

# К ШЕСТИДЕСЯТИЛЕТИЮ ТВОРЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА НПО им. С.А. ЛАВОЧКИНА И ИПМ им. М.В. КЕЛДЫША РАН В ОСВОЕНИИ КОСМОСА

# ON THE OCCASION OF SIXTIETH ANNIVERSARY OF THE CREATIVE COOPERATION IN SPACE EXPLORATION BETWEEN LAVOCHKIN ASSOCIATION AND KELDYSH INSTITUTE OF APPLIED MATHEMATICS OF RAS

**Г.К. Боровин<sup>1</sup>,**  
доктор физико-  
математических наук,  
borovin@keldysh.ru,  
gkborovin@mail.ru;  
**G.K. Borovin**

**А.В. Грушевский<sup>1</sup>,**  
доктор физико-  
математических наук,  
alexgrush@rambler.ru;  
**A.V. Grushevskii**

**С.М. Лавренев<sup>1</sup>,**  
доцент,  
кандидат технических наук,  
lasemi@mail.ru;  
**S.M. Lavrenov**

**В.А. Степаньянц<sup>1</sup>,**  
кандидат физико-  
математических наук,  
vastepan44@yandex.ru;  
**V.A. Stepanyants**

**А.Г. Тучин<sup>1</sup>,**  
доктор физико-  
математических наук,  
tag@kiaml.rssi.ru;  
**A.G. Tuchin**

**Д.А. Тучин<sup>1</sup>,**  
кандидат физико-  
математических наук,  
den@kiaml.rssi.ru;  
**D.A. Tuchin**

*Статья написана к 60-летию творческого сотрудничества НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в освоении космоса. Приводится обзор основных результатов сотрудничества НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в области исследования Луны, Солнечной системы и Вселенной. Представлены выполненные, текущие и перспективные космические проекты.*

*Ключевые слова:*  
АО «НПО Лавочкина»;  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН;  
космический аппарат;  
автоматическая межпланетная станция;  
Луна; Венера; Марс; Юпитер;  
Фобос; комета Галлея;  
навигация; баллистика.

DOI: 10.26162/LS.2025.67.1.005

## ВВЕДЕНИЕ

Космическая деятельность научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина, 60-летие которой мы отмечаем, сыграла важнейшую роль в становлении и развитии отечественной космонавтики.

*The article marks the sixtieth anniversary of the creative cooperation in space exploration between Lavochkin Assotiation and Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS. An overview of the main cooperation outcome between Lavochkin Assotiation and Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS in the Moon, the Solar system and the Universe researches. The completed, current and prospective space projects are presented.*

*Keywords:*  
Lavochkin Assotiation;  
Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences; spacecraft;  
automated interplanetary station;  
Moon; Venus; Mars; Jupiter;  
Phobos; Halley's comet;  
navigation; ballistics.

Прошло 60 лет, однако наиболее важные аспекты развития отечественной и мировой космонавтики не только не стираются в нашей памяти, но ещё более высвечиваются и обретают знаковые формы.

<sup>1</sup> ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Россия, Москва.

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russia, Moscow.

Юбилей космической деятельности одного из флагманов отечественной ракетно-космической промышленности НПО им. С.А. Лавочкина – повод вспомнить и подробнее описать такие тенденции. Вполне закономерно получилось, что год начала его космической деятельности практически совпал и с началом совместных работ двух организаций: Акционерного общества «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (далее – «НПО им. С.А. Лавочкина») и Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (далее – ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) по созданию космических аппаратов (в том числе межпланетных) и их баллистико-навигационному обеспечению (*Боровин Г.К. и др.*, 2018; *Боровин Г.К. и др.*, 2022).

Хорошо известно, что НПО им. С.А. Лавочкина ведёт свое начало от авиационного завода, созданного в подмосковных Химках в 1937 году, прославившегося разработкой и созданием истребителей Ла-5, Ла-7, ставших одними из основных истребителей, обеспечивших нашу победу в Великой Отечественной войне. Затем были работы по ракетной тематике: сверхзвуковая крылатая ракета «Буря» – первая в мире крылатая ракета, которая превзошла по своим характеристикам стратегическую крылатую ракету North American SM-64 Navaho (США) и успешно выполнила 11 испытательных полётов; зенитные управляемые ракеты для ПВО Москвы; зенитно-ракетный комплекс «Даль» и др.

С 1965 года НПО им. С.А. Лавочкина было переориентировано на космическую тематику. Эта тематика была передана вместе с заделом из ОКБ-1, возглавляемого С.П. Королёвым, для работы по лунно-планетным исследованиям с помощью автоматических космических аппаратов (КА). Прерогативой НПО им. С.А. Лавочкина стало также создание космических систем связи, разгонных блоков, спутников. Георгий Николаевич Бабакин был назначен Главным конструктором предприятия.

В том же 1965 году по предложению С.П. Королёва и М.В. Келдыша в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в рамках Пятого отдела, руководимого Д.Е. Охоцимским, создан Баллистический центр ИПМ им. М.В. Келдыша (БЦ ИПМ). Долгие годы БЦ ИПМ руководил член-корреспондент РАН Э.Л. Аким. В области исследований Луны, Солнечной системы и Вселенной началось многолетнее плодотворное сотрудничество НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. На БЦ ИПМ были возложены работы по проектированию и баллистико-навигационному обеспечению (БНО) полётов пилотируемых кораблей и автоматических космических аппаратов научно-го и народно-хозяйственного назначения. БЦ ИПМ

вместе с баллистическими центрами Министерства обороны и Министерства общего машиностроения успешно обеспечивал полёты отечественных КА.

Расширение масштабов освоения космоса потребовало решения возникших новых сложных проблем и создания эффективных научных коопераций, реализующих подобные решения. Именно таковым стал научно-технический и творческий союз НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

В НПО им. С.А. Лавочкина были созданы автоматические КА для изучения Луны, Венеры, Марса и астрофизических исследований. Созданные в НПО им. С.А. Лавочкина космические аппараты впервые в мире осуществили мягкую посадку на Луну, произвели автоматический забор лунного грунта и доставили его на Землю. Самоходные аппараты «ЛУНОХОД-1, -2», доставленные на Луну автоматическими КА «ЛУНА-17» и «ЛУНА-21», управляемые с Земли, совершили движение по поверхности Луны. Впервые была осуществлена посадка на поверхности Марса и Венеры, получено множество научной информации и фотоснимков этих планет. Был успешно реализован проект полёта к комете Галлея. Созданные в НПО им. С.А. Лавочкина автоматические КА по эффективности и тактико-техническим характеристикам опережали то время и обеспечили нашей стране мировые приоритеты в космических исследованиях. Во всех этих работах наши организации работали бок о бок. Мы вместе разрабатывали и осуществляли сложнейшие космические проекты, результаты которых вошли в сокровищницу отечественной и мировой науки и техники, самого хода всемирного естествознания.

Баллистический центр ИПМ им. М.В. Келдыша РАН выполнил все возложенные на него задачи по обеспечению полётов КА серии «ЛУНА». Последний полёт этой серии совершил КА «ЛУНА-24» в августе 1976 года. Коллектив ИПМ им. М.В. Келдыша РАН участвовал во всех проектно-баллистических работах, а также в работах по баллистико-навигационному обеспечению полётов КА, созданных в НПО им. С.А. Лавочкина для исследования Солнечной системы (*Боровин Г.К. и др.*, 2018; *Ивашкин В.В.*, 2010; *Охоцимский Д.Е. и др.*, 2010). Наряду с указанными работами НПО им. С.А. Лавочкина с самого начала своей космической деятельности и по настоящее время выполняет большой объём работ по текущим и перспективным космическим проектам. За малым исключением во всех этих работах ИПМ им. М.В. Келдыша РАН осуществляет баллистическое проектирование, подготовку, обеспечивает реализацию и БНО полётов КА, осуществляет их анализ.

