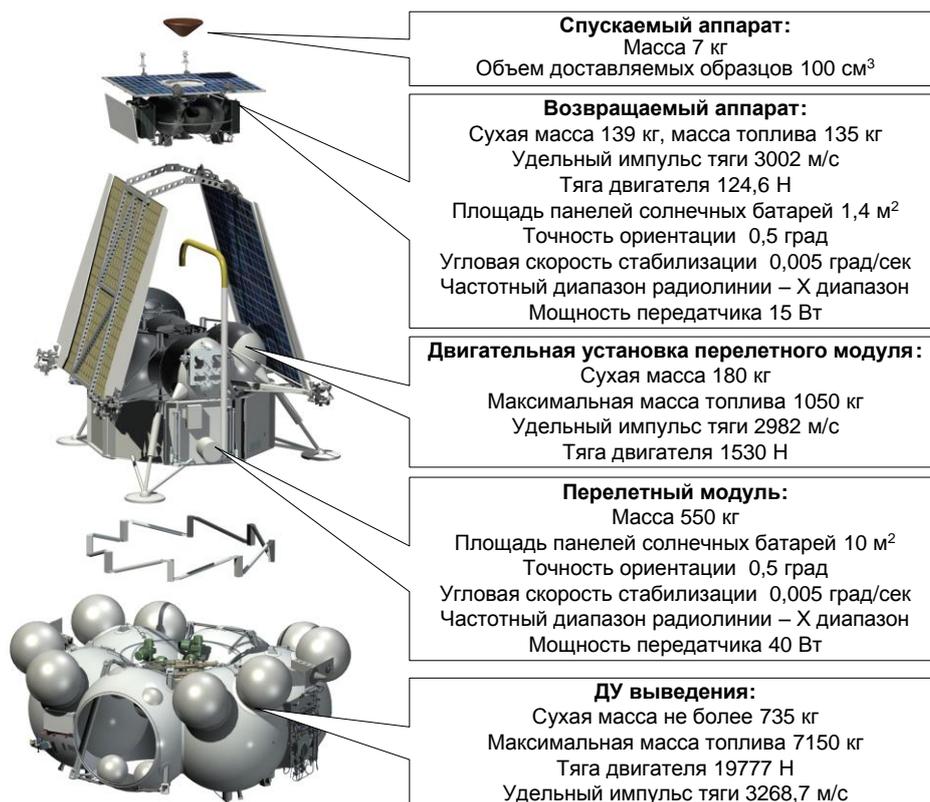


Рисунок 3. Модули космического аппарата «Фобос-Грунт»

и на систему его поиска. В связи с этим принято решение, что торможение СА в атмосфере Земли осуществляется только за счёт аэродинамического сопротивления, без использования парашютной системы, которая, как показал мировой опыт, может и не сработать.

Посадка спускаемого аппарата осуществляется на полигон «Сары-Шаган», который оснащён необходимыми измерительными средствами для определения точки приземления СА, не имеющего активных средств типа радиомаяка, с погрешностью не более 100 метров, а на завершающем этапе поиска СА используются поисковые группы, оснащённые вертолётами и беспилотными летательными аппаратами.

Требования к установке приборов научной аппаратуры настолько противоречивы, что не позволили сформировать научную аппаратуру автономным модулем. В соответствии с этим, приборы научной аппаратуры размещены на различных элементах конструкции перелетного модуля.

#### Список литературы

1 Зеленый Л.М., Захаров А.В., Ксанфомалити Л.В. Исследования Солнечной системы, состояние и перспективы // Успехи физических наук, 2009. Т. 179, № 10. С. 1118-1140.

2 Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.М.

Полищука и д-ра техн. наук, проф. К.М. Пичхадзе. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010.

3 Мартынов М.Б., Зеленый Л.М., Хартов В.В. Космическая программа исследования планет и малых тел Солнечной системы: принципы формирования, концепция технической реализации // Полет, 2011. № 4. С. 107-119.

4 Мартынов М.Б. Модульное построение космических аппаратов: анализ эффективности, перспектива применения // Полет, 2010. № 7. С. 72-78.

5 Мартынов М.Б., Куликов С.Д., Горошков И.Н. Проект «Фобос-Грунт» // Земля и Вселенная, 2002. № 6. С. 25-36.

6 Project of the mission to Phobos / L. Zelenyi [et al.] // Solar System Research, 2010. Vol. 44, N 1. P. 15-25.

7 Космические модули комплекса «Фобос-Грунт» для перспективных межпланетных станций / Г.М. Полищук [и др.] // Вестник ФГУП НПО имени С.А. Лавочкина, 2009. № 2. С. 3-7.

8 Патент на промышленный образец RU 61281 S. Аппарат космический для доставки инопланетного грунта/ Горошков И.Н., Мартынов Б.Н., Мартынов М.Б. и др. (Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»). №2005502554; заявлено 06.09.2005 // «Промышленные образцы» ФГУ ФИПС. 2005г.

**АЛЕКСАШКИН**

**Сергей Николаевич**  
директор центра ФГУП  
«НПО им. С.А.Лавочкина»  
E-mail: alexashkin@laspace.ru

**ЗАЙКО**

**Юрий Константинович**  
директор центра ФГУП  
«НПО им. С.А.Лавочкина»  
E-mail: zaiko@laspace.ru

**СУТУГИН**

**Сергей Евгеньевич**  
заместитель начальника  
комплекса ФГУП «НПО  
им. С.А.Лавочкина»

**КОЗЛОВ**

**Олег Евгеньевич**  
главный конструктор проекта  
Институт Космических  
Исследований РАН  
E-mail: o-kozlov@yandex.ru

УДК 629.78.001.5:523.43 «Фобос-Грунт»

## ГРУНТОЗАБОРНЫЙ КОМПЛЕКС «ФОБОС-ГРУНТ»

*С.Н. Алексашкин, Ю.К. Зайко, С.Е. Сутугин, О.Е. Козлов*

*Основной задачей космического аппарата «Фобос-Грунт» является забор и доставка грунта Фобоса на Землю. Выполнение задачи забора грунта решается средствами грунтозаборного комплекса. В статье представлен состав, основные функции и циклограмма функционирования грунтозаборного комплекса.*

*Ключевые слова: грунтозаборный комплекс; Фобос; грунт; манипуляторный комплекс; контейнер; перегрузка; испытания.*

**«PHOBOS-GRUNT» SOIL SAMPLING DEVICE S.N. Aleksashkin, Y.K. Zaiko, S.E. Sutugin, O.E. Kozlov**

*The main objective of «Phobos-Grunt» SC is Phobos soil sampling and its delivery to the Earth. Soil sampling is performed by means of soil sampling device. The article covers composition of soil sampling device, its main functions and operation cyclogram.*

*Key words: soil sampling device; Phobos; soil; manipulator; container; overload; tests.*

### 1 Грунтозаборный комплекс

Основной задачей космического аппарата «Фобос-Грунт» является забор и доставка грунта Фобоса на Землю. Выполнение задачи забора грунта решается средствами грунтозаборного комплекса (ГЗК).

ГЗК (рисунок 1) предназначен для выполнения следующих функций:

- взятие с поверхности Фобоса образцов реголита и консолидированных фрагментов с помощью грунтозаборных устройств (ГЗУ), входящих в состав манипуляторного комплекса;
- погрузка взятых образцов в контейнер грунто-перегрузочного устройства (ГПУ);

- перегрузка контейнера в спускаемый аппарат, предназначенный для доставки взятых образцов на Землю;
- обеспечение образцами грунта приборов комплекса научной аппаратуры с помощью манипуляторного комплекса;
- установка на грунт блока датчиков мессбауэровского спектрометра;
- наведение панорамной камеры для съемки панорам поверхности Фобоса и контроля забора грунта.

Грунтозаборный комплекс выполняет свои функции по командам, выдаваемым бортовым вычислительным комплексом перелетного модуля «Фобос-Грунт» и исполнительным блоком управления.

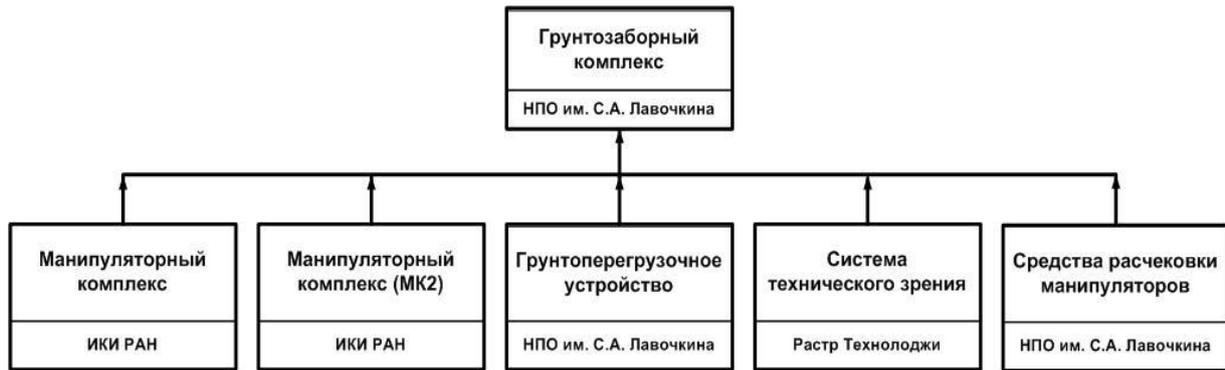


Рисунок 1. Состав грунтозаборного комплекса

Основные требования к грунтозаборному комплексу:

1. Тип забираемого грунта – реголит и консолидированные фрагменты.
2. Размер консолидированных фрагментов - от 5 до 15 мм.
3. Суммарный объем загружаемых в контейнер грунтоперегрузочного устройства образцов вещества Фобоса - не менее 100 см<sup>3</sup>.
4. Осевое усилие при заборе грунта - не более 1 Н.

## 2 Манипуляторный комплекс

Манипуляторный комплекс (МК) установлен на стойке перелетного модуля с возможностью досягаемости как контейнера грунтоперегрузочного устройства, так и научных приборов.

В состав МК входят манипулятор и грунтозаборное устройство. На МК установлены мессбауэровский спектрометр, панорамная камера и микроскоп МикрОмега (рисунок 2).



Рисунок 2. Манипуляторный комплекс

В манипуляторном комплексе захват ГЗУ выполнен в виде разрезанной вдоль тонкостенной трубы с наружным диаметром 16 мм, внутренним диаметром 13 мм и длиной внутренней полости 21 мм с поршнем-выталкивателем внутри (рисунок 3).

