

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 91, номер 11, 2021

---

---

## НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН “ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

Вступительное слово президента РАН академика <i>А.М. Сергеева</i>	1003
Выступление генерального директора государственной корпорации “Роскосмос” <i>Д.О. Rogozina</i>	1005
Приветствие экипажа космического корабля “Союз МС-18” космонавтов <i>Олега Новицкого</i> и <i>Петра Дуброва</i>	1009
Приветственное слово заместителя председателя Правительства Российской Федерации по вопросам оборонно-промышленного комплекса <i>Ю.И. Борисова</i>	1010
<i>М. Я. Маров</i> Основоположники практической космонавтики С.П. Королёв и М.В. Келдыш	1011
<i>Ю. М. Батулин</i> Академия наук и космос. Исторические аспекты	1019
<i>В. А. Соловьёв, А. А. Коваленко</i> Пилотируемая космонавтика: достижения и перспективы	1029
<i>А. И. Григорьев, О. И. Орлов, В. М. Баранов</i> Космическая медицина. Научные основы, достижения и вызовы	1036
<i>А. С. Коротеев</i> Использование ядерной энергии в космических системах	1041
<i>Р. А. Сюняев</i> Орбитальная обсерватория “Спектр-РГ”: карты неба в рентгеновских лучах	1048
<i>Л. М. Зелёный, А. В. Захаров, И. А. Кузнецов, А. В. Шеховцова</i> Лунная пыль как фактор риска при исследовании Луны	1063
<i>Н. А. Тестоведов, С. Н. Карутин</i> Космическая геодезия, связь и навигация: история развития, состояние и перспективы	1074
“Вклад академической науки в развитие космической отрасли” <i>Постановление научной сессии общего собрания членов РАН</i>	1083
Общая дискуссия	1089

---

---

# CONTENTS

---

**Vol. 91, No. 11, 2021**

---

## **SCIENTIFIC SESSION OF THE GENERAL MEETING OF RAS MEMBERS “CONTRIBUTION OF ACADEMIC SCIENCE TO THE DEVELOPMENT OF THE SPACE INDUSTRY”**

---

Introductory speech by the President of the Russian Academy of Sciences Academician <i>A.M. Sergeev</i>	1003
Speech by the General Manager of the State Corporation “Roscosmos” <i>D.O. Rogozin</i>	1005
Greeting from the of the Soyuz MS-18 spacecraft crew cosmonauts <i>Oleg Novitsky and Pyotr Dubrov</i>	1009
Welcome speech by the Deputy Chairman of the Government of the Russian Federation for the Military-Industrial Complex <i>Yu.I. Borisov</i>	1010
<i>M.Ya. Marov</i>	
The founders of practical astronautics S.P. Korolev and M.V. Keldysh	1011
<i>Yu. M. Baturin</i>	
Academy of Sciences and Space. Historical aspects	1019
<i>V. A. Soloviev, A. A. Kovalenko</i>	
Manned astronautics: achievements and prospects	1029
<i>A. I. Grigoriev, O. I. Orlov, V. M. Baranov</i>	
Space medicine. Scientific foundations, achievements and challenges	1036
<i>A. S. Koroteev</i>	
The use of nuclear energy in space systems	1041
<i>R. A. Sunyaev</i>	
Orbital observatory “Spektr-RG”: maps of the sky in X-rays	1048
<i>L. M. Zeleny, A. V. Zakharov, I. A. Kuznetsov, A. V. Shekhovtsova</i>	
Lunar dust as a risk factor in the study of the Moon	1063
<i>N. A. Testoyedov, S. N. Karutin</i>	
Space geodesy, communications and navigation: history of development, status and prospects	1074
“The contribution of academic science to the development of the space industry” <i>Resolution of the Scientific Session of the General Meeting of RAS Members</i>	1083
General discussion	1089

---

— НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
— “ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ” —

**ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ПРЕЗИДЕНТА РАН  
АКАДЕМИКА А.М. СЕРГЕЕВА**

DOI: 10.31857/S0869587321110116

12 апреля 1961 г. впервые в истории человечества был осуществлён пилотируемый космический полёт. Многие из нас помнят этот день великого торжества. Именно такие события, когда страна демонстрирует своё мировое превосходство, навсегда входят в историю, и 12 апреля 1961 г. — наш великий праздник.