Представим наиболее значимые с нашей точки зрения состоявшиеся проекты успешного сотрудничества наших организаций по исследованию космического пространства.

Отечественные космические миссии традиционно доминировали в исследованиях Венеры. Автоматическая межпланетная станция (АМС) «ВЕНЕРА-3» первой достигла поверхности Венеры 1 марта 1966 года. В полётах АМС к Венере в 1978 году и 1981 году «ВЕНЕРА-11» – «ВЕНЕРА-14» была успешно осуществлена пролётно-десантная схема. В разработке и реализации этой схемы полёта активное участие принимали сотрудники ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Мягкая посадка спускаемых аппаратов АМС «ВЕНЕРА-11» и «ВЕНЕРА-12» была реализована в декабре 1978 года, а АМС «ВЕНЕРА-13» и «ВЕНЕРА-14» – в марте 1982 года. Искусственные спутники «ВЕНЕРА-15» и «ВЕНЕРА-16» провели уникальный эксперимент по радиокартографированию Венеры. На его основе построены качественные изображения планеты и её рельефа, создан первый атлас Венеры (1989) (Котельников В.А. и др., 1989). NASA в 1990–1994 годах составила гипсометрическую карту 98% поверхности планеты. Наряду с данными радиовысотомера КА «МАГЕЛЛАН» и КА «ПИОНЕР-ВЕНЕРА-1» были использованы данные отечественных КА «ВЕНЕРА-15» и «ВЕНЕРА-16». Эта карта используется при выборе мест для посадки современных проектируемых миссий не вслепую, а на местность с известной геологической структурой (международный проект «ВЕНЕРА-Д» (Иванов М.А. и др., 2017)) Следует также отметить полёты наших КА «ВЕГА-1, -2» к комете Галлея с доставкой в атмосферу Венеры аэростатных зондов и выведением европейской межпланетной станции «ДЖОТТО» к ядру этой кометы (международный проект «ЛОЦМАН»).

Полёты КА к планетам Солнечной системы предъявили высокие требования к точности знания координат планет. Поэтому принципиальное значение имели работы сотрудников ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по уточнению эфемерид планет, опирающиеся на радиолокацию планет и высокоточные радиотехнические наблюдения за движением их искусственных спутников. По данным траекторных измерений всех советских искусственных спутников Луны была построена модель глобальной структуры её гравитационного поля. В интересах проекта картографирования Венеры было выполнено первое определение динамического сжатия планеты по наблюдениям за движением КА «ВЕНЕРА-9» и «ВЕНЕРА-10».

В 80-х годах прошлого столетия в НПО им. С.А. Лавочкина был создан КА нового поколения (*Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований*, 2010) Первыми целями аппаратов этой серии стали Марс и его спутник Фобос. Погрешность знания орбиты Фобоса была настолько большой, что не позволяла непосредственно выполнить сближение с ним. Поэтому была разработана схема маневрирования, обеспечивающая постепенное сближение КА и Фобоса.

В связи с этим в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН были разработаны специальные методы и соответствующие алгоритмы расчёта оценки безопасного полёта искусственного спутника планеты относительно её естественного спутника (Заславский Г.С., 1991; Байцур С.Г. и др., 1991). К сожалению, полностью выполнить намеченную программу исследований не удалось. КА «ФОБОС-1» прекратил существование на траектории перелёта, а КА «ФОБОС-2» – при переходе на вторую квазисинхронную орбиту. Однако полёт КА «ФОБОС-2» дал уникальные научные результаты (*Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований*, 2010). Навигационные наблюдения Фобоса позволили уточнить параметры его орбиты (*Навигация космических аппаратов при исследовании дальнего космоса*, 2016).

Для реализации проекта «ФОБОС-ГРУНТ» требовалось априорное знание параметров орбиты Фобоса. В ИПМ им. М.В. Келдыша была построена модель движения Фобоса с использованием всех имеющихся наблюдений Фобоса (Шишов В.А., 2008). При построении модели движения Фобоса были использованы: оптические наземные измерения, начиная с 1877 года; бортовые телевизионные измерения Фобоса КА MARINER-9 (1971–1972), VIKING (1976–1978), «ФОБОС-2» (1989), MARS EXPRESS (2005); измерения лазерного дальномера с борта MARS GLOBAL SURVEYOR (1998); измерения углового расстояния между центром Фобоса и центром солнечного диска при наблюдениях с находящихся на поверхности Марса американских роверов Spirit и Opportunity (2004).

Кроме решения задач космических проектов, необходимо отметить взаимодействие ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и НПО им. С.А. Лавочкина в подготовке научных кадров. Несколько сотрудников НПО им. С.А. Лавочкина получили дипломы об окончании аспирантуры ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и готовятся к защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

## 1. Современные космические проекты

В настоящее время ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и НПО им. С.А. Лавочкина продолжают свою плодотворную деятельность в отечественных и международных проектах. Это приводит к уникальным решениям баллистико-навигационных проблем.

18 июля 2011 года с космодрома Байконур был выведен на расчётную орбиту КА «СПЕКТР-Р» с радиотелескопом «РадиоАстрон», который получил международное название: космическая астрофизическая обсерватория «Радиоастрон». КА был запущен на орбиту с высотой апоцентра 300 тыс. км. Космическая астрофизическая обсерватория «СПЕКТР-Р»



совместно с земными радиотелескопами создала радиоинтерферометр со сверхбольшой базой и была предназначена для проведения фундаментальных астрофизических исследований в радиодиапазоне электромагнитного спектра. По результатам полёта удалось получить ряд фундаментальных результатов в области изучения Вселенной. Эволюция орбиты КА «СПЕКТР-Р» позволяла в ходе полёта вести наблюдение участков небесной сферы в различных режимах для решения научных задач проекта. Управление космическим комплексом «СПЕКТР-Р» осуществляла главная оперативная группа управления, созданная на базе НПО им. С.А. Лавочкина, с участием специалистов организаций – разработчиков бортовых систем, с привлечением наземного сегмента управления и наземного научного комплекса. Расчёт целеуказаний, обработку результатов измерений параметров орбиты, реконструкцию и прогнозирование орбиты КА, расчёт баллистических параметров коррекции траектории полёта КА и мониторинг степени затенения КА Землёй и Луной обеспечивали сотрудники ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (*Заславский Г.С. и др., 2014*). Наряду с работами по оперативному БНО управления полётом КА «СПЕКТР-Р» БЦ ИПМ в тесном сотрудничестве с Астрокосмическим центром ФИАН участвовал в реализации научной программы проекта – проводил исследования по выбору траектории дальнейшего полёта КА и высокоточное определение параметров движения аппарата, необходимое для обработки научной информации (*Заславский Г.С. и др., 2016; Заславский Г.С. и др., 2017*).

Совместная работа специалистов НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в области баллистики и навигации обеспечила выполнение радиоинтерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами. КА «СПЕКТР-Р» находился на орбите 7.5 лет (в полтора раза превысив плановый срок существования). За это время была получена уникальная научная информация.

По программе «Малые космические аппараты для фундаментальных космических исследований» были запущены два космических аппарата: «МКА-ФКИ (ПН1)» и «МКА-ФКИ (ПН2)», разработанных НПО им. С.А. Лавочкина (*Гордиенко Е.С. и др., 2016*). Запуск «МКА-ФКИ (ПН1)» осуществлен с космодрома Байконур 22 июля 2012 года «МКА-ФКИ (ПН1)» был выведен на солнечно-синхронную орбиту с высотой апоцентра – 810.6 км и высотой перицентра – 795.6 км. Научная аппаратура КА «ЗОНД-ПП», разработанная в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, предназначалась для пассивного радиометрического зондирования Земли в дециметровом диапазоне электромагнитных волн. Анализ данных «ЗОНД-ПП» позволил сделать вывод о перспективности создания малых космических аппаратов.