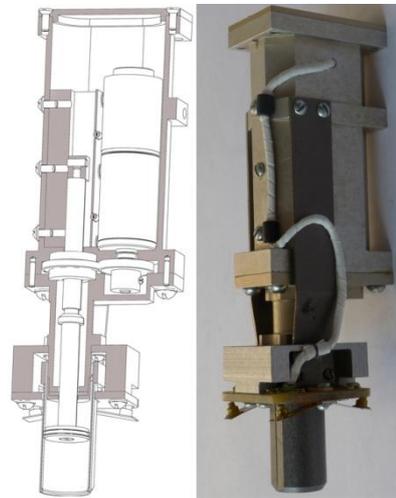


Рисунок 3. Грунтозаборное устройство

Грунтозаборное устройство устанавливается на поворотной платформе на манипуляторе. Манипулятор представляет собой жёстко закреплённый на кронштейне перелетного модуля двухзвенный с четырьмя степенями свободы механизм, окончательным звеном которого является поворотная платформа, где, кроме ГЗУ, установлены панорамная камера, блок датчиков мессбауэровского спектрометра и скребок. Четыре степени свободы обеспечиваются четырьмя приводами, что позволяет манипулятору поворачиваться по азимуту в пределах выделенной общей компоновкой зоны. Поверхность, которая может быть исследована манипулятором - сегмент с углом около 120° от точки крепления манипулятора, ограничена максимальной длиной манипулятора около 900 мм. В транспортном положении манипулятор находится в сложенном виде (см. рисунок 2) и крепится к космическому аппарату в двух местах с помощью кронштейнов и системы пирочек.

Привод ГЗУ состоит из привода, аналогичного манипуляторному, и винтовой передачи для перемещения поршня. Перемещение поршня контролируется датчиками. Погружение ГЗУ в грунт контролируется датчиком контакта с грунтом, который срабатывает при погружении в грунт захвата ГЗУ на 25 мм.

При стандартной циклограмме забора грунта предполагается:

- съемка поверхности Фобоса стереокамерой ГЗУ;
- передача стереоизображения на Землю;
- выбор точек забора грунта манипулятором и назначение грунтоприемников для каждой выбранной точки;
- обработка стереоизображения и передача координат точек забора грунта на КА;
- выход манипулятора над первой точкой забора;
- разворот в сторону точки забора панорамной камеры и определение необходимых коррекций положения манипулятора (может осуществляться автоматически на борту КА);
- коррекция положения манипулятора;
- разворот в сторону точки забора грунта ГЗУ;
- вертикальное опускание ГЗУ в точку забора грунта до срабатывания датчика контакта с грунтом. Автоматическое движение ГЗУ без использования датчика затруднено в связи с тем, что координата по оси «Х» средствами перелетного модуля (ПМ) определяется с точностью менее  $\pm 10$  мм;

- забор грунта;
- перенос грунта в указанный грунтоприемник и выгрузка грунта.

Разрабатывается автоматическая циклограмма забора грунта:

- съемка поверхности Фобоса стереокамерой ГЗК;
- расчет точек забора грунта манипулятором и назначение грунтоприемников для каждой выбранной точки;
- выход манипулятора над первой точкой забора;
- разворот в сторону точки забора панорамной камеры и определение необходимых коррекций положения манипулятора;
- коррекция положения манипулятора;
- разворот в сторону точки забора грунта ГЗУ;
- вертикальное опускание ГЗУ в точку забора грунта до срабатывания датчика контакта с грунтом;
- забор грунта;
- перенос грунта в указанный грунтоприемник и выгрузка грунта.

Разработан аварийный способ забора грунта для случая срочного взлета возвратной ракеты:

- на Земле, до запуска, в память БВК закладываются координаты 40...50 точек забора грунта в зоне досягаемости манипулятора;
- выход манипулятора над первой точкой забора;
- вертикальное опускание ГЗУ в точку забора грунта до срабатывания датчика контакта с грунтом;

- забор грунта;
- перенос грунта в грунтоприемник и выгрузка грунта.

Три различные циклограммы забора грунта повышают надежность выполнения основной задачи миссии для любых условий посадки космического аппарата.

Надежность забора грунта обеспечивается наземной отработкой. Было отработано несколько алгоритмов, в зависимости от испытываемой модели грунта.

Для испытаний использовались две модели грунта. В ГЕОХИ был разработан грунт-аналог на основе дробленого керамзита с добавлением 1% масла для обеспечения стабильных свойств модели грунта и необходимого сцепления и несущей способности. Для проведения испытаний на сыпучем грунте был использован сухой кварцевый песок; использовались также камни размером до 10 мм.

Для связанного керамзита применяется стандартный алгоритм забора грунта, при котором захват открывался на 2-3 мм, внедрялся в грунт, после чего захват сжимался, обеспечивая надежную фиксацию грунта, манипулятор позиционировал захват в точку выгрузки и поршень выталкивал грунт. Столбик грунта получался диаметром 13 мм, высотой около 20 мм.

Для сыпучего грунта был использован алгоритм «черпания», при котором захват в сжатом положении опускался в грунт вертикально вниз, поворачивался на 70-80° и переносился в точку выгрузки. Манипулятор обеспечивал разворот захвата над точкой выгрузки до вертикального положения, и поршень выталкивал остатки грунта. Такой алгоритм позволил в условиях земной гравитации забирать около половины полного объема захвата, что гарантирует забор грунта в условиях низкой гравитации.

Были проведены испытания по забору камней размером до 10 мм, которые захватывались ГЗУ вместе с грунтом.

В случае если на поверхности Фобоса толщина слоя реголита будет менее 20 мм, на ГЗУ предусмотрен скребок для сбора частиц реголита с последующим забором образца с помощью захвата (рисунок 4).



Рисунок 4. Скребок для сбора частиц

Также для повышения надежности забора грунта на перелетном модуле установлен **манипуляторный комплекс второго исполнения (МК2)**. МК2 (рисунок 5) установлен на соседней по отношению к МК стойке перелетного модуля для обеспечения загрузки контейнера грунтоперегрузочного устройства (рисунок 6), а также с возможностью досягаемости одного из научных приборов (рисунок 7).

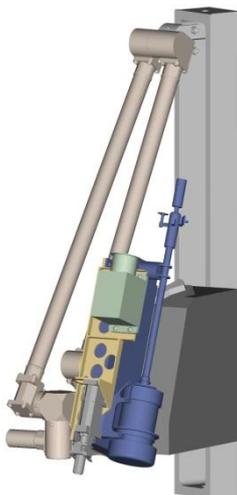


Рисунок 5. Манипуляторный комплекс (исполнение 2)

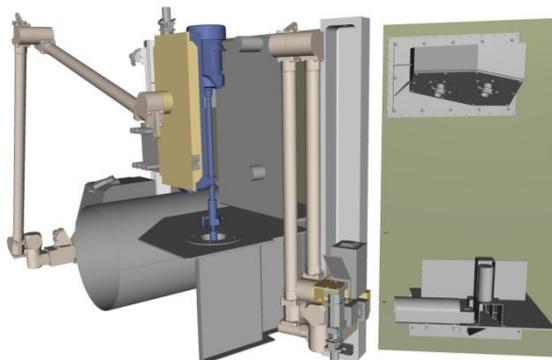


Рисунок 6. Перегрузка образца грунта в контейнер ГПУ

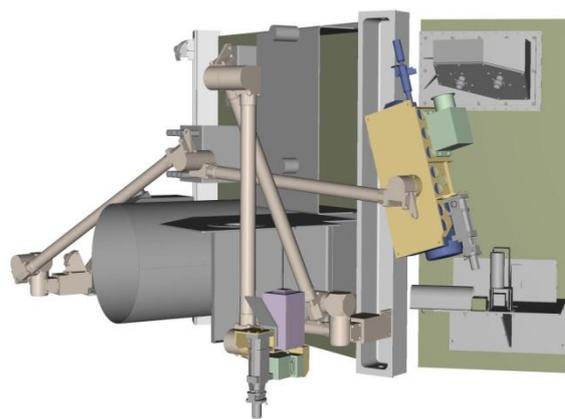


Рисунок 7. Перегрузка образца грунта в прибор ТДА

В состав МК2 входят: манипулятор, грунтозаборное устройство (ГЗУ) и грунтозаборное устройство пенетрационного типа СНОМІК (рисунок 8) [1]. На МК2 устанавливается микроскоп МикрОмега2.

Конструктивно манипулятор и ГЗУ МК2 аналогичны МК. Отличие МК2 от МК заключается в установке на перелетный модуль и другом составе устанавливаемых приборов.

### 3 Грунтозаборное устройство пенетрационного типа СНОМІК

Для увеличения вероятности забора образцов грунта с поверхности Фобоса на МК2 установлено дополнительное устройство, разработанное Центром Космических Исследований Польской академии наук. ГЗУ типа СНОМІК предназначено для забора не только реголита, но и грунта с несущей способностью до 25 МПа, а также может проводить дробление твердых образований и замер температуры поверхности.

Устройство внедрения представляет собой электромагнитный молоток (рисунок 9) и служит для забивания контейнера в грунт. Устройство в транспортном положении зачехлено к основанию, выполненному из алюминиевого сплава и прикрепленному к манипулятору. В процессе работы устройства внедрения возникает реакция грунта, действующая на

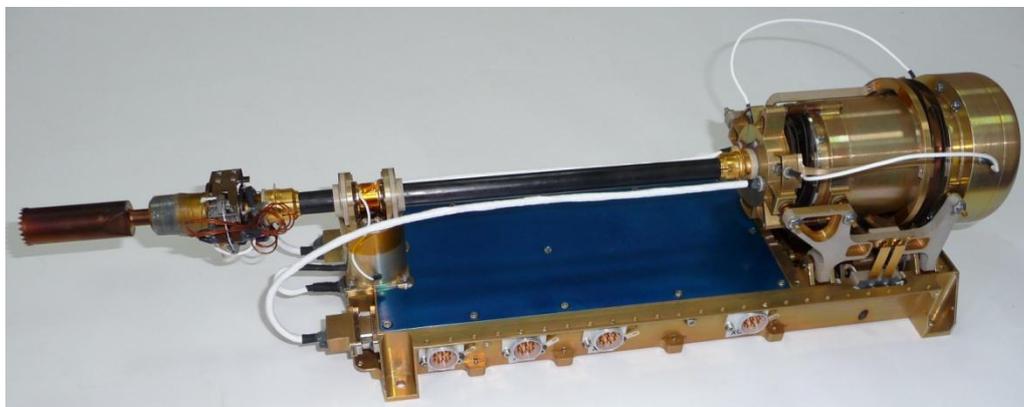


Рисунок 8. Грунтозаборное устройство пенетрационного типа СНОМІК

конструкцию манипулятора. Величина реакции составляет 1 Н - 3 Н. Датчик положения предназначен для получения информации о контакте контейнера с грунтом и пространственном положении контейнера относительно приемной капсулы в момент отделения.