В 1960–1970-е годы развитие нашей космической промышленности происходило при активном участии Академии наук Советского Союза. Вклад АН СССР в великие достижения отечественной космонавтики огромен. В 1959 г. был создан Межведомственный совет по космическим исследованиям, который возглавил академик М.В. Келдыш. Этот совет работал под его руководством около 20 лет. Мстислав Всеволодович был известен как руководитель совета, но широкая общественность не была осведомлена о том, что он принимал ключевые решения в области развития космонавтики и назывался главным её теоретиком. Этот совет принимал очень важные решения и традиционно возглавлялся руководителями Академии наук. Надо сказать, что деятельность совета была построена таким образом, что он играл роль заказчика работ, которые выполнялись в стране в интересах обеспечения научной космической программы.

В 1992 г. этот совет был преобразован в Совет по космосу при Российской академии наук и до сих пор продолжает активно работать. Именно на этой площадке мы совместно с “Роскосмосом” обсуждаем насущные задачи и проблемы, принимаем важные решения. Сотрудничество отечественной науки с космической промышленностью было очень эффективным на протяжении всех 60 лет пилотируемой космонавтики. Сегодня нам предстоит рассказать об этом сотрудничестве, о достигнутых результатах.

Должен сказать, что в последние десятилетия мы не очень удовлетворены тем, как обстоят дела в освоении космоса. Это обусловлено прежде всего экономическими трудностями, а также тем, что страна работает в совсем других социально-экономических условиях. Тем не менее мы прилагаем максимум усилий для того, чтобы космическая программа развивалась. Федеральная космическая программа на 2016–2025 гг. включает

большое количество проектов, связанных с научным космосом. Мы вместе с Д.О. Рогозиным работаем рука об руку, для того чтобы сохранить финансирование этой программы, инициировать в её рамках новые проекты. Ведь развитие научного космоса — визитная карточка каждой из стран, покоряющих космос.

Надо иметь в виду, что новые задачи, которые мы ставим в научном исследовании космоса, безусловно, требуют новых решений со стороны космической промышленности. Проводимые и будущие эксперименты предполагают развитие космической техники, новых средств выведения и доставки аппаратов на орбиту. Это стоит очень дорого. Поэтому приходится находить такие решения, которые позволяли бы науке инициировать важные проекты, а космическая отрасль находила бы возможности осуществлять своими средствами реализацию подобных проектов. Это касается и околоземного космоса, и исследования планет, и дальних миссий.

Сейчас планируется ряд новых проектов в рамках федеральной космической программы. Это и выведение нашей новой орбитальной станции после 2025 г., и программа освоения Луны, и расширение дистанционного зондирования Земли, и полёты к далёким планетам, которые требуют новых средств передвижения. Мы надеемся, что научный космос будет развиваться в том числе благодаря созданию новых средств выведения и доставки.

Кооперация между Академией наук и “Роскосмосом” очень важна ещё в одном аспекте. Освоение космоса — это не только национальные программы, но и международное сотрудничество. Можно сказать, что это залог мирной жизни на Земле. Мы с вами прекрасно помним, что в 1970-е годы, на фоне очень накалённой международной обстановки, первая стыковка “Союза” с “Аполлоном”, совместные эксперименты в космосе существенным образом способствовали разрядке напряжённости. Когда мы говорим о Международной космической станции, о совместных экспериментах, о том, что мы работаем в кооперации с американцами, европейцами, представителями других стран, мы, помимо прочего, имеем в виду, что наши усилия в кос-

мосе будут способствовать сохранению мирной обстановки на Земле.

Современные достижения науки и технологий должны будут прийти в космос. Речь идёт и о роботизированной космонавтике, использовании искусственного интеллекта, и о многом другом. Главное для нас — работать так, чтобы темпы освоения космоса нашей страной соответствовали требованиям времени, чтобы Россия всегда оставалась в числе стран-лидеров в этой области. В этом смысле научный космос, решение тех за-

дач, которые мы с вами ставим, доказывая необходимость их реализации, — важнейший вклад академической науки в освоение космоса.

Приветствую вас на этом замечательном собрании, ещё раз поздравляю с выдающимся юбилеем. Хотелось бы пожелать нам всем, чтобы и в будущем в нашей стране происходили события, связанные с развитием нашей науки и техники, которые оказывались бы навечно вписанными в историю России.

— НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
— “ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ” —

**ВЫСТУПЛЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОРПОРАЦИИ “РОСКОСМОС” Д.О. РОГОЗИНА**

DOI: 10.31857/S0869587321110104

Совсем недавно наблюдательный совет Госкорпорации “Роскосмос” рассмотрел и принял стратегию развития на десятилетний период. То есть сейчас мы располагаем всеми необходимыми документами, которые определяют рамки возможного и необходимого с точки зрения развития отечественной космонавтики.