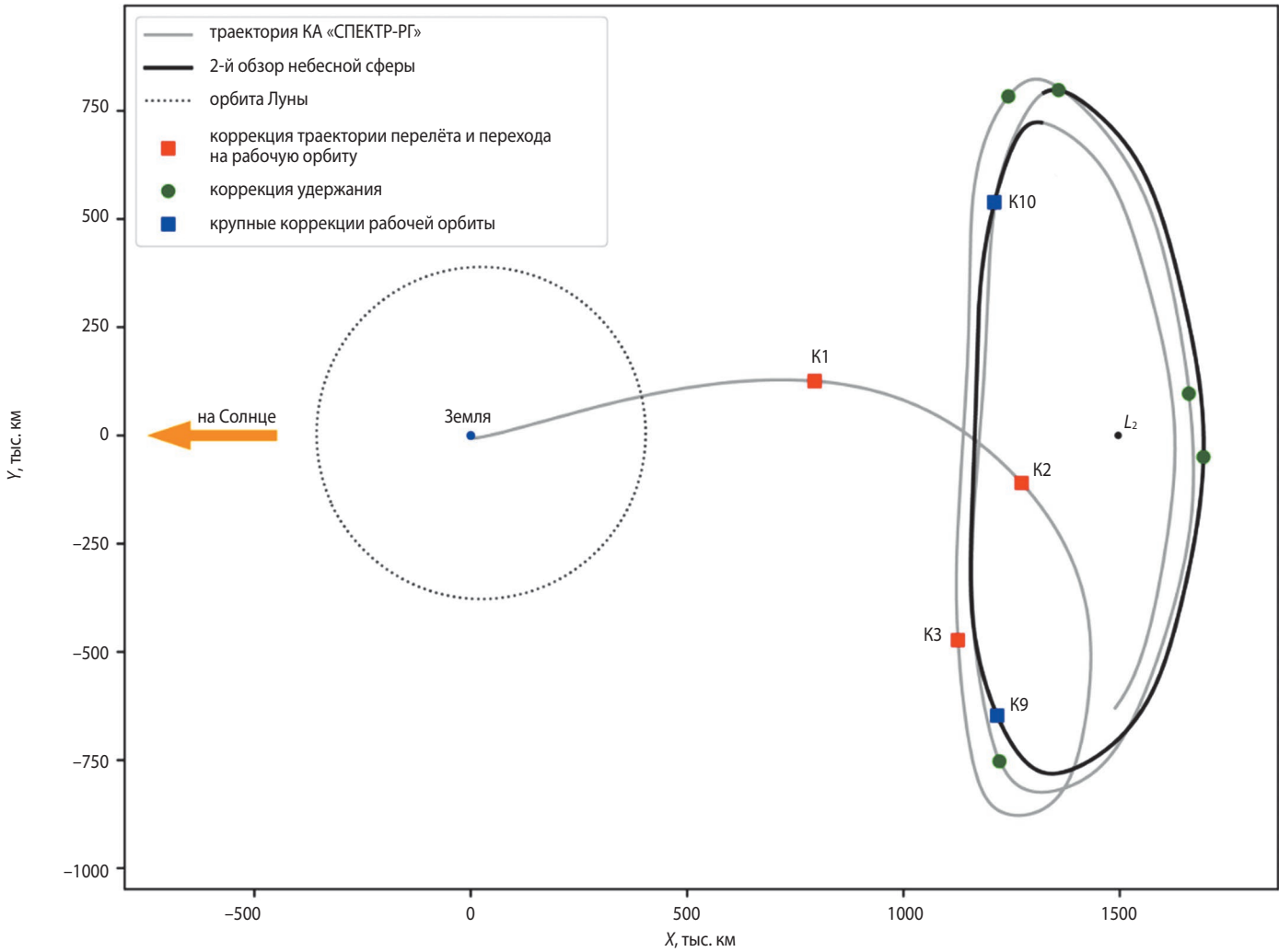
«МКА-ФКИ (ПН2)» был запущен с космодрома Байконур 8 июня 2014 года и выведен на солнечно-синхронную орбиту с высотой апоцентра 817.8 км и высотой перицентра 625.7 км. Научная аппаратура «РЭЛЕК», установленная на борту «МКА-ФКИ (ПН2)», была предназначена для изучения высотных электрических разрядов и атмосферных явлений. Научная аппаратура разработана Научно-исследовательским институтом ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ совместно с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева и Научно-исследовательской лабораторией аэрокосмической техники.

Центр управления полётом малых космических аппаратов находился в НПО им. С.А. Лавочкина, а Баллистический центр – в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Баллистический центр выполнял функции навигационного обеспечения управления полётом: обработка наземных и бортовых траекторных измерений, определение и прогнозирование параметров движения космического аппарата, расчёт целеуказаний для командно-измерительного пункта в Медвежьих Озёрах и расчёт опасных сближений.

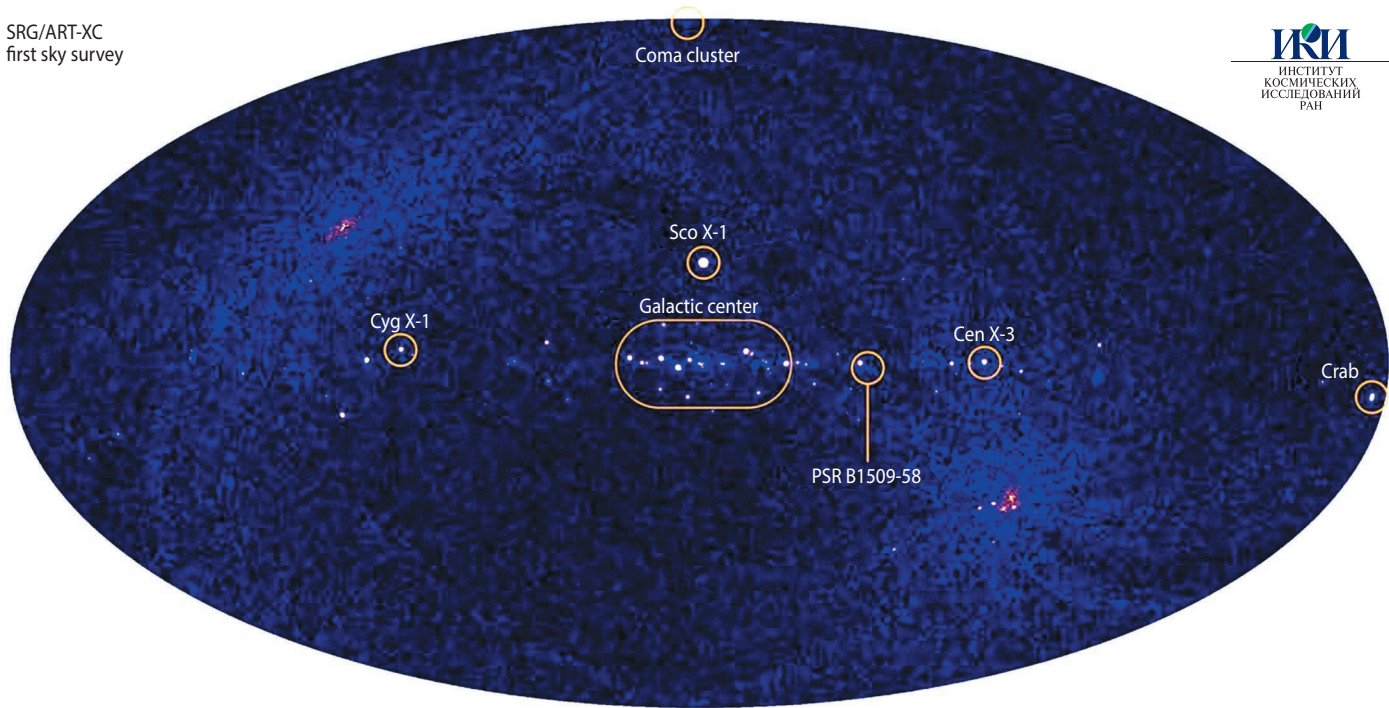
В Баллистическом центре рассчитывались опасные сближения КА с космическими объектами, орбиты которых были доступны по каналам Интернет. Ежедневно выполнялся прогноз опасных сближений на трое суток с публикацией бюллетеней, которые содержали минимальное расстояние сближения, начальные условия и ковариационную матрицу параметров движения космического объекта.