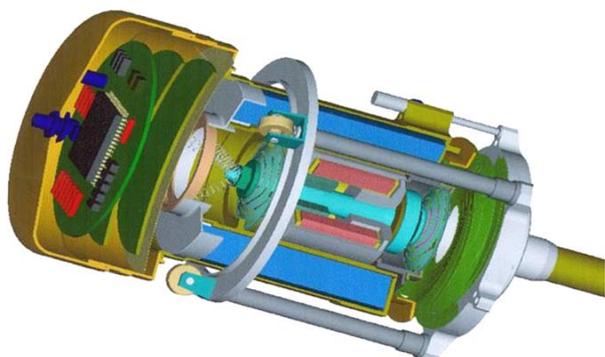


Рисунок 9. Электромагнитный молоток

Контейнер для образцов грунта выполнен в виде тонкостенного стакана из титанового сплава. Максимальный наружный диаметр контейнера 16 мм, длина 40 мм. Контейнер закреплен к устройству внедрения механизмом отделения.

Механизм отделения служит для сброса контейнера с образцами грунта в капсулу и выполнен в виде пережигавшей чеки. При подаче напряжения на сопротивление происходит нагрев последнего и пережигание синтетической нити, крепившей контейнер к устройству внедрения. Пружина отталкивает контейнер от устройства в грунтоприемник. После сброса контейнера появляется доступ к керну на устройстве внедрения.

Керн предназначен для дробления твердых образований пород и замера температуры.

Повышение надежности методов забора грунта и его доставки на Землю обеспечивается проведением испытаний в полном объеме по отработке забора грунта, грунтоперегрузки. Сюда входят:

- автономные испытания всех элементов ГЗК;
- комплексные испытания ГПУ по перегрузке контейнера в СА, отстрелу тракта, расчеховке манипуляторов;
- комплексные испытания манипуляторов по отработке оптимальных траекторий и использованию максимальных возможностей манипуляторов;
- комплексные испытания манипуляторов с СТЗ по отработке наведения и забора грунта и выгрузки в грунтоприемники ГПУ и научных приборов.

#### 4 Система технического зрения

Система технического зрения (СТЗ) предназначена для получения визуальной информации при заборе образцов грунта, поиску и определению координат консолидированных фрагментов, получения изображения грунта в естественном залегании с различным разрешением.

В состав системы технического зрения входят:

- панорамная камера на манипуляторе;
- стереокамера на блоке электроники;
- микроскоп-спектрометр с очистителем на манипуляторе ИКИ РАН;
- блок электроники с функциями получения, хранения, обработки и передачи видеoinформации.

Общая электрическая схема манипуляторного комплекса и системы технического зрения представлена на рисунке 10.

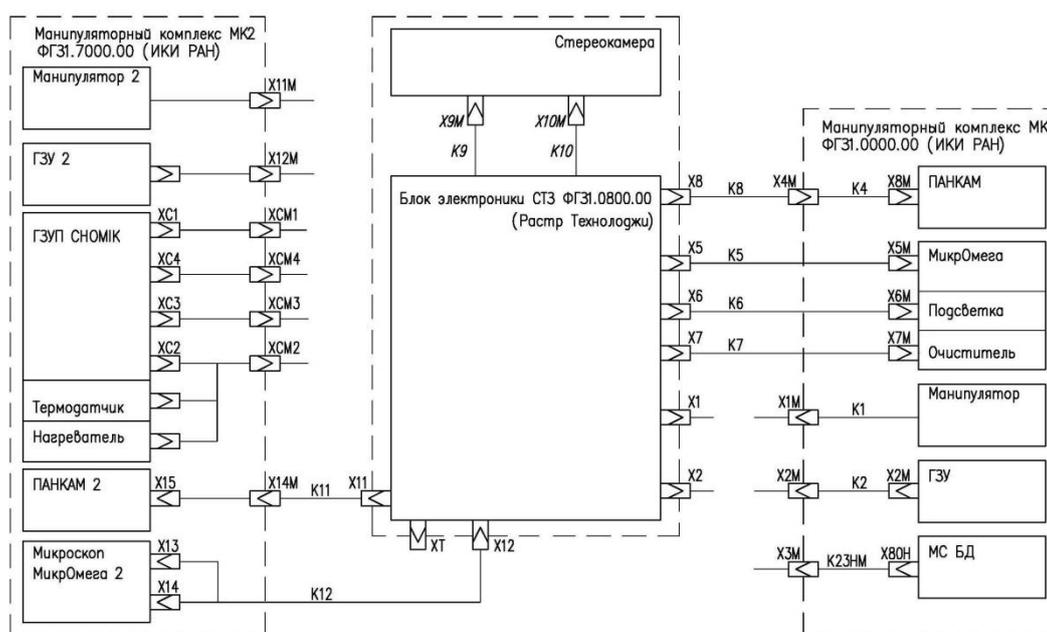


Рисунок 10. Общая электрическая схема манипуляторного комплекса и системы технического зрения

### 5 Грунтоперегрузочное устройство

Грунтоперегрузочное устройство (ГПУ) космического аппарата предназначено для закрытия контейнера крышкой после загрузки грунта, перемещения контейнера из транспортного, загрузочного положения в спускаемый аппарат, возвращаемый на Землю (рисунок 11).



Рисунок 11. Грунтоперегрузочное устройство

ГПУ функционально состоит из двух устройств: устройства закрытия контейнера крышкой и устройства перемещения контейнера в спускаемый аппарат.

Для обеспечения необходимого температурного режима на ГПУ установлены ЭВТИ, нагреватели и температурные датчики. Поворотные механизмы закрыты стеклотекстолитовыми кожухами. Масса ГПУ 14 кг.

### 6 Система управления грунтозаборным комплексом

Управление грунтозаборным комплексом обеспечивается бортовым вычислительным комплексом БВК ПМ.

Основными устройствами, обеспечивающими управление ГЗК, в составе БВК ПМ являются ЦВМ22 и адаптеры связи АС1А и АС17 (рисунки 12, 13). Часть функций, имеющих отношение к управлению ГЗК (подрыв пиропатронов, электрическое включение приборов ГЗК), реализуется с помощью других адаптеров связи в составе БВК ПМ, основной задачей которых является взаимодействие с другими научными и служебными системами КА.

В части управления ГЗК БВК ПМ осуществляет следующие функции:

- выполняет электрическое включение/выключение приборов в составе ГЗК;

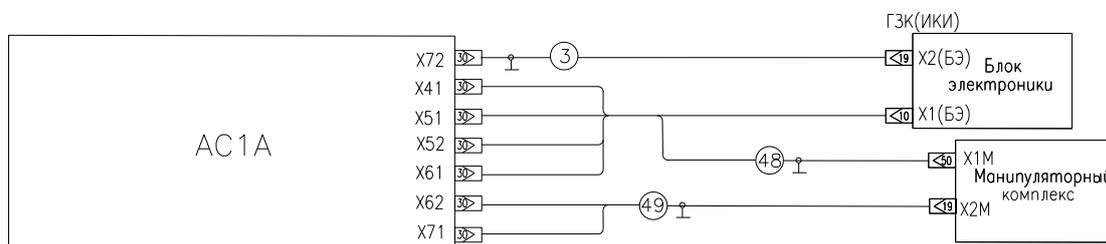


Рисунок 12. Электрическая схема подключения МК и блока электроники СТЗ

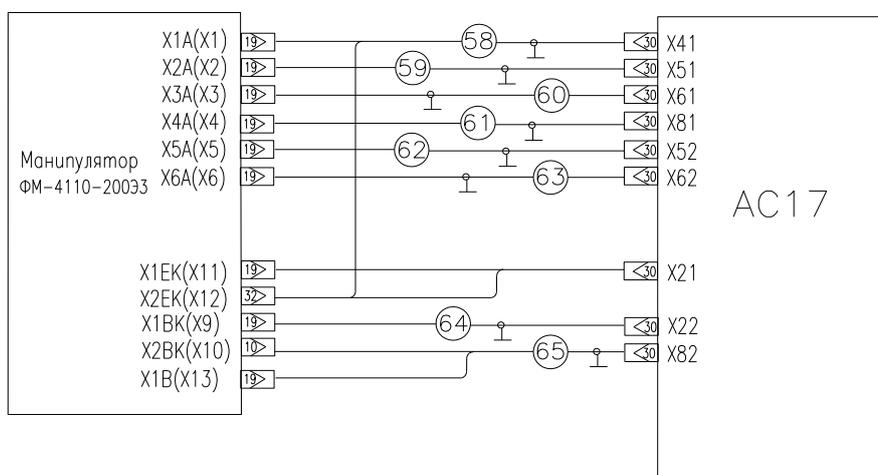
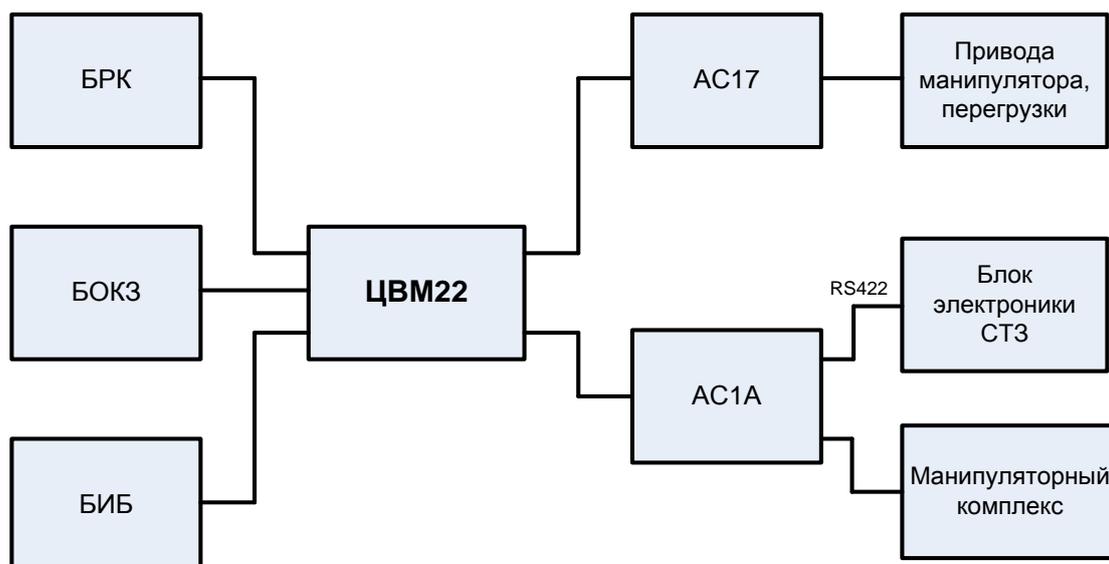


Рисунок 13. Электрическая схема подключения манипулятора



ЦВМ22 – центральная вычислительная машина; БРК – бортовой радиокомплекс; БОКЗ – блок определения координат звезд; БИБ – блок инерционный бесплатформенный; АС17; АС1А – адаптеры связи; СТЗ – система технического зрения.