Сегодня работа в области отечественной космонавтики ведётся по трём основным направлениям.

Первое — это военный космос. Известно, что даже пилотируемая космонавтика формировалась в недрах тех научных коллективов, которые должны были решить колоссально важную задачу — обеспечить ядерную стратегическую стабильность и безопасность нашей страны. Огромное количество работ, которые сегодня ведутся “Роскосмосом” и его предприятиями, связано именно с этим направлением, с созданием материальной основы стратегического ядерного щита страны и орбитальных группировок в интересах Министерства обороны РФ и других специальных служб, которые выступают заказчиками, а предприятия “Роскосмоса” — исполнителями и генеральными подрядчиками работ.

Второе направление — это так называемый экономический космос, то есть космические системы, обеспечивающие повышение качества жизни людей. Здесь “Роскосмос” сам, по сути, выступает в роли заказчика совместно с другими федеральными органами исполнительной власти. Речь идёт о дистанционном зондировании Земли, в том числе с переходом на космические аппараты, работающие с фарами, о радиолокации и многом другом, что крайне важно в условиях, когда значительная часть территории нашей страны закрыта облачностью или полярными ночами.

Крайне важно развитие навигационных систем, повышение их надёжности и точности, создание большого количества коммерческих сервисов на базе навигации ГЛОНАСС, в частности система “Эра ГЛОНАСС”, которая сегодня успешно действует в нашей стране. Мы иногда создаём вещи, не имея полного представления о том, как они работают вживую. Я поинтересовался статистикой. Оказывается сейчас такого рода системами оснащены все автомобили, которые

производятся в Российской Федерации или завозятся на территорию нашей страны. И это спасло тысячи человеческих жизней.

Мы привыкли к тому, что в смартфонах действует навигатор. Но, наверное, мало, кто знает, что навигатор работает на основе чипа, получающего сигнал, как GPS, так и ГЛОНАСС. Миллиарды телефонных аппаратов, всевозможных гаджетов являются получателями нашей навигационной системы и сигнала. К тому же разряду можно причислить цифровое телевидение, интернет и многое другое. Изменение качества жизни в нашей стране — это та задача, которая решается с помощью экономического космоса.

Третье направление — это научный космос. Тут часто возникают проблемы, поскольку наука финансируется по остаточному принципу, расходы на неё часто пытаются сокращать. Мы с президентом РАН дважды обращались по этому поводу к Президенту России. Результатом первого обращения стало совещание под председательством В.В. Путина в ноябре 2020 г., когда были даны необходимые указания правительству по снижению уровню финансирования космической науки. Недавнее совещание прошло непосредственно 12 апреля, на нём с докладами выступили мы с А.М. Сергеевым, а также вице-премьер Ю.И. Борисов именно по финансированию научных космических программ.

Довольно часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда не зацепившись за какие-то конкретные вещи, которые крайне важны для формирования подходов к фундаментальным космическим исследованиям, мы строим большие космические планы, забалтывая то, что действительно необходимо делать. Одно из ограничений, которое надо иметь в виду — это целеполагание. Если вы не видите второго шага, который должен следовать за первым, не надо делать первый шаг. Я каждый месяц приезжаю на Байконур, живу там на полигоне. Из моего окна постоянно вижу три стартовых комплекса “Энергия—Буран”, циклопические, гигантские, в каждый из них вложено колоссальное количество народных денег, пота и крови. Но что в итоге, кроме двух пусков “Скифа” и “Бурана”? — Ничего. Это упрек и

напоминание о том, что, если ты не можешь сделать второй шаг, лучше за дело не браться.

Это касается не только нас, но и наших так называемых космических партнёров. В качестве примера можно привести лунную программу США: слетали, сфотографировались, дальше что? Дальше пустота в течение десятилетий и натужные попытки за колоссальные деньги вновь создать стратегическую космическую систему, пилотируемый корабль, новые скафандры и т.д.

Я хочу подчеркнуть тот факт, что в фундаментальных космических исследованиях крайне важно понимать, как нужно действовать после того, как предпринят первый шаг, насколько сложнее будет следующий этап, продумано ли всё на перспективу. Именно поэтому фундаментальные космические исследования надо планировать как минимум на десять лет вперёд, а на самом деле перспективу надо сдвигать на 50 лет, чётко осознавая, что нам предстоит.