Оценка качества определения орбиты показала, что погрешность её определения в прогнозе на одни сутки составляет около 5 м в радиальном направлении и направлении, ортогональном плоскости орбиты, а в трансверсальном направлении – 90.9 м. Высокоточное определение орбиты обеспечивалось одним наземным измерительным комплексом и бортовой аппаратурой спутниковой навигации. Таким образом, была отработана однопунктовая схема наземных траекторных измерений для малых космических аппаратов.

13 июля 2019 года с космодрома Байконур запущен космический аппарат «СПЕКТР-РГ» – российско-немецкая орбитальная астрофизическая обсерватория, предназначенная для построения полной карты Вселенной в рентгеновском диапазоне энергий 0,2–30 кэВ. Она состоит из двух рентгеновских телескопов: немецкого eROSITA, работающего в мягком рентгеновском диапазоне, и российского ART-XC имени М.Н. Павлинского, работающего в жёстком рентгеновском диапазоне. Космический аппарат создан в АО «НПО Лавочкина» на базе российской спутниковой платформы «Навигатор». Окрестности точки Лагранжа  $L_2$  системы «Солнце – Земля» космический аппарат (КА) достиг 21 октября 2019 года.



**рисунок 1.** Проекция траектории КА «СПЕКТР-РГ», включая схему перелёта к точке  $L_2$ , на плоскость эклиптики



**рисунок 2.** Карта первого обзора ART-XC в диапазоне 4–12 кэВ, в Галактических координатах. Подписаны несколько наиболее ярких объектов и область Галактического центра

Космический аппарат обращается по гало-орбите с периодом шесть месяцев вокруг точки Лагранжа  $L_2$  по орбите радиусом до 400 тыс. км, плоскость которой перпендикулярна прямой, соединяющей эту точку с Солнцем и стала первым отечественным КА, облетевшим точку Лагранжа  $L_2$ . На данный момент «СПЕКТР-РГ» – это одна из лучших рентгеновских обсерваторий на ближайшие 10–15 лет. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН выполняет баллистико-навигационное обеспечение и сопровождение КА «СПЕКТР-РГ». До настоящего времени были выполнены расчёты коррекций, необходимых для поддержания геометрии траектории КА «СПЕКТР-РГ» на квазипериодической орбите в районе либрационной точки  $L_2$  системы Солнце – Земля и обеспечения условий видимости КА с наземных пунктов наблюдения РФ. Выполненные расчёты и их реализация позволили произвести наблюдения телескопами ART-XC и eROSITA, установленными на борту КА «СПЕКТР-РГ», и получить новые научные данные. Для баллистико-навигационного обеспечения полёта КА «СПЕКТР-РГ» разработана методика проведения «больших» коррекций, уменьшающих выход орбиты КА из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира. Это расширяет радиовидимость КА и увеличивает время пребывания КА в окрестности точки либрации  $L_2$  системы Солнце – Земля после проведения коррекции.

На рисунке 1 представлена проекция траектории КА «СПЕКТР-РГ», включая схему перелёта к точке  $L_2$  на плоскость эклиптики (XY) во вращающейся системе координат. Пунктирная линия показывает орбиту Луны. Точками K1 и K2 обозначены основные коррекции траектории перелёта. Точка K3 обозначает манёвр перехода на квазипериодическую орбиту вокруг  $L_2$ . Зелёными и синими точками показаны последующие коррекции орбиты.

Наблюдения, выполненные с помощью обсерватории «СПЕКТР-РГ», существенно дополняют наблюдения знаменитого оптического телескопа «Хаббл», работающего в световом диапазоне частот от ультрафиолетового до инфракрасного.

Запуск и надежное функционирование КА «СПЕКТР-РГ» является значимым достижением российской космонавтики в деле изучения более миллиона рентгеновских источников Вселенной (Сюняев Р.А. и др., 2022). В декабре 2022 года научный руководитель российской части миссии «СПЕКТР-РГ» академик Рашид Сюняев сообщил на конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (HEA-2022), что «СПЕКТР-РГ» обнаружил свыше 23 тыс. скоплений галактик среди 1,5 млн. рентгеновских источников, открытых телескопом eROSITA за время четырех полных и одного неполного обзора неба. Менее 50% этих скоплений

были известны ранее по оптическим обзорам или по регистрации эффекта Сюняева – Зельдовича (Сюняев Р.А. и др., 2022). Российский телескоп ART-XC на борту «СПЕКТРА-РГ» изучил свыше 1.5 тысяч источников жёсткого рентгена, в том числе несколько сотен активных ядер галактик и переменных звёзд. Это является рекордом для космических миссий, изучающих данную часть спектра. Каталог объектов, излучающих в жёсткой части рентгеновского диапазона, превосходит по числу источников излучения, чувствительности и качеству данных аналогичные каталоги, подготовленные за 17 лет работы обсерватории «Интеграл», а также пять лет наблюдений на борту обсерватории Swift. В течение нескольких лет планируется получить восемь независимых карт всего неба в каждом из энергетических диапазонов.

Измерения, проводимые КА «СПЕКТР-РГ», предоставляют возможность развития рентгеновской навигации (рисунок 2) (Ревнищев М.Г. и др., 2015). На основе карты Вселенной, которая будет построена «СПЕКТРОМ-РГ», Россия планирует разработать систему ориентации (навигатор) по пульсарам для путешествий в космосе, которая любому аппарату покажет с высокой точностью его местоположение. Также предполагается, что она станет навигатором для аппаратов лунной программы РФ, а также для миссий, которые отправятся в дальний космос.

Помимо прочего, БЦ ИПМ выполняет работы по оперативному баллистическому сопровождению запусков космических аппаратов с использованием ракет-носителей «Союз» и разгонного блока «Фрегат». Производится обработка телеметрической информации бортовой системы управления, получаемой на зарубежных наземных станциях, расположенных по трассе полёта разгонного блока. Результатом обработки бортовых измерений телеметрической информации являются параметры орбит разгонного блока до и после проведения динамических операций. Проведены десятки совместных оперативных работ БЦ ИПМ и НПО им. С.А. Лавочкина по контролю выведения космических аппаратов.