**Рисунок 14. Структурная схема аппаратных средств, участвующих в реализации алгоритмов забора грунта**

- выдает команды управления на блок подрыва пиропатронов для активизации перечисленных выше электромеханических устройств;
- реализует один из типовых алгоритмов грунтозабора;
- формирует для передачи на Землю телеметрическую информацию о работе алгоритмов грунтозабора и технических средств ГЗК;
- исполняет получаемые с Земли команды настройки алгоритмов грунтозабора и режимов функционирования технических средств ГЗК.

Структурная схема аппаратных средств, участвующих в реализации алгоритмов забора грунта, показана на рисунке 14.

Разработанные методы и средства обеспечения грунтозабора гарантируют выполнение основной задачи экспедиции – доставки образцов грунта на Землю. Проведенные испытания позволили выбрать оптимальную конструкцию ГЗК.

#### Список литературы

- 1 CHOMIK – Sampling Device of Penetrating Type for Russian Phobos Sample Return Mission / K. Seweryn [et al.]. Cospar, 2010.



**СИМОНОВ**

**Александр Владимирович**  
заместитель начальника  
отдела ФГУП «НПО им.  
С.А.Лавочкина»  
E-mail: alex.simonov  
@laspace.ru



**МОРСКОЙ**

**Игорь Михайлович**  
начальник отдела ФГУП  
«НПО им. С.А.Лавочкина»  
E-mail: morskoy @laspace.ru



**СТЕПАНЬЯНЦ**

**Виктор Аркадьевич**  
ведущий научный сотрудник  
ИПМ РАН им. М.В. Келдыша,  
кандидат физико-  
математических наук  
E-mail: vic-stepan  
@rambler.ru



**ТУЧИН**

**Андрей Георгиевич**  
заведующий сектором  
ИПМ РАН им. М.В. Келдыша,  
кандидат физико-  
математических наук  
E-mail: tag@kiam1.rssi.ru

УДК 629.78.015

## БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛЕТА КА «ФОБОС-ГРУНТ»

*А.В. Симонов, И.М. Морской, В.А. Степаньянц, А.Г. Тучин*

*В статье приведено краткое описание схемы полета космического аппарата «Фобос-Грунт». Даны основные баллистические характеристики условий полета КА на всех этапах полета и их временные рамки.*

*Ключевые слова: схема полета; траектория; межпланетный перелет; межорбитальные переходы.*

***BALLISTIC FLIGHT PROFILE OF «PHOBOS-GRUNT» SC A.V. Simonov, I.M. Morskoy, V.A. Stepanyants, A.G. Tuchin.***

*The article covers concise description of «Phobos-Grunt» SC mission profile. The article gives main ballistic characteristics of SC flight environment during all mission phases and their timetable.*

*Key words: mission profile; trajectory; interplanetary flight; interorbital transfers.*

Схема экспедиции включает в себя следующие этапы:

- старт и выведение космического аппарата (КА) на отлетную от Земли траекторию;
- перелет Земля-Марс с проведением коррекций межпланетной траектории;
- торможение и выход на начальную трехсуточную орбиту искусственного спутника Марса (ИСМ), проведение одной-двух малых коррекций, отделение блока маршевой двигательной установки (МДУ) и переходной фермы, отделение китайского спутника YunHo-1 (YH-1);
- поэтапное сближение орбиты КА с орбитой Фобоса до расстояний, позволяющих осуществить посадку;

- посадка на поверхность Фобоса, взятие проб грунта;
- взлет возвращаемого аппарата (ВА) вместе со спускаемым аппаратом (СА) с Фобоса и полет по круговой базовой орбите ИСМ;
- переход ВА на высокоапогейную стартовую орбиту ИСМ;
- разгон со стартовой орбиты к Земле;
- перелет Марс-Земля с проведением до пяти коррекций;
- разделение СА и ВА примерно за 2 часа до входа в атмосферу;
- вход в атмосферу Земли и посадка;
- поиск и эвакуация СА с образцами грунта Фобоса.

## 1 Выведение на отлетную траекторию

Запуск КА «Фобос-Грунт» производится с космодрома Байконур по трассе, соответствующей наклону 51,4 град. Выведение включает в себя следующие этапы:

- старт и выведение КА при помощи двух ступеней РН «Зенит-2SLБ» на опорную орбиту ИСЗ с высотой перигея 207 км и апогея и 347 км, отделение КА и начало его самостоятельного полета;

- пассивный полет в течение ~2.5 часов по опорной орбите (~1.7 витка) с проведением внешнетраекторных измерений (ВТИ) и приемом телеметрической информации (ТМИ);

- первое включение МДУ с использованием топлива из сбрасываемого блока баков (СББ) и отработка в течение ~8.4 минут характеристической скорости ~0.83 км/с для перехода на промежуточную орбиту с периодом обращения 2.1 часа, высотой апогея 4250 км и высотой перигея 237 км; отделение СББ;

- пассивный полет по промежуточной орбите в течение ~4.2 часа (около двух витков) с проведением ВТИ и приемом ТМИ;

- второе включение МДУ и отработка в течение ~8.5 минут характеристической скорости ~1.105 км/с для выхода на вторую промежуточную орбиту с

- периодом обращения 5.2 часа и высотой апогея 17.5 тысяч км;

- пассивный полет в течение ~7 суток (~30 витков) по второй промежуточной орбите, на которой производятся ВТИ и закладывается

командно-программная информация (КПИ) на финальный отлетный маневр;

- третье включение МДУ, реализующее гиперболическую траекторию отлета от Земли с требуемой асимптотической скоростью ( $\leq 3.1$  км/с), проведение траекторных измерений для определения параметров сформированной траектории отлета.

## 2 Полет к Фобосу

### 2.1 Перелет Земля-Марс

Перелет Земля-Марс начинается с момента выхода КА на отлетную от Земли траекторию и завершается подлетом к Марсу на минимальное расстояние. Длительность перелета составляет 302 – 310 дней.

На межпланетном участке перелета планируется провести три коррекции. Первая коррекция проводится на 5-10-е сутки полета, она может достигать 85 м/с. Вторая коррекция проводится примерно на 65-е сутки полета, ее величина не превысит 10 м/с. Третья коррекция проводится за 4 – 2 недели до подлета к Марсу и может достигать 35 м/с. Выбранные для экспедиции характеристики перелетных траекторий, представлены в таблице 1.

### 2.2 Полет в сфере действия Марса, сближение с Фобосом

Околomarсианская часть экспедиции состоит из этапов, перечисленных в таблице 2. Там же приведены данные по их временным рамкам и продолжительности. Следует отметить, что при планировании длительности этапов учитывались требования по проведению научных экспериментов.

Таблица 2 - Основные параметры траекторий перелета Земля-Марс

Параметр	Значение
Стартовое окно	28 октября - 21 ноября 2011 г.
Длительность полета до Марса	Около 10 месяцев
Прилет к Марсу	25 августа - 26 сентября 2012 г.
Асимптотическая скорость отлета от Земли	$\leq 3,1$ км/с
Склонение вектора асимптотической скорости отлета к экватору Земли	$\leq 40^\circ$
Асимптотическая скорость подлета к Марсу	$\leq 2,8$ км/с
Склонение вектора асимптотической скорости подлета к экватору Марса	$\leq 30^\circ$

Таблица 3 - Основные околомарсианские этапы полета

Этап полета	Начало и окончание этапа
Прилет к Марсу, выход на начальную орбиту	25 августа – 26 сентября 2012 г.
Полет по начальной и промежуточной орбите	Сентябрь – октябрь 2012 г.
Полет по орбите наблюдения	Октябрь 2012 г. – январь 2013 г.
Полет по квазисинхронной орбите вблизи Фобоса	1 месяц в январе – феврале 2013 г.
Посадка на Фобос (длительность нахождения на поверхности 8...16 часов)	Февраль 2013 г.
Полет по базовой орбите	Апрель – начало августа 2013 г.
Полет по переходной орбите	Начало – середина августа 2013 г.
Полет по предстартовой орбите	Середина августа – сентябрь 2013 г.
Переход на отлетную траекторию возврата к Земле	3-23 сентября 2013 г.

**Теория орбитального движения Фобоса.** Выполнение динамических операций, обеспечивающих сближение и посадку на Фобос, предъявляет высокие требования к точности знания взаимного положения КА и Фобоса. Такая точность достигается путем последовательного уменьшения ошибок определения орбитального движения Фобоса по мере поступления результатов новых измерений.

В ИПМ им. М.В. Келдыша построена высокоточная адаптивная теория орбитального движения Фобоса. Разработаны алгоритмические средства, позволяющие уточнять параметры теории по данным оптических измерений углового положения Фобоса, поступающих с борта КА, пролетающих вблизи Фобоса, а также по данным траекторных измерений дальности и радиальной скорости этих КА, проводящихся с наземных станций слежения. В число уточняемых параметров, наряду с орбитальными параметрами движения Фобоса, могут быть включены орбитальные параметры и параметры маневров КА.

В настоящее время проведено уточнение векового ускорения Фобоса и гравитационной постоянной этого небесного тела. Теория базируется на всех имеющихся на данный момент наблюдениях Фобоса: оптических наблюдениях с Земли на мерном интервале в 128 лет; телевизионных и лазерных наблюдениях Фобоса с борта российских, американских и европейских околомарсианских космических аппаратов; наземных высокоточных радиотехнических траекторных измерениях КА, содержащих информацию о гравитационном влиянии Фобоса на движение КА [1; 6]. Выполнена работа по сбору всей этой измерительной информации, ее анализу и отбору качественной части, приведению измерений к современным единым системам координат и шкалам времени. Выполнено математическое моделирование

всех видов измерений. Расчет движения Фобоса и КА проводится численно в рамках единой высокоточной модели движения с учетом всех необходимых возмущений в правых частях дифференциальных уравнений, описывающих движение этих тел. Используются последние наиболее точные астрономические постоянные и эфемериды небесных тел. Выполнены оценки точности теории и сравнение ее результатов с результатами других авторов, показавшее хорошее согласование. Предельная ошибка прогнозирования положения Фобоса на момент сближения с КА составляет величину 15 км. Эфемерида Фобоса, полученная с помощью теории, обеспечивает необходимую точность навигации КА. Она использована в проектных расчетах и будет задействована в ходе осуществления проекта при управлении движением КА «Фобос-Грунт» вплоть до его выхода на орбиту наблюдения вокруг Марса. Далее теория будет уточняться в ходе полета по данным бортовых и наземных траекторных измерений.