Второе ограничение, помимо необходимости понимания следующего шага, — это финансы. Современная российская космонавтика располагает далеко не теми ресурсами, которыми располагала советская космонавтика. У нас колоссальные финансовые ограничения. В таких условиях, с учётом недостатка людских и иных ресурсов, бюджета, мы должны жёстко, крайне рационально определять приоритеты, выбирать только те исследования, которые дадут заметный эффект, ни в коем случае нельзя включаться в соревнования, где нам изначально уготовано второе или третье призовые места. Важно, кроме того, не повторять чужое, не тратить ресурсы нации на то, что уже кем-то сделано, — надо двигаться в неизведанном направлении, сосредоточиться на том, что будет иметь мировое значение.

Я имею в виду вполне конкретные вещи, когда мы сейчас стоим на пороге возобновления лунной программы. К концу 2021 г. должна быть полная готовность к запуску “Луны-25”, мы спустя 45 лет возвращаемся на Луну. Последовательность действий предполагает наращивание компетенций, укрепление профессионализма молодого коллектива разработчиков НПО им. С.А. Лавочкина, которое будет двигаться по пути от более простого к более сложному. Только после того, как все технологии пройдут отработку на автоматах, можно будет говорить о работе экипажа.

Повторюсь: наши исследования Луны, полёт на Марс и к Венере — всё это требует осознанного выбора, исходя не из того, что интересно, а из того, что необходимо для страны, для престижа государства и развития фундаментальной науки.

Поэтому споры между нами будут продолжаться, в том числе относительно космического аппарата “Бион”, позицию по которому наших учёных я не очень понимаю. Зачем на флоре и фа-

уне проверять то, что давно проверено на экипаже? Надо ставить другие задачи. Сегодня мы говорим о новой орбитальной станции, которая будет работать на высоком наклонении — на 97°–98° солнечной синхронной орбиты. Там присутствуют напряжённые режимы, в том числе по радиации. Так, может быть, следует сначала провести медико-биологические исследования в этой области, а потом уже изучать, какое воздействие испытывает экипаж? Не получится ли так, что по “Биону” мы будем двигаться в одну сторону, а в медико-биологических исследованиях в интересах человека — в другую? Где здесь логика? На наш взгляд, в такого рода исследованиях прежде всего надо отрабатывать все те нагрузки, которые связаны с воздействием на экипаж.

То же касается миссии по Венере. Вы уверены, что нам хватит денег на все четыре миссии, включая “Венеру-Д”, и три национальные миссии? Я не уверен. Если выбирать из этих миссий, то именно те, которые способны принести колоссальный синергетический эффект. А это прежде всего миссия с забором грунта с этой планеты и возвращение на Землю. Да, это рискованно, но вспомним отцов-основателей отечественной космонавтики, которые не боялись ставить на кон свою репутацию и даже свободу, чтобы добиться уникальных научных результатов, и прославили нашу космонавтику на века, а мы теперь можем с гордостью говорить, что мы первые.

На чём я предложил бы сосредоточиться сегодня в рамках проводимых исследований? Первое, как я уже сказал, — космос для людей. Не абстрактный космос, а космос, позволяющий создавать совершенно новые технологии для Земли. Что касается непосредственно России, то только из космоса мы сможем связать огромную страну с малым населением — ведь 140 млн человек на такой гигантской территории — это ничтожно мало. Пространство, где 70% занимает зона вечной мерзлоты, невозможно связать оптоволоконными системами. Только космическая связь может объединить страну, только космическое наблюдение позволит сделать крайне выгодными такие транзитные маршруты, как Северная морская путь. Радиолокация и стабильная связь, широкополосный доступ в Интернет по всему Северному морскому пути превратят его в безальтернативный транзитный маршрут мирового значения. А это миллиарды и миллиарды вложений в нашу экономику, часть из которых пойдёт на развитие науки и космические исследования. И в этом направлении уже сделан первый шаг, построены первые три крупные атомные ледокола мощностью 60 МВт, которые способны вскрывать лёд толщиной до 2.8 м. Но чтобы команда ледокола могла ориентироваться в пространстве, необходима космическая группировка, которая будет находиться над Северным морским путём.

Я уже не говорю о других возможностях, которые заложены в программу “Сфера”. Крайне важно не позднее конца второго квартала нынешнего года утвердить эту программу, сделать её десятилетней и стабильно финансируемой. Это позволит нам перейти на новые платформы, делать космические аппараты не штучно, а серийно. Здесь роль Академии наук может быть колоссальной. Потому что в данном случае речь идёт о новой связи, новых материалах, новых инженерных решениях, новой математике по моментальной обработке снимков и формированию бесшовных карт.