## **2. Проект «ЛУНА-25»**

Космическая экспедиция «ЛУНА-25» стартовала в 2023 году, согласно Федеральной космической программе на 2016–2025 годы, и стала первой миссией в рамках российской лунной программы. Основной задачей КА «ЛУНА-25» являлась отработка технологии полёта к Луне и проведение точной посадки в заданной области южного полярного региона Луны (Боровин Г.К. и др., 2018). В этом проекте ИПМ им. М.В. Келдыша выполняла традиционные работы по баллистико-навигационному обеспечению управления полётом, а также в разработке бортовой системы управления движением, в том числе, бортового



программно-алгоритмического обеспечения управления движением КА на этапе посадки на поверхность Луны (Боровин Г.К. и др., 2018). После старта 11 августа 2023 года был успешно осуществлён перелёт КА в окрестность Луны и 16 августа 2023 года реализован успешный выход КА «ЛУНА-ГЛОБ» на окололунную орбиту. Последний этап космической экспедиции с посадкой на лунную поверхность, к сожалению, не стал удачным. Тем не менее, были в значительной степени отработаны высокие требования к алгоритмам управления для будущих лунных посадочных экспедиций как на этапах полёта и выхода на селеноцентрическую орбиту, так и на этапе основного торможения, которые должны гарантировать минимальный расход топлива и одновременно максимальную точность при наличии различных возмущающих факторов. Существующая неопределённость в величинах тяги двигателей, а также неопределённость в знании начальной массы КА при сходе с предпосадочной орбиты и ошибки начального вектора состояния существенно усложняют задачу точного приведения КА в заданное место прилунения. Эта задача решается с помощью терминального алгоритма наведения с адаптацией к фактическим условиям движения (Жуков Б.И. и др., 2016). Созданные для отработки алгоритмов управления на этапе посадки стенды в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и НПО им. С.А. Лавочкина, включающие бортовой компьютер и математические модели бортовых приборов, безусловно, будут востребованы для следующих посадочных отечественных «Лунников».

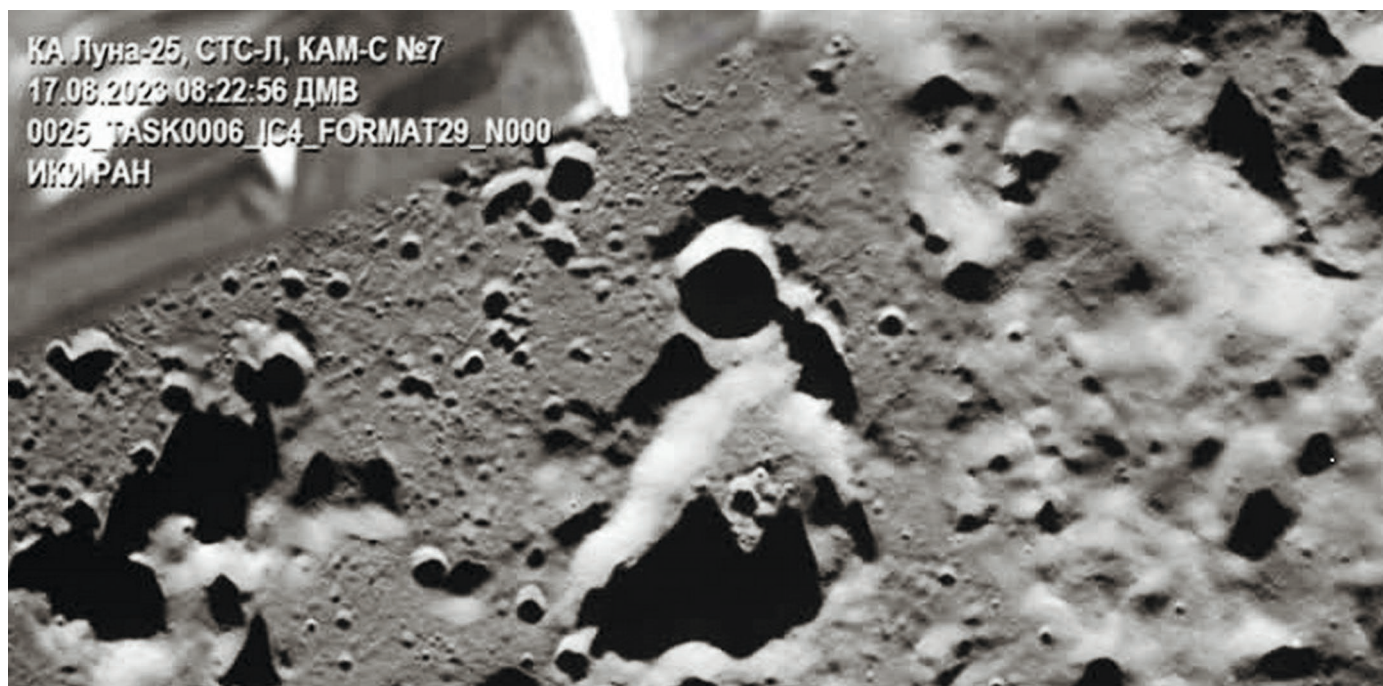
### 3. Будущие межпланетные космические проекты. Лунная программа

Россия вновь возвращается к исследованию Луны. Основными научными задачами изучения Луны автоматическими КА являются: полное картографирование лунной поверхности, изучение внутреннего строения Луны и кратеров на южном полюсе Луны, разведка природных ресурсов, выбор одного или нескольких районов, наиболее подходящих для размещения автоматической и обитаемой лунной базы, исследование воздействия на Луну потоков излучения различной природы.

Научные задачи предполагается решать как с помощью дистанционного зондирования с орбиты ИСЛ (проект «ЛУНА-РЕСУРС»), так и в ходе контактных исследований на поверхности Луны с помощью небольших посадочных аппаратов (проект «ЛУНА-ГРУНТ»). Особое внимание при этом должно быть уделено определению состава и условий залегания полезных ресурсов в приполярных областях.

### 4. Проект «ЭКЗОМАРС»

В рамках программы изучения Марса было разработано два российско-европейских проекта – «ЭКЗОМАРС-18» и «ЭКЗОМАРС-22». Орбитальный аппарат первой экспедиции успешно функционирует на орбите Марса, составной КА второй экспедиции планировалось запустить осенью 2022 года.



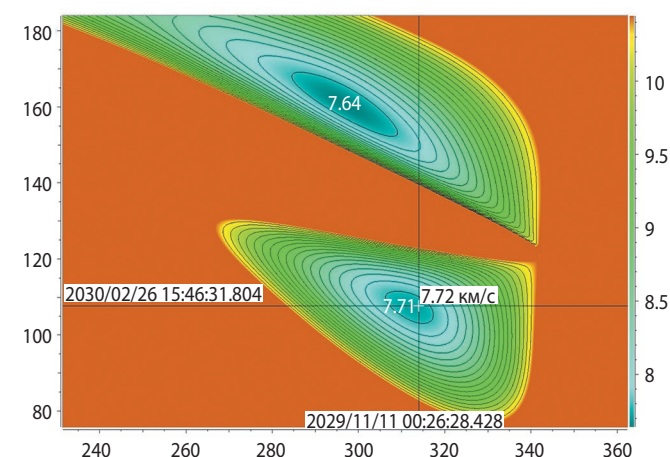
**рисунок 3.** Первые кадры лунной поверхности, переданные АМС «ЛУНА-25» (телеграмм-канал Госкорпорации «Роскосмос», [https://t.me/roscosmos\\_gk/10512](https://t.me/roscosmos_gk/10512))

В состав КА «ЭКЗОМАРС-22» вошли перелётный модуль (ПМ), десантный модуль (ДМ) и адаптер с системой отделения десантного модуля от перелётного модуля. Перелётный модуль разрабатывался Европейским космическим агентством (ЕКА) и был предназначен для доставки десантного модуля к Марсу. Управление КА на участке перелёта и наведение для последующего входа ДМ в атмосферу Марса планировалось осуществлять наземными станциями ЕКА при поддержке российских станций и российских баллистических центров (Тучин А.Г. и др., 2020). Десантный модуль был разработан НПО им. С.А. Лавочкина и предназначался для доставки на поверхность Марса стационарной посадочной платформы (ПП) с комплексом научной аппаратуры и автономного марсохода (ровера) разработки ЕКА. Срок активного существования ПП на поверхности должен быть не менее марсианского года (около двух земных лет). В настоящее время проект заморожен.