**Формирование орбиты наблюдения.** В районе перицентра подлетной траектории включается МДУ, и КА переходит на трехсуточную орбиту ИСМ, именуемую далее «начальной». Высота перицентра этой орбиты составит  $\sim 800 \pm 400$  км, а высота апоцентра – 79 тыс. км. Отклонение периода обращения от расчетного может достигать  $\pm 6$  часов. Величина тормозного импульса составит 945 м/с. Длительность работы МДУ при его выдаче составляет  $\sim 2.2$  мин.

После выхода на начальную орбиту ИСМ МДУ может быть отделена от КА, что создает условия для последующего отделения спутника УН-1. После отделения МДУ и КС все последующие маневры проводятся с помощью двигательной установки (ДУ) перелетного модуля.

Схема подлетного участка и начального этапа пребывания на орбите ИСМ показана на рисунке 1, схе-

ма выхода на орбиту наблюдения приведена на рисунке 2.

После принятия решения о переводе КА на переходную орбиту в апоцентре начальной орбиты производится второй маневр на ДУ ПМ, которым плоскость орбиты КА совмещается с плоскостью орбиты Фобоса, а радиус перигея поднимается до радиуса орбиты наблюдения (~ 9.91 тыс. км). Характеристическая скорость маневра составляет 220 м/с, а

длительность работы ДУ – 4.8 мин. Период обращения полученной орбиты составит 3.3 суток.

Третьим маневром в перигея переходной орбиты КА переводится на орбиту наблюдения (почти круговая орбита со средним радиусом 9.91 тыс. км, что примерно на 535 км выше орбиты Фобоса). Импульс маневра равен 705 м/с, длительность работы ДУ – 12.3 мин. Период обращения орбиты наблюдения составляет 8.3 часа.

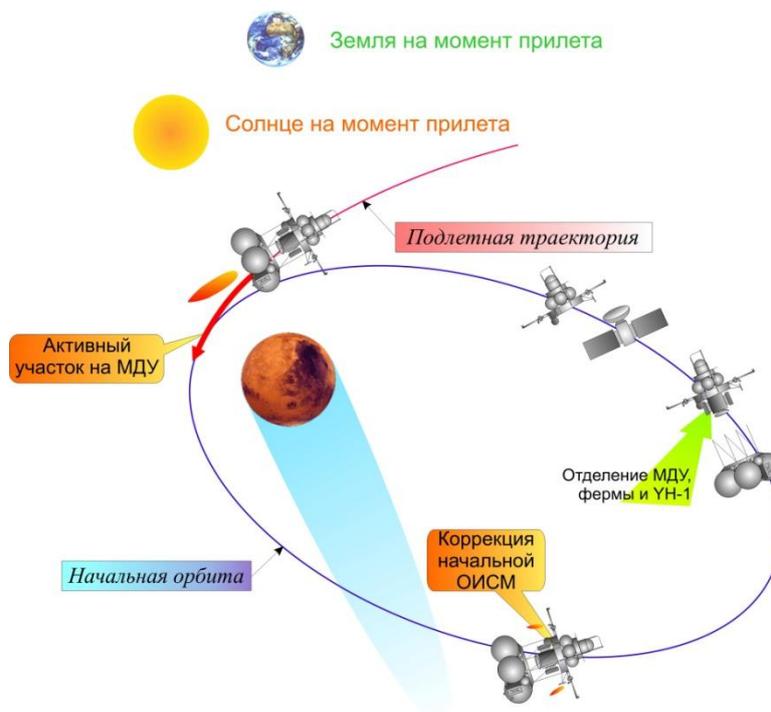


Рисунок 1. Схема начального этапа полета по орбите ИСМ

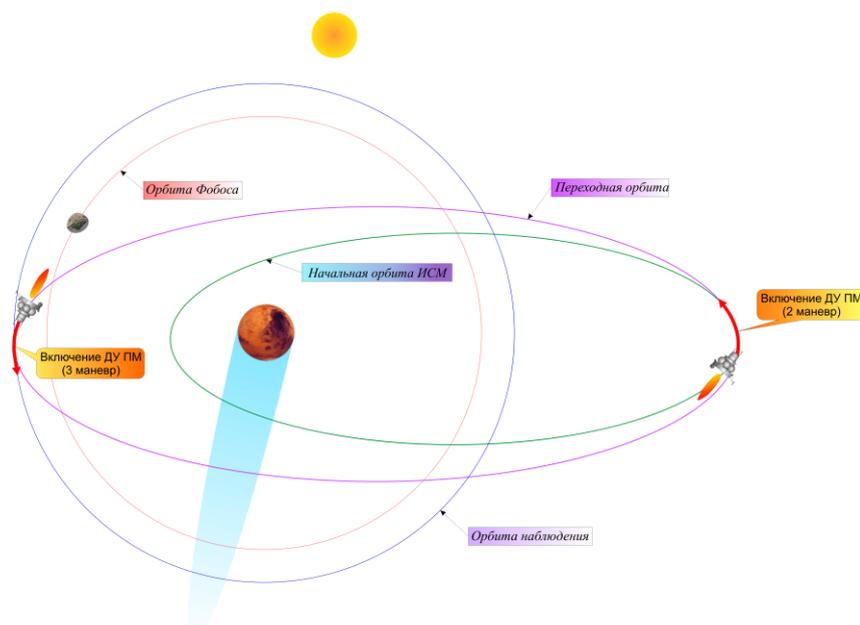


Рисунок 2. Схема проведения маневров для выхода на орбиту наблюдения

**Полет по орбите наблюдения.** На орбите наблюдения (ОН) начинаются автономные навигационные наблюдения Фобоса, поскольку априорная точность знания его эфемерид ( $3\sigma$  составляет почти 20 км) является недостаточной для дальнейшего сближения орбиты КА с орбитой Фобоса, и тем более для посадки на его поверхность. Навигационные измерения проводятся с помощью бортовой ТВ-камеры на тех участках ОН, где это позволяют сделать условия освещенности и где расстояние от КА до Фобоса не превышает 1500 км. Для уточнения эфемерид Фобоса и его гравитационной постоянной необходимо провести навигационные измерения не менее чем в трех сближениях, на что может потребоваться почти месяц. Поэтому минимально необходимое время полета КА по ОН составляет 1.5 месяца. Проведение навигационных наблюдений с борта КА дополняется высокоточными траекторными измерениями орбиты КА с Земли. В результате совместной обработки всей навигационной информации взаимное движение КА и Фобоса перед переходом на более близкую к Фобосу квазисинхронную орбиту будет прогнозироваться с предельными ошибками  $\pm 3$  км.

**Формирование предпосадочной квазисинхронной орбиты.** Для непосредственного сближения КА с Фобосом и обеспечения автономной системы посадки высокоточными навигационными и баллистическими данными выбрана квазисинхронная орбита (КСО). Особенность этой орбиты – небольшая дальность (не более 70 км) КА от Фобоса на всем интервале полета, что позволяет повысить разрешение телевизионных снимков и, следовательно, увеличить точность измерения линии визирования КА – Фобос.

Для выбора КСО было проведено исследование траектории КА в ограниченной задаче трех тел: Марс, Фобос и КА. В результате было построено множество КСО, обеспечивающее посадку на любой долготе и, при необходимости, возможность повтора посадки [1;2;3;5]. Из условий освещенности, обеспечения радиосвязи со станциями слежения и других условий выбирается время посадки в заданную точку. Точка и время посадки определяют точку и момент схода с КСО, которые являются исходными данными для расчета этой орбиты. Переход на нее осуществляется двумя импульсами: 36 и 30 м/с.

Во время полета на КСО будут проводиться важные научные эксперименты. Планируемое время полета на КСО составляет 30 суток.

### **2.3 Сближение и посадка на Фобос**

Посадка КА на Фобос проводится автономно. Для обеспечения условий посадки КА должен быть приведен в точку, которая находится на высоте не более 60 км над предполагаемым районом посадки. При

подготовке КА к посадке и в ходе посадки должны быть выполнены следующие требования:

- за несколько суток до начала сеанса посадки должно быть получено телевизионное изображение района посадки;
- угол Солнце – Фобос – КА должен находиться в диапазоне от  $20^\circ$  до  $70^\circ$  в течение сеанса посадки;
- совместная радиовидимость КА со станций слежения в Уссурийске и Медвежьих Озерах;
- радиовидимость Земли в допустимом диапазоне углов привода остронаправленной антенны (ОНА);
- прогноз движения КА относительно Фобоса на момент схода с КСО с ошибками, не превосходящими 3 км по положению и 1 м/с по скорости;
- до начала сеанса посадки должна быть проверена работоспособность основных бортовых систем, обеспечивающих посадку;
- обеспечена возможность повторения сеанса посадки, если не был начат маневр схода с КСО.

Для управления движением при посадке используются следующие измерительные средства:

- бесплатформенный инерциальный блок (БИБ);
- звездный прибор (БОКЗ-МФ);
- лазерный высотомер (ЛВ);
- доплеровский измеритель скорости и дальности (ДИСД);
- телевизионная система.

Схема посадки на Фобос предполагает использование траектории, состоящей из четырех участков:

- схода с КСО;
- перелета с КСО в точку, расположенную над районом посадки;
- вертикального спуска;
- прецизионного торможения.

Участок перелета с КСО в точку, расположенную над районом посадки, начинается с маневра схода с КСО и завершается в момент попадания в заданную точку. В ходе перелета предусмотрены коррекции траектории.

При движении КА на участке вертикального спуска используется простейший метод компенсации горизонтальной составляющей скорости. Если она превосходит пороговое значение, включается двигатель, который её компенсирует. При этом в горизонтальной плоскости накапливается ошибка по положению. Поэтому скорость спуска должна быть достаточно велика, чтобы за время спуска не накопилась большая величина ошибки.

На участке прецизионного торможения постепенно гасится вертикальная составляющая скорости до величины, с которой допускается соприкосновение с поверхностью: 1.5 – 2 м/с. При этом боковая состав-

ляющая вектора скорости не должна превосходить 1 м/с.

Участок сближения КА с Фобосом, спуска и посадки аппарата на его поверхность является важнейшей частью проекта «Фобос-Грунт». Для обеспечения необходимой надежности осуществления этих операций на этапе рабочего проектирования проведена совместная работа ИПМ и НПО им. С.А. Лавочкина по созданию алгоритмов навигации и управления движением КА, по математическому моделированию работы КА и его систем на этом ответственном участке полета. Контур моделирования включает математические модели измерительных приборов (ЛВ, ДИСД, БИБ, БОКЗ-МФ) и исполнительных элементов (ДУ и привод ОНА), высокоточные модели движения центра масс (ЦМ) КА и Фобоса, модели движения Фобоса и КА около ЦМ. Разработан стенд с макетом бортового вычислительного комплекса (БВК) и динамическим моделированием среды в замкнутых контурах навигации и управления движением посадочного модуля [4].