Следующая задача — создание новой многофункциональной пилотируемой орбитальной станции. Нам нужна станция, благодаря которой можно будет проводить эксперименты не внутри, а снаружи, то есть именно её внешний борт должен стать платформой для целого созвездия космических аппаратов, ориентированных на Землю и обеспечивающих наблюдение с этой уникальной орбиты всей планеты, во всех спектрах — от обычного видимого до инфракрасного и радиолокационного. Наличие экипажа на станции позволит сделать всё оборудование ремонтпригодным и тестировать новое экспериментальное оборудование, возвращая его на Землю. К решению этой проблемы надо приступать немедленно, и мы рассчитываем на участие Академии наук в формировании не только облика будущей станции (он более-менее понятен), но главным образом в разработке программы международных экспериментов.

Третье направление — это создание транспортных систем стратегического назначения в интересах человечества. Что я имею в виду? С нашей точки зрения, пригодных условий для жизни людей в рамках Солнечной системы, помимо Земли, не существует. Колонизация человечеством других планет возможна только за пределами Солнечной системы. Для этого необходимы стратегические транспортные системы, которые будут работать не на химических двигателях, а на ядерной космической энергетике. На сегодняшний момент у нас есть небольшая фора, шесть-семь лет, не больше, в рамках той работы, которую мы ведём по энергетическому модулю в рамках программы “Нуклон”. Если удастся решить основные научные задачи, которые связаны с разработкой этой машины, если в 2030 г. в соответствии с нашими планами она будет выведена на орбиту, это станет колоссальным прорывом не только в соревновании ведущих космических держав — это будет эпохальное достижение с точки зрения возможности человечества познавать мир за пределами Солнечной системы. Именно этим надо заниматься, это приоритетная задача, намного более важная, чем всё остальное, чем мы занимались до сих пор.

Четвёртое — это проблема работы в дальнем космосе, проблема выживания экипажа в столь агрессивной среде, как среда за пределами геомагнитного поля. По этой тематике мы продуктивно взаимодействуем с Институтом медико-биологических проблем РАН.

Следует иметь в виду, что работа на околоземной станции осуществляется при постоянной поддержке Земли. Случись нештатная ситуация, всегда можно отправить пилотируемый корабль-спасатель, вернуть на Землю экипаж или кого-то из членов экипажа, оказать необходимую помощь, есть возможность снабжать станцию водой, кислородом и многими другими жизненно важными продуктами. В дальнем космосе ничего этого не будет, а значит, вся система жизнеобеспечения должна быть создана на самом корабле или прилётном модуле. Это и воздух, и полное обращение воды, и выращивание всего необходимого, чтобы компенсировать хотя бы часть недостающих продуктов, и телемедицина, и аддитивные технологии для выращивания деталей, которые выходят из строя и которые нечем заменить. Я уже не говорю про задачу гибернации и многие другие направления в работе с экипажем, которые помогут перенести перелёты на большие расстояния.

Я, конечно, не хочу смущать вас недостижимыми планами, относящимися к отдалённому будущему, но если не заниматься указанными вопросами сейчас, то когда придёт время и техника будет готова, мы не сможем отправить экипажи, потому что мы не сумеем обеспечить их всем необходимым. Работа в дальнем космосе потребует развития робототехники, новых материалов, аддитивных технологий, лазерной связи, искусственного интеллекта — эти задачи надо буквально сегодня распределить по ведущим академическим институтам, которые должны работать в рамках единого замысла.

Наконец следует сказать несколько слов о нашем взаимодействии. У нас сложились партнёрские отношения и глубокое взаимопонимание с Институтом космических исследований РАН и ИМБП, который я уже упоминал. Но это сотрудничество нужно укреплять. Вы знаете, что сейчас активными темпами идёт строительство Национального космического центра — инженерного гнезда “Роскосмоса”, где на 250 тыс. квадратных метров уже в 2023 г. будут размещены не менее 20 тыс. инженеров ведущих КБ, расположенных в Москве. Рядом базовая кафедра ведущих университетов, 50 гектаров ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, где остаётся опытное производство. Я в очередной раз приглашаю Институт медико-биологических проблем РАН и Институт космических исследований РАН переехать с нами на новую площадку, где будет возможность постоянно об-

щаться с