## 5. Проект «ВЕНЕРА-Д»

В России ведутся работы по проектированию отечественного КА «ВЕНЕРА-Д» для исследования поверхности Венеры (Иванов М.А. и др., 2017; Голубев Ю.Ф. и др., 2018). Планируемая дата старта: 11 ноября 2029 года. На рисунке 4 показаны изолинии суммарных затрат характеристической скорости для окна стартов перелёта от Земли к Венере в 2029 году (Голубев Ю.Ф. и др., 2018).

Автоматическая межпланетная станция «ВЕНЕРА-Д» состоит из орбитального и посадочного аппаратов для комплексного изучения атмосферы второй от Солнца планеты, её поверхности, внутреннего строения и окружающей плазмы.



**рисунки 4.** Изолинии суммарных затрат характеристической скорости для окна стартов перелёта от Земли к Венере в 2029 году

Разработка экономических баллистических схем полётов КА к Венере и прохождения её сферы действия актуальна и необходима для увеличения полезной нагрузки КА за счёт снижения массы топлива. Баллистическое проектирование подобных схем, в частности, является существенной составной частью перспективного отечественного проекта «ВЕНЕРА-Д», предусматривающего посадку спускаемого модуля на её поверхность в заданном районе. После многолетнего перерыва Венера изучалась лишь с орбиты, например, европейским проектом «ВЕНЕРА-ЭКСПРЕСС» (2005–2015). Проект «ВЕНЕРА-Д» является следующим шагом после успешной серии миссий «ВЕНЕРА» и «ВЕГА» в 70-х–80-х годах. Качественным отличием современного посадочного аппарата от программы «ВЕГА» является оснащённость знаниями о геологии поверхности по результатам радарных исследований КА «ВЕНЕРА-15, -16» и КА «МАГЕЛЛАН». Посадочный аппарат будет садиться не вслепую, как раньше, а на местность с известным геологическим контекстом (Иванов М.А. и др., 2017; Голубев Ю.Ф. и др., 2018; Засова Л.В. и др., 2017; Borovin G.K. et. al., 2019).

## 6. Проект «СПЕКТР-М»

Россия планирует вернуться к проекту создания космической обсерватории «МИЛЛИМЕТРОН» и интерферометра Земля – Космос. На её основе планируется провести исследования астрономических объектов со сверхвысокой чувствительностью в миллиметровом, субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения. Космическая обсерватория и функционирующий на её основе интерферометр с угловым разрешением до 30 наносекунд дуги дадут возможность получения уникальной информации о глобальной структуре Вселенной, о строении и эволюции галактик, их ядер, звёзд и планетных систем, а также об органических соединениях в космосе, объектах со сверхсильными гравитационными и электромагнитными полями.

Космическая обсерватория «МИЛЛИМЕТРОН» должна быть выведена на квазипериодическую орбиту в окрестности точки либрации  $L_2$  системы Солнце – Земля (Боровин Г.К. и др., 2018), обеспечивающую выход из эклиптики (амплитуда по оси  $Z$  вращающейся системы координат) более чем на 1 млн км. Также необходимо соблюсти условия по освещённости аппарата – продолжительность пребывания в конусе Земной тени не должна превышать один час.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в рамках проекта космического комплекса «СПЕКТР-М» провёл исследования по БНО полёта, которые включают: выбор начальных параметров траектории перелёта КА



в район точки либрации  $L_2$  системы Солнце – Земля, разработку методики проведения коррекций и оценке потребных корректирующих импульсов на этапе перелёта и на галоорбите, оценку точности прогнозирования параметров рабочей орбиты КА, оценку точности определения и прогнозирования параметров движения КА «СПЕКТР-М».

Для определения параметров движения КА «СПЕКТР-М» планируется использовать пять станций слежения, две из которых расположены в Северном полушарии (станции в Медвежьих Озёрах и на Байконуре) и три (станции в Маларгуэ (Аргентина), в Хартибисхуке (ЮАР) и в Нью-Норсии (Австралия)) – в Южном полушарии. Основные станции слежения расположены в Медвежьих Озёрах и на Байконуре.

В случае нештатной ситуации или отсутствия видимости КА с одной из основных станций слежения возможно привлечение станции, расположенной в Уссурийске. Длительность интервалов, в течение которых отсутствует видимость аппарата со всех станций слежения, не должна превышать одних суток. Благодаря привлечению к работе станций, расположенных в Южном полушарии, для выбранной орбиты – это условие выполняется.

При выборе орбит для эксплуатации обсерватории «МИЛЛИМЕТРОН» будет учитываться опыт работы обсерваторий «СПЕКТР-Р» и «СПЕКТР-РГ» (Боровин Г.К. и др., 2018).

## 7. Проект «СПЕКТР-УФ»

Космический телескоп «СПЕКТР-УФ» («Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет», сокр. ВКО-УФ, англ. World Space Observatory – Ultraviolet, сокр. WSO-UV) предназначен для получения изображений и спектроскопии в недоступном для наблюдений наземными инструментами участке электромагнитного спектра – ультрафиолетовом (УФ, 100–320 нм).

Космический аппарат «СПЕКТР-УФ» будет состоять из разработанного в НПО имени С.А. Лавочкина многоцелевого служебного модуля «Навигатор», двигательной установки довыведения и УФ-телескопа в качестве полезной нагрузки. Масса нового модуля «Навигатор» почти в три раза меньше, чем у планировавшейся ранее универсальной платформы «Спектр». Это обстоятельство позволит осуществить запуск научного комплекса на более дешёвом носителе среднего класса.

Стартовая масса комплекса составит около 2500 кг. Возможно размещение телескопа на геостационарной орбите. Расчётный срок активного существования телескопа составит не менее пяти лет.

Как уже отмечалось, базовым элементом научной аппаратуры на борту «СПЕКТР-УФ» является ультрафиолетовый телескоп Т-170М с диаметром главного зеркала 170 см и фокальным отношением 10. Использована схема Ричи – Кретьена, фокусное расстояние 17 метров, поле зрения – 30 угловых минут. Помимо него, на борту будет находиться блок спектрографов, состоящий из двух эшелельных спектрографов высокого разрешения ВУФЭС и УФЭС и спектрографа СДЩ с длинной щелью. Эти приборы позволят изучать спектры звёзд до 15–17 звёздной величины. Прибор СДЩ предназначен для получения спектров низкого разрешения точечных и протяженных объектов. Спектрографы производятся в России, изначально планировалось участие других стран.

Блок камер поля состоит из трёх камер, работающих в разных спектрах: ближний ультрафиолет (150–280 нм), дальний ультрафиолет (115–190 нм) и оптический диапазон (200–800 нм). Они позволят получать изображения в УФ- и видимом диапазонах объектов вплоть до 30 звёздной величины.

После введения санкций в 2022 году, зарубежные детекторы в блоке камер поля, предназначенные для построения высококачественных изображений в ультрафиолетовом и оптическом участках спектра, удалось заместить детекторами отечественного производства.

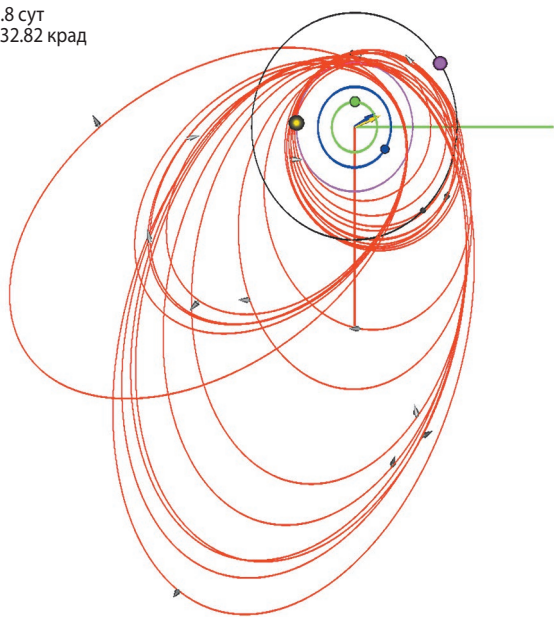
Исторически «СПЕКТР-УФ» является третьим в линейке аппаратов серии «СПЕКТР» («СПЕКТР-Р», «СПЕКТР-РГ», четвёртый – «СПЕКТР-М»). Соответственно представляется вполне реализуемой традиционная кооперация НПО имени С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в рамках проведения исследований по БНО полёта КА «СПЕКТР-УФ» и выбору орбит для эксплуатации.