### 3 Возвращение на Землю

#### 3.1 Старт с Фобоса

Взлет и выход ВА на базовую орбиту ИСМ осуществляется по следующей схеме:

1. В период нахождения ВА на поверхности Фобоса уточняются ориентация его продольной оси и, по возможности, координаты точки посадки. Соответствующие данные передаются на Землю.

2. В заданное время ВА отделяется от ПМ в направлении своей продольной оси со скоростью  $\sim 1$  м/с и начинает пассивный полет с сохранением начальной ориентации продольной оси, стабилизируясь с помощью двигателей стабилизации (ДС).

3. Через 50-60 с пассивного стабилизированного полета включается ДУ ВА, с помощью которой в течение  $\sim 16$  с производится доразгон в том же направлении до скорости  $\sim 10$  м/с.

4. Пассивный полет (стабилизированный в том же направлении) в течение 1000 с до удаления от поверхности Фобоса на расстояние  $\sim 10$  км.

5. Выполняется поиск Солнца, и осуществляется приведение продольной оси на него.

6. В течение  $\sim 32$  с строго в направлении на Солнце выдается импульс скорости на ДУ ВА величиной 20 м/с, после которого ВА оказывается на промежуточной орбите, именуемой далее взлетной, которая касается орбиты Фобоса в точке взлета, а в противоположной точке отстоит от нее на 300-350 км. Начиная с выхода на эту орбиту и далее, за исключением кратковременных периодов, когда проводятся активные маневры и коррекции, ВА совершает полет, ориентируясь продольной осью +X на Солнце. На взлетной орбите ВА может находиться до 10 суток, по истечении которых появляется большая вероятность столкновения с Фобосом, поэтому до этого времени он должен быть переведен на базовую орбиту.

7. Пассивный полет в течение примерно трех суток, в процессе которого устанавливается связь Земли с ВА, производятся траекторные измерения, уточняются параметры полученной орбиты ИСМ, рассчитывается и закладывается КПИ на проведение следующего маневра для завершения выведения на базовую орбиту.

8. В расчетное время ВА разворачивается в требуемом направлении, и выдается импульс величиной  $\sim 20$  м/с, после которого ВА оказывается на базовой орбите и вновь переходит в солнечную ориентацию.

С учетом места посадки КА (на тыльную сторону Фобоса) в качестве базовой орбиты выбрана круговая орбита, высота которой на 300-350 км ниже высоты орбиты Фобоса, а период обращения составляет 7.23 часа, т.е. примерно на 26 минут меньше периода орбиты Фобоса.

#### 3.2 Переход на возвратную траекторию и перелет Марс-Земля

Ближайшее после прилета к Марсу стартовое окно для возврата на Землю приходится на сентябрь 2013 года. Время перелета Марс-Земля составляет 11-11.5 месяцев, прилет к Земле происходит с 15 по 18 августа 2014 года. В таблице 3 приведены основные характеристики возвратных траекторий.

Таблица 3 - Основные параметры траекторий перелета Марс-Земля

Параметр	Значение
Стартовое окно	3-23 сентября 2013 г.
Длительность перелета	Около 11 месяцев
Прилет к Земле	23 августа 2014 г.
Асимптотическая скорость отлета от Марса	$\leq 2,5$ км/с
Склонение вектора асимптотической скорости отлета к экватору Марса	$0 \dots - 4^\circ$
Асимптотическая скорость подлета к Земле	$\leq 4,5$ км/с
Склонение вектора асимптотической скорости подлета к экватору Земли	$\leq 27^\circ$
Абсолютная скорость входа в атмосферу Земли	$\leq 12,1$ км/с

Переход ВА с базовой орбиты на траекторию полета к Земле, как и выход на орбиту наблюдения, производится по трехимпульсной схеме, но только в обратной последовательности. Он включает в себя следующие элементы:

- разгон с помощью ДУ ВА на переходную трехсуюточную орбиту с радиусом перицентра, равным радиусу базовой орбиты, линией апсид, лежащей в плоскости орбиты Фобоса, и наклоением к этой плоскости примерно 1 град;
- пассивный полет по переходной орбите (не менее ~ 5 витков или ~15 суток) с проведением траекторных измерений с Земли и уточнением ее параметров;
- апогейный маневр с помощью ДУ ВА для понижения высоты перицентра до 1000-500 км и изменение наклоения до значения, требуемого для последующего разгона к Земле (эта орбита именуется предстартовой);

– пассивный полет по предстартовой орбите (также не менее ~5 витков или ~ 15 суток) с проведением траекторных измерений с Земли и уточнением ее параметров;

– разгон в выбранную дату на траекторию отлета к Земле, начало полета возвращаемого аппарата к Земле.

Схема отлетного участка показана на рисунке 3.

Суммарная характеристическая скорость перехода с базовой орбиты на траекторию возврата к Земле для всего стартового окна составляет 1630 м/с, в том числе: 1-й импульс 740 м/с, 2-й импульс 140 м/с, 3-й импульс 760 м/с.

Навигация на возвратной траектории должна обеспечить прямой вход в атмосферу Земли и посадку в заданном районе с последующим поиском и эвакуацией СА. Для решения этой задачи на трассе перелета потребуются провести пять пространственных коррекций. Суммарный импульс коррекций не превысит 140 м/с.

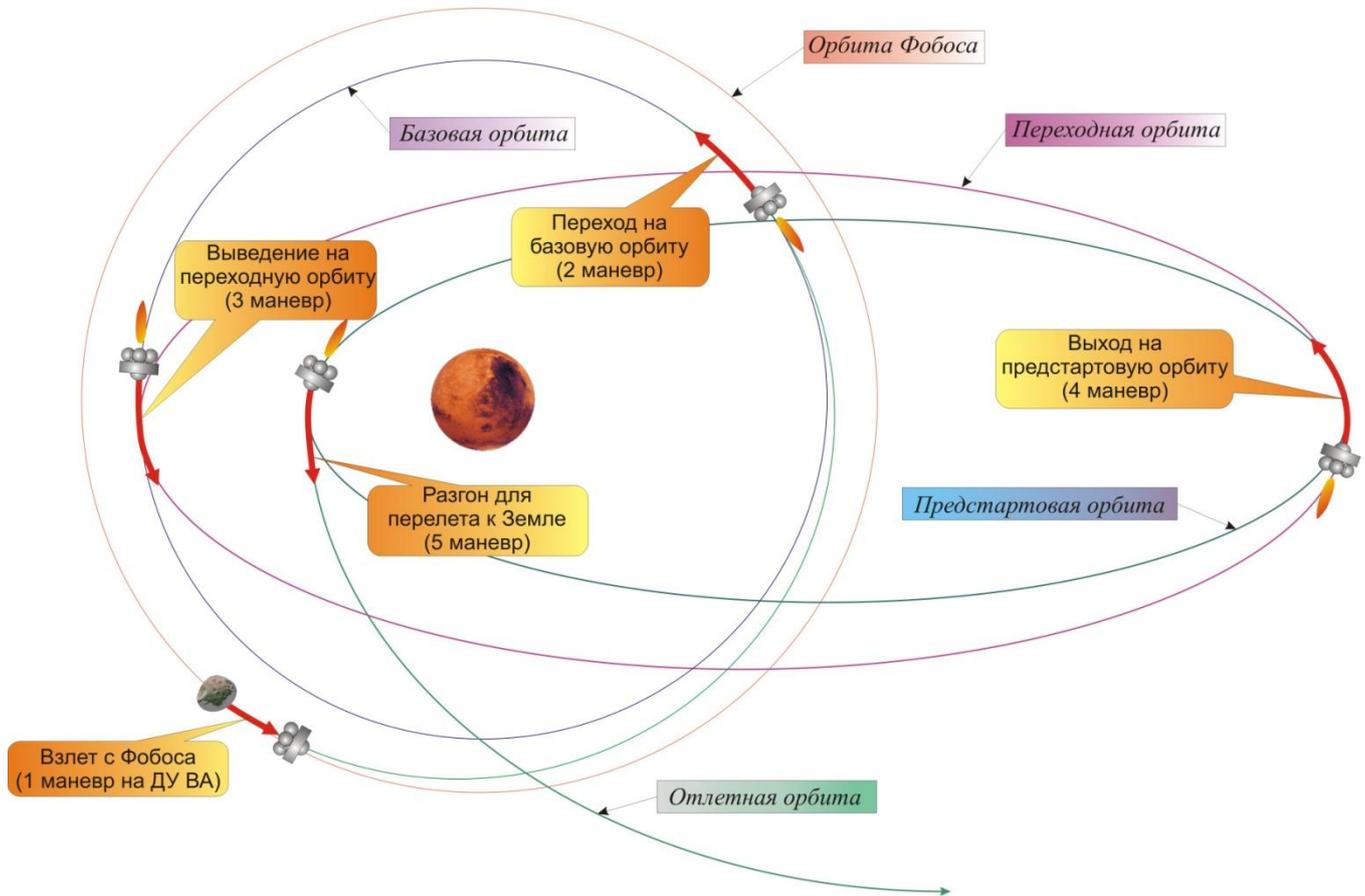


Рисунок 3. Схема выхода на траекторию полета к Земле

### 3.3 Полет в сфере действия Земли. Условия посадки и поиска СА

Полет в сфере действия Земли длится около трех суток и происходит по гиперболической траектории. Посадка СА будет производиться на 10-й испытательный полигон «Сары-Шаган». В качестве расчетной точки посадки предварительно принята точка в середине участка этого полигона с координатами:  $46^{\circ}15'$  с.ш. и  $72^{\circ}10'$  в.д. В соответствии с проведенными ранее проработками конструкции СА угол его входа в атмосферу Земли на высоте 120 км может выбираться в пределах 33-45 град. При этих углах входа скорость входа не будет превышать 12.1 км/с.

#### Заключение

Разработанная схема полёта удовлетворяет всем требованиям и ограничениям, предъявляемым к функционированию КА «Фобос-Грунт», и обеспечивает возможность успешного осуществления экспедиции.

#### Список литературы

1 Доставка на землю реликтового вещества с Фобоса – проект «Фобос-Грунт». Баллистика, навигация и

управление полётом / Э.Л. Аким [и др.] // *Астрономический вестник*, 2010. Т. 44, № 1. С. 29-40.

2 Тучин А.Г. Квазисинхронные орбиты и их использование для сближения космического аппарата с Фобосом // *Космические исследования*, 2007. Т. 45, № 2. С. 144-149.

3 Тучин А.Г. Проектирование квазисинхронных орбит космического аппарата вокруг Фобоса для решения задачи посадки на его поверхность // *Космические исследования*, 2008. Т. 46, № 6. С. 536-546.

4 Баллистика, навигация и управление движением КА на этапе его посадки на поверхность Фобоса / Э.Л. Аким [и др.] // *Космические исследования*, 2009. Т. 47, № 4. С. 332-342.

5 Баллистика, навигация и управление полётом космического аппарата в проекте «Фобос-Грунт» / Э.Л. Аким [и др.] // *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2002. № 5. С. 153-161.

6 Шишов В.А. Определение параметров движения КА и Фобоса в проекте «Фобос-Грунт» // *Астрономический вестник*, 2008. Т. 42, № 4. С. 341-350.

УДК 629.78.047:614.48:629.787:523.43 «Фобос-Грунт»

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛИТИКИ ПЛАНЕТАРНОЙ ЗАЩИТЫ КОСПАР В ЭКСПЕДИЦИИ «ФОБОС-ГРУНТ»

*Н.М. Хамидуллина*



**ХАМИДУЛЛИНА**

**Наталья Мугалимовна**

начальник отдела ФГУП «НПО  
им. С.А. Лавочкина», кандидат  
физико-математических наук

E-mail: nmx@laspace.ru

*Статья содержит описание мероприятий по реализации политики планетарной защиты КОСПАР при подготовке экспедиции «Фобос-Грунт». Полученные результаты позволяют сделать важный вывод о том, что требования КОСПАР по защите Марса от загрязнения земными микроорганизмами и защите Земли от предполагаемой опасности при возвращении инопланетного грунта выполнены.*

*Ключевые слова: планетарная защита; надежность; вероятность безотказной работы; микробиологическое загрязнение; категория экспедиции.*

### **REALIZATION OF COSPAR PLANETARY PROTECTION POLICY IN «PHOBOS-GRUNT» MISSION N.M. Khamidullina.**

*The article provides definition of activities aimed at COSPAR Planetary Protection Policy realization in «Phobos-Grunt» mission. The obtained results confirm that COSPAR requirements for Mars protection against Earth microbe contamination, and Earth protection against supposed hazards due to delivery of alien soil samples, are met.*

*Key words: planetary protection; reliability; probability of no-failure; microbiological contamination; mission category.*

Основой политики планетарной защиты Комитета по космическим исследованиям (КОСПАР) при осуществлении межпланетных экспедиций является безусловное требование защиты исследуемых планет Солнечной системы и Земли от биологического загрязнения (статья IX Договора по дальнему космосу, Лондон/Вашингтон, 27.01.67 г.). КОСПАР разработал классификацию экспедиций, определил критерии и требования по планетарной защите [1], а также рекомендовал ряд мероприятий по их выполнению, см. таблицу 1. Основной целью всех мероприятий является защита планет от загрязнения земными микроорганизмами, а также защита Земли от возможного микробиологического загрязнения, исходящего от внеземных образцов грунта и/или от возвращаемых зондов (систем, подсистем КА и т.п.).

В настоящей статье приведены принципы политики планетарной защиты экспедиции «Фобос-Грунт» [2; 3], основной целью которой является доставка образцов грунта спутника Марса Фобоса на Землю, и изложены предпринятые меры по обеспечению защиты Марса и Земли.

Помимо выполнения основной задачи миссии и проведения широкого круга научных экспериментов, в программу полета включены биологические эксперименты «Био-Фобос» (РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова) и «Bio-LIFE» (Планетарное общество, США) по исследованию влияния дальнего космоса на земные микроорганизмы и их выживаемости в условиях открытого космического пространства, что также может дать определенную информацию об экологической безопасности космической техники.

Таблица 1 - Классификация КОСПАР (2002 г.) межпланетных экспедиций

Категории для тел Солнечной системы и типов экспедиций					
Тип и цель экспедиции	Категория I	Категория II	Категория III	Категория IV	Категория V
	Пролетные, орбитальные КА, посадочные аппараты (ПА): Венера, Луна, некоторые астероиды, др. тела (TBD - пер. с англ.: <i>в дальнейшем будет уточнено</i> )	Пролетные, орбитальные КА, ПА: кометы, углеродно-хондритные астероиды, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон, Харон, др. тела (TBD)	Пролетные, орбитальные КА: Марс, Европа, др. тела (TBD)	Миссии с ПА: Марс, Европа, др. тела (TBD). Подкатегории IVa, IVb и IVc	Любые миссии с возвратом на Землю. Подкатегории: 1. «Ограниченное возвращение на Землю» (возможная опасность при возвращении на Землю): с Марса, Европы, др. тел (TBD) 2. «Неограниченное возвращение на Землю» (отсутствие опасности при возвращении): с Луны, др. тел (TBD)
Требования к обеспечению планетарной защиты	Нет	Протокол (отчет) о планируемой вероятности столкновения и, возможно, некоторые меры по контролю микробиологической контаминации (загрязнения)	Ограничение вероятности нештатного столкновения КА или пассивный контроль бионагрузки	Ограничение вероятности нештатного столкновения КА. Ограничение бионагрузки (стерилизация и деконтаминация) ПА	В случае возможной опасности при возвращении на Землю: <ul style="list-style-type: none"> <li>• не допустить столкновения с Землей или Луной;</li> <li>• стерилизовать возвращенное оборудование;</li> <li>• изолировать в контейнере любые образцы</li> </ul>

Запуск КА «Фобос-Грунт» предполагается в ноябре 2011 г. Схема экспедиции включает в себя следующие этапы:

- выведение на отлетную от Земли траекторию;
- перелет Земля-Марс с проведением трех коррекций траектории;
- торможение и выход на начальную трехсуточную орбиту искусственного спутника Марса (ОИСМ), отделение маршевой двигательной установки (МДУ) и переходной фермы, проведение одной - двух малых коррекций, отделение китайского спутника УН-1;
- поэтапное сближение орбиты КА с орбитой Фобоса до расстояний, позволяющих осуществить посадку;

- посадка на поверхность Фобоса, взятие проб грунта;
- взлет с Фобоса и полет по круговой базовой орбите ИСМ;
- переход на высокоапогейную предстартовую орбиту ИСМ;
- разгон с предстартовой орбиты к Земле;
- перелет Марс-Земля с проведением до пяти коррекций;
- вход в атмосферу Земли и посадка;
- поиск и эвакуация спускаемого аппарата (СА) с образцами грунта Фобоса.

Перелетный модуль (ПМ) КА «Фобос-Грунт» представляет собой открытую платформу, на кото-

рой под негерметичной теплозащитной оболочкой установлены служебные бортовые системы, научные приборы, возвращаемая ракета со спускаемым на Землю аппаратом. Под перелетным модулем в направлении оси –  $X_{КА}$  расположен китайский КА УН-1.

Таким образом, исходя из цели экспедиции «Фобос-Грунт», необходимо решать две важные задачи: защита марсианской среды от возможного попадания земных микроорганизмов и защита Земли от потенциальной угрозы при доставке инопланетного грунта.

### **1 Планетарная защита Марса**

Согласно классификации КОСПАР [1] полет орбитального аппарата экспедиции «Фобос-Грунт» относится к категории III, для которой с целью защиты марсианской среды от земных микроорганизмов лимитируется вероятность разрушения (выхода из строя) КА и его падения на Марс.

Согласно критериям, установленным политикой КОСПАР по планетарной защите, должны выполняться следующие требования к вероятности попадания КА на Марс:

-  $\leq 0,01$  для первых 20 лет существования аппарата;

-  $\leq 0,05$  для последующих 30 лет.

Если КА не может удовлетворять заданным выше условиям, то лимитируется уровень микробиологической нагрузки КА, а именно: микробиологическое загрязнение свободных поверхностей орбитального аппарата на момент окончания сборки должно составлять не более 500 бактериальных спор на квадратный метр, а его полная биоагрузка не должна превышать  $5 \times 10^5$  бактериальных спор.

Такой уровень микробиологической чистоты достигается стерилизацией одних элементов аппарата и очисткой тех его элементов, для которых невозможно подобрать режим стерилизации без ухудшения их качества, с последующей сборкой в чистовом помещении с уровнем чистоты не хуже класса 8 в соответствии с ГОСТ ИСО 14644-1-2002 [4]. В применении к КА «Фобос-Грунт» принят первый подход - лимитируется вероятность разрушения КА и его падения (или его составных частей) в атмосферу Марса.

Таким образом, для решения задачи планетарного карантина Марса требуется тщательный расчет вероятности попадания КА в атмосферу Марса, основанный на сочетании расчета характеристик надежности КА на различных этапах экспедиции [5] и баллистического анализа траектории полета [6]. В работе [5] были подробно представлены методика и результаты расчета вероятности безотказной работы (ВБР) КА «Фобос-Грунт» на различных этапах миссии, основанные на использовании значения ВБР составных частей и бортовых систем, заданные в со-

ответствующих технических заданиях. Было показано, что ВБР КА, т.е. вероятность успешного выполнения этапа от старта с Земли до выхода на ОИСМ, составляет  $P = 0,99278$ .

Работа [6] содержит результат расчета вероятности входа (попадания) КА «Фобос-Грунт» и/или его составных частей в атмосферу Марса, полученный путем тщательного траекторного анализа КА и соединения этих данных с результатами оценки ВБР КА в [5].

Для запуска КА в 2011 г. выбраны стратегия наведения КА «Фобос-Грунт», состав, конструкция, аппаратура и двигательные установки КА, обеспечивающие должную вероятность безотказной работы всех подсистем и аппарата в целом, минимизирующие риск попадания КА на Марс. Результаты проведенных расчетов подтверждают этот выбор.

Вход КА и его составных частей в атмосферу Марса для принятой схемы полета возможен при отказе КА и дальнейшем пассивном полете в следующих случаях:

- 1) с межпланетной траектории;
- 2) в результате эволюции начальной орбиты ИСМ;
- 3) в случае ошибочного исполнения маневра перехода с начальной орбиты на переходную;
- 4) в случае ошибочного исполнения маневра перехода возвращаемого аппарата с переходной орбиты на предстартовую.