## 8. Юпитерианский проект

Коллективы НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН работают над перспективными космическими проектами, к которым относится и проект исследования системы Юпитера «ЛАПЛАС-П» (Боровин Г.К. и др., 2022; Голубев Ю.Ф. и др., 2016).

Дополнительная характеристическая скорость полёта КА, получаемая за счёт орбитальной энергии планет или их спутников, даёт возможность для совершения туров к планетам-гигантам и, в первую очередь, к системе Юпитера. И если в первых космических миссиях подобного рода («ПИОНЕР-10», «ВОЯДЖЕР-1») выбранная «мишень» использовалась в качестве «катапульти» нового разгона корабля, то в последующем были использованы более «изопрённые» сценарии, использующие не только

время: 811.8 сут  
радиация: 32.82 крэд

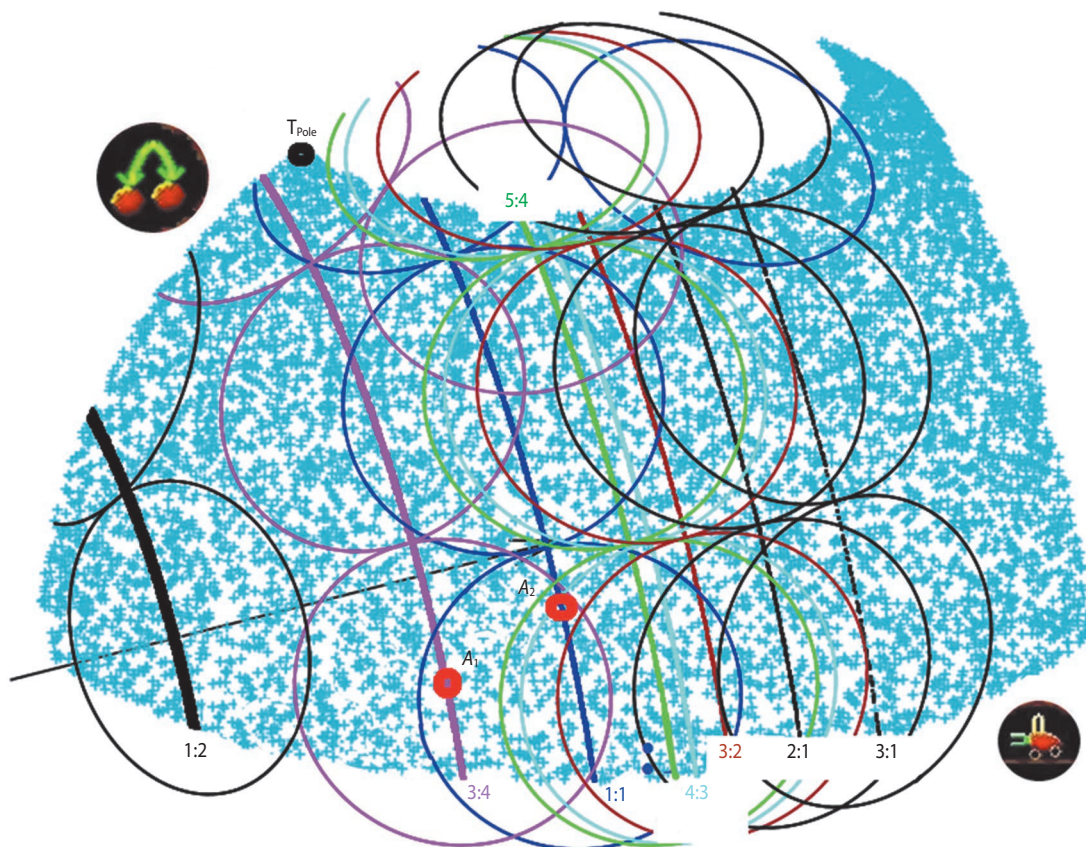


**рисунок 5.** Сценарий сближения КА с Ганимедом

разгонные гравитационные манёвры, но и симметричные им тормозные. В этих случаях, наряду с выбором «окон старта» от Земли, появилась необходимость разработки комбинационного маневрирования с соответствующими сценариями и схемами гравитационных манёвров. На рисунке 5 показан выбранный

сценарий комфортабельного по накопленной дозе радиации тура сближения КА с Ганимедом на средней плоскости системы Юпитера с указанной величиной и направлениями импульсов. На этом рисунке цветами обозначены юпитерианские луны Ио, Европа, Ганимед, Каллисто: зелёным, синим, жёлтым, пурпурным соответственно.

Целью перспективного проекта «ЛАПЛАС-П», как составной части фундаментальных исследований по проблемам происхождения и эволюции планет Солнечной системы, является исследование Юпитера и его спутников. Одной из основных особенностей этого проекта является использование нескольких гравитационных манёвров около естественных небесных тел. Проект «ЛАПЛАС-П» предусматривает посадку на один из спутников Юпитера, которую при наличии ограничений на расход топлива можно обеспечить только с помощью гравитационных манёвров около крупных естественных спутников Юпитера: Ио, Европы, Ганимеда, Каллисто. При этом ограниченные динамические возможности использования спутников Юпитера требуют проведения десятков проходов около них. Становится очевидной актуальность регулярного построения оптимальных сценариев – последовательностей прохождения небесных тел и выработки условий их исполнения (Голубев Ю.Ф. и др., 2016).



**рисунок 6.** Выбор возможной последовательности гравитационных манёвров около Венеры для миссии «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД»



## 9. Проект «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД»

В планах «Роскосмоса» среди важнейших перспективных проектов в дальнем космосе выделен проект «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД», который должен открыть новый этап исследования Солнца – его приполярных областей путём построения высоконаклонённой внеэклиптической орбиты КА. Проекты указанного класса невозможно реализовать без совершения гравитационных манёвров (около Венеры), поскольку операции по изменению наклона орбиты КА являются наиболее энергозатратными. Необходимое проведение сложнейшего, нелинейного 3D-баллистического проектирования синтеза высоконаклонённых орбит с использованием динамических пространственных особенностей ограниченной задачи трёх тел и существования в ней интеграла Якоби было успешно реализовано в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН с использованием эфемеридных моделей (Голубев Ю.Ф. и др., 2017). На рисунке 6 показан выбор возможной последовательности гравитационных манёвров около Венеры для миссии «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» с помощью инвариантной сферы асимптотической скорости КА относительно Венеры. На нём нанесены линии резонансов между орбитальными движениями КА и Венеры, полюс максимально возможного наклона КА относительно орбиты Венеры ( $30^\circ$ ). В результате становится доступным наблюдение полюса Солнца с орбиты, имеющей наклонение 32 градуса.

Проект «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» предназначен для исследований внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений на гелиоцентрических орбитах. Ныне действующие солнечные космические миссии (SOHO, STEREO, SDO, Hinode и др.) и исследования прошлых лет (Yohkoh, КОРОНАС-Ф и др.) много дали для понимания того, как устроено Солнце, как оно работает, для изучения солнечно-земных связей. Дальнейшее продвижение в интерпретации происходящих на Солнце и в гелиосфере процессов связано с необходимостью новых исследований. Дистанционное зондирование Солнца с близких расстояний с высоким пространственным разрешением наряду с локальными измерениями вблизи светила, а также внеэклиптические наблюдения станут следующим шагом в нашем стремлении узнать больше о Солнце и окосолнечном пространстве.