На остальных этапах вход в атмосферу Марса невозможен по следующим причинам:

- 1) отказ в работе КА на этапе выведения на межпланетную траекторию может привести только к входу в атмосферу Земли;
- 2) отказ в работе КА после выхода на орбиту наблюдения не приводит к входу в атмосферу Марса, т.к. эволюция круговой орбиты радиусом порядка 10 тыс. км под влиянием гравитационных возмущений от Солнца, Юпитера, нецентрального поля Марса и солнечного давления не приводит к понижению высоты перицентра до высот, сравнимых с высотой плотных слоев атмосферы;
- 3) попадание КА в атмосферу Марса при отказе в работе КА на околофобосных орбитах и при нахождении на поверхности Фобоса возможно только вместе с Фобосом;
- 4) попадание КА в атмосферу при отказе во время маневров, переводящих КА на переходную орбиту и траекторию перелета к Земле, невозможно, т.к. маневры проводятся в перицентрах орбит

Полученные в работе [6] результаты расчетов вероятности входа КА в атмосферу Марса на различных этапах приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Суммарная вероятность входа КА в атмосферу Марса

Этап полета, на котором возможен вход в атмосферу	Значение вероятности для 20 лет	Значение вероятности для 50 лет
С подлетной траектории	0.01%	0.01%
В результате эволюции начальной орбиты	0.03%	0.1%
При формировании переходной орбиты	0.05%	0.05%
При формировании предстартовой орбиты	0.05%	0.05%
Общая вероятность попадания КА в атмосферу Марса	0.14%	0.21%
<b>Вероятность того, что КА не попадет в атмосферу Марса</b>	<b>99,86%</b>	<b>99,79%</b>

Таким образом, в результате количественной оценки всех выявленных рисков, траекторного и надежного анализа этапов полета КА были получены следующие значения вероятности существования КА и непопадания его в марсианскую среду:

- для первых 20 лет полета КА  
99,86% > 99%,
- для 50 лет полета КА  
99,79% > 95%,  
(соответственно для последних 30 лет  
≥ 99,79% > 95%).

Полученные результаты позволяют сделать важный вывод о том, что требования КОСПАР по защите Марса от загрязнения земными микроорганизмами, которые могут быть занесены КА или его составными частями, в экспедиции «Фобос-Грунт» выполняются.

## 2 Планетарная защита Земли

Согласно классификации КОСПАР (см. таблицу 1) этап экспедиции по доставке грунта Фобоса на Землю в контейнере, расположенном на спускаемом аппарате (СА), подпадает под категорию V, к которой относятся любые экспедиции возврата на Землю.

В свою очередь, категория V делится на две подкатегории [1], отражающие степень опасности для Земли возвращаемых с других планет КА (или их составных частей):

1. Для аппаратов, возвращающихся с тел Солнечной системы, на которых отсутствуют местные формы жизни, определена подкатегория «Неограниченное возвращение на Землю» (*unrestricted Earth return*), т.е. фактически это безопасные для Земли экспедиции возвращения. К таким экспедициям относится возврат грунта или КА с Луны, малых космических тел и др. TBD.

2. Миссии возврата с Марса, Европы и др. (TBD)

относятся к подкатегории «Ограниченное возвращение на Землю» (*restricted Earth return*), т.е. считаются представляющими потенциальную опасность для Земли.

К таким экспедициям предъявляется самый высокий уровень требований:

- абсолютный запрет разрушения (разгерметизации) капсул с инопланетными образцами при столкновении с Землей во время возвращения;
- необходимость на стадии возвращения изоляции оборудования или нестерилизованных конструкций и материалов, которые контактировали с исследуемым небесным телом (так называемый «разрыв цепи контактов»);
- необходимость изоляции любых собранных и возвращаемых на Землю образцов.

По окончании миссии необходимо провести своевременные анализы любых доставленных на Землю нестерилизованных образцов в условиях жесткой изоляции с использованием самых чувствительных методов. Если обнаружится любой признак внеземной жизни, возвращенный образец должен храниться изолированно до тех пор, пока не подвергнется эффективной процедуре стерилизации. Анализ фобосианского грунта предполагается проводить в специализированной организации, которая имеет лицензию на право проведения работ с особо опасными микроорганизмами в карантинной лаборатории.

Для экспедиций возвращения со спутников некоторых планет (к ним относятся, в основном, спутники Марса и Юпитера), согласно [1], точное определение подкатегории миссии и выдача заключения о степени опасности возвращенных образцов для Земли должны приниматься после всестороннего научного исследования возможности существования (или занесения с соседней планеты) форм межпланетной жизни и их выживаемости в земных условиях, т.е. тщательного рассмотрения всех рисков.

Тем не менее, учитывая тот факт, что целью экспедиции является доставка грунта с Фобоса - небесного тела, лишённого атмосферы и воды, разработчиком КА ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» совместно с Институтом медико-биологических наук РАН (осуществляющим научно-методическое руководство проекта по программе планетарной защиты) статус окончательного этапа экспедиции предварительно был определен как безопасная для Земли экспедиция возвращения («*unrestricted Earth return*») категории V. Однако, принимая во внимание некоторую неопределенность в установлении подкатегории этого этапа и осознавая ответственность за безопасность Земли, нами был предусмотрен ряд мер (получивших одобрение представителей КОСПАР) по выполнению требований планетарной защиты Земли при осуществлении доставки фобосианского грунта [3]:

1) Обеспечение герметичности контейнера с грунтом Фобоса на всех этапах экспедиции, вплоть до посадки на Землю.

2) Проведение специфических мероприятий по карантину Земли после доставки грунта Фобоса в специальную лабораторию для исследования физико-химических свойств грунта.

3) Осуществление «разрыва цепи контакта» с Землей оборудования, побывавшего на Фобосе:

– перелетный модуль с грунтозаборным устройством (манипуляторы) остается на Фобосе;

– возвращаемая ракета (непосредственно не контактирующая с поверхностью Фобоса), доставляющая спускаемый аппарат с грунтом на Землю, сгорает в атмосфере Земли, т.е. ее обломки подвергаются естественной стерилизации;

– внешние поверхности СА, содержащего капсулу с грунтом, в свободном падении в атмосфере Земли нагреваются до температуры ~ 1500°C, что обеспечивает их естественную стерилизацию.

Для обеспечения личной и общественной безопасности и защиты окружающей среды, согласно Федеральному закону «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ, ГНЦ РФ - ИМБП РАН были разработаны Медико-технические требования к проведению в специализированной лаборатории организационных, санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий при работе с образцами грунта Фобоса и биологическими объектами, входящими в эксперимент «Био-Фобос». Соблюдение требований российского законодательства имеет приоритетное значение для любых видов указанных работ и обязательно для всех организаций, работающих с образцами

грунта Фобоса и биологическими объектами в эксперименте «Био-Фобос», независимо от типа и масштаба организации.

В заключение следует заметить, что доставка на Землю грунта со спутника Марса и возврат длительно пребывавших в условиях дальнего космоса земных микроорганизмов будут осуществлены *впервые в истории освоения космоса*. Это накладывает на нас огромную ответственность и подразумевает тщательное выполнение всех требований планетарной защиты в обоих важнейших направлениях: защита Марса от земных микроорганизмов (необходимое для дальнейших исследований планеты) и защита Земли от возможного внеземного загрязнения.

Представленный в статье анализ проводимых мероприятий по реализации политики планетарной защиты свидетельствует, что требования, предъявляемые КОСПАР, в экспедиции «Фобос-Грунт» выполнены.

Автор выражает глубокую благодарность коллегам из ФГУП «НПО им. Лавочкина» и ГНЦ РФ – ИМБП РАН за поддержку в работе.

#### **Список литературы**

1 COSPAR New Policy, Recommendations and Implementation Guidelines Document. COSPAR Planetary Protection Policy (October 20, 2002), approved by the Bureau and Council, WORLD SPACE COUNCIL, Houston, USA.

2 Принципы планетарного карантина экспедиции «Фобос-Грунт» / М.Б. Мартынов [и др.] // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 2009. № 2. С. 8-12.

3 Main Aspects of the Program of “Phobos-Grunt” Mission Planetary Protection / O.I. Orlov [et all.] // 17th IAA Humans in Space Symposium, Moscow, Russia, June 7 – 11, 2009. Book of Abstracts. P. 5.

4 ГОСТ ИСО 14644-1-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха. ISO 14644-1-99.

5 Хамидуллина Н.М., Колобов А.Ю. Обеспечение планетарной защиты Марса в экспедиции «Фобос-Грунт». Расчет надежности КА на различных этапах полета // Вестник ФГУП НПО им. С.А.Лавочкина, 2011. № 2. С. 26-31.

6 Симонов А.В., Морской И.М., Хамидуллина Н.М. Обеспечение планетарной защиты Марса в экспедиции «Фобос-Грунт». Расчет вероятности попадания КА на Марс // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 2011. № 4.

## ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ

1. К публикации в журнале «Вестник ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина» принимаются статьи, отвечающие профилю журнала.
  2. Статья должна быть подписана всеми авторами. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста и 8 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы.
  3. К статье необходимо приложить оформленный акт экспертизы.
  4. Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным в следующей последовательности (соответственно требованиям ВАК, ГОСТ Р 7.0.7):
    - индекс УДК (слева);
    - инициалы и фамилии авторов, ученое звание и ученая степень каждого из авторов, должность, место работы (полное название организации, страна, город), контактная информация (e-mail), название статьи, краткая аннотация (5-7 строк), ключевые слова (5-6 слов) на русском языке и на английском языке;
    - основной текст;
    - список литературы.
  5. Рукопись статьи предоставляется в двух экземплярах, напечатанных на принтере на одной стороне стандартного листа формата **A4**.
  6. Набирать текст необходимо в **MS Word**, используя стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**, размер - **14**, интервал - **полтора**. Поля со всех сторон - **25 мм**.
  7. Для набора формул следует использовать встроенный редактор формул **Math Equation** или встраиваемый формульный процессор **Math Type**. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте согласно ГОСТ 2.105.
  8. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Размерность величин должна соответствовать системе СИ.
  9. Элементы списка литературы должны содержать фамилии и инициалы авторов, полное название работы. Для книг указывается место издания, издательство, год издания, количество страниц. Для статей – название журнала или сборника, год выпуска, том, номер, номера первой и последней страниц. (Согласно ГОСТ Р 7.0.5, ГОСТ 7.82).
  10. Рисунки, таблицы и графики оформляются согласно ГОСТ 7.32.
  11. Графический материал только в **черно-белом изображении** должен быть четким и не требовать перерисовки.
  12. К статье следует приложить диск с файлами:
    - сформированной статьи;
    - рисунков, таблиц, графиков с наименованиями;
    - фотографий авторов (размер фотографий не менее 6x4);
    - иллюстрации (выполняются в форматах **jpeg** или **tiff** с разрешением не менее 300 dpi и размером не более формата A4);
    - сведений об авторах.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), ученое звание, ученую степень, аспирант или соискатель ученой степени, домашний и рабочий телефоны (с кодом города), сотовый (предпочтительней), адрес электронной почты.

\*\*\*

Издатель

Ордена Ленина, дважды орденов Трудового Красного Знамени  
ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»

Редактор *Ефанов В.В.*

Технический редактор *Шевалев И.Л.*

Корректор *Винниченко М.С.*

Дизайн обложки журнала:

разработка шаблона *Бедердинов Р.Ю., Илингин В.М., Меркулов И.Б.*  
художественная композиция *Шевалев И.Л.*

Подписано в печать 04.07.2011. Формат 60x84 /8.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 9.0 печ. л.  
Тираж 700 экз. Зак.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ООО «Полстар» (МАИ),

Волоколамское ш., д.4, Москва А-80, ГСП-3 125993

---