В проекте «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» предполагается, что КА сближится с Солнцем до расстояний в 60–70 солнечных радиусов и станет постепенно выходить из плоскости эклиптики, т.е. угол между плоскостью орбиты аппарата и плоскостью эклиптики будет возрастать. Для сближений с Солнцем и наклона плоскости орбиты к плоскости эклиптики планируется

использовать многократные гравитационные манёвры у Венеры. Баллистическая схема миссии включает короткую эклиптическую фазу, в которой КА приблизится к Венере с помощью гравитационного манёвра.

Реализация миссии «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» может пересечься по срокам с другими солнечно-гелиосферными миссиями НАСА Solar Probe+ (PARKER) и ЕКА (SOLAR ORBITER), а также с их проектами по изучению Венеры. Они планируют отправить к Венере автоматические станции: DAVINCHI+ (Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry, and Imaging (2029–2031)) для изучения плотной атмосферы планеты и определения существования океана на её поверхности и VERITAS (Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy, 2028–2029) для составления геологической карты планеты. ЕКА также планирует миссию для выполнения радиолокационного картирования Венеры с высоким разрешением и её атмосферных исследований EnVision (2031). В этом случае может появиться возможность организации координированных наблюдений и измерений с пространственно разнесённых аппаратов, что позволит обеспечить глобальный обзор солнечной активности, более детальную пространственно-временную картину солнечных и гелиосферных явлений: вспышек, выбросов, потоков солнечного ветра и энергичных частиц.

## заключение

Коллективам НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН предстоят сложные высокотехнологические, важные и ответственные работы по проектированию и реализации полётов автоматических космических аппаратов в целом ряде проектов для исследования Луны, Солнечной системы, в астрофизических проектах.

Коллектив ИПМ им. М.В. Келдыша РАН искренне поздравляет дружественный коллектив НПО им. С.А. Лавочкина с юбилеем! Эффективное и плодотворное сотрудничество наших коллективов в освоении космического пространства в течение более 60 лет позволяет надеяться, что предстоящие совместные работы также будут успешно выполняться.

## список литературы

*Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований* / Под общ. ред. Г.М. Полищука и К.М. Пичхадзе. М.: МАИ-Принт, 2010. 660 с.

Байцур С.Г., Заславский Г.С., Плотникова О.В., Пухликов М.С. Алгоритм расчёта оценки безопасного полёта искусственного спутника планеты в окрестности её естественного спутника // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР. 1991. № 83. 32 с.



Боровин Г.К., Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Заславский Г.С. и др. Баллистико-навигационное обеспечение полётов автоматических космических аппаратов к телам Солнечной системы / Под ред. А.Г. Тучина. Химки, АО «НПО Лавочкина», 2018. 336 с.

Боровин Г.К., Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Заславский Г.С. и др. Упешное творческое сотрудничество НПО им. С.А. Лавочкина и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в освоении космоса // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2022. № 2. С. 46-56. DOI: 10.26162/LS.2022.56.2.004.

Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г. и др. Формирование орбит космического аппарата с большим наклоном к эклиптике посредством многократных гравитационных манёвров // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 2. С. 108-132. DOI: 10.7868/S0002338817020081.

Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Киселева И.П., Корянов В.В. и др. Баллистическое проектирование полётов к Венере в эпоху 2021-2028 гг. Области достижимости при посадке // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 76. 28 с.

Гордиенко Е.С., Ильин И.С., Мжельский П.В., Михайлов Е.А. и др. Баллистико-навигационное обеспечение полёта малых космических аппаратов «ЗОНД-ПП» и «РЭЛЕК» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2. С. 31-43.

Жуков Б.И., Лихачев В.Н., Сихарулидзе Ю.Г., Тучин Д.А. и др. Управление на этапе основного торможения при посадке на Луну космического аппарата с комбинированной двигательной установкой // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2016. № 2. С. 104-114.

Ивашкин В.В. Лунные траектории космических аппаратов: пионерские работы в Институте прикладной математики и их развитие // Прикладная небесная механика и управление движением: сб. статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. С. 73-106.

Заславский Г.С. Алгоритм расчёта вероятности выполнения ограничений на движение космического аппарата относительно небесного тела // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР. 1991. № 2. 29 с.

Заславский Г.С., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Погосин А.В. и др. Коррекция траектории движения космического аппарата СПЕКТР-Р // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 5. С. 387-398.

Заславский Г.С., Тучин А.Г., Захваткин М.В., Шишов В.А. и др. Баллистико-навигационное обеспечение управления полётом КА и выполнения научной программы проекта «Радиоастрон». Пять лет полёта // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 3. С. 25-37.

Заславский Г.С., Захваткин М.В., Кардашев Н.С., Ковалев Ю.Ю. и др. Проектирование коррекции траектории космического аппарата СПЕКТР-Р при на-

личии погружений его в сферу влияния Луны // Космические исследования. 2017. Т. 55, № 4. С. 305-320.

Засова Л.В., Иванов М.А., Воронцов В.А., Хатунцев И.В. и др. Земля и Венера: разные судьбы соседних планет. Пояснительная записка. Совместный российско-американский проект по исследованию Венеры / под ред. ак. Л.М. Зеленого. М., 2017.

Иванов М.А., Засова Л.В., Герасимов М.В., Корблев О.И. и др. Природа различных типов местности на поверхности Венеры и выбор перспективных мест посадки для спускаемого аппарата экспедиции ВЕНЕРА-Д // Астрономический вестник. 2017. Т. 51, № 1. С. 3-23. DOI: 10.7868/S0320930X17010029.

Котельников В.А., Барсуков В.Л., Аким Э.Л. и др. Атлас поверхности Венеры. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1989. 328 с.

Навигация космических аппаратов при исследовании дальнего космоса / Под ред. Е.П. Молотова, А.Г. Тучина. М.: Радиотехника, 2016. 232 с.

Охоцимский Д.Е., Энеев Т.М., Аким Э.Л., Сарычев В.А. Прикладная небесная механика и управление движением // Прикладная небесная механика и управление движением: сб. статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с.

Ревнивцев М.Г., Гаджилы О.Э., Лутовинов А.А., Мольков С.В. и др. О возможности уточнения орбиты спутников по данным наблюдений одиночных рентгеновских пульсаров // Письма в астрономический журнал. 2015. Т. 41, № 8. С. 490-496. DOI 10.7868/S0320010815080069.

Сюняев Р.А. и др. Космическая обсерватория СПЕКТР-РГ: ее телескопы и первые научные результаты // Письма в Астрономический журнал. 2022. Т. 48, № 5. С. 36-88.

Тучин А.Г., Грушевский А.В., Захваткин М.В., Симонов А.В. и др. Российский сегмент баллистико-навигационного обеспечения полёта и спуска десантного модуля миссии «ЭКЗОМАРС-2022» // Российский сегмент международной космической экспедиции «ЭКЗОМАРС-2022» / Под ред. В.В. Ефанова, Х.Ж. Карчаева, в 2-х т. Т. 1. Химки: АО «НПО Лавочкина», 2020. 232 с.

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

Borovin G.K., Grushevskii A.V., Tuchin A.G., Tuchin D.A. Russian exploration of Venus: Past and Prospects // *Mathematica Montisnigri*. 2019. Vol. XLV.P. 137-148. DOI 10.20948/mathmontis-2019-45-12.

Статья поступила в редакцию 28.11.2024

Статья после доработки 05.12.2024

Статья принята к публикации 09.12.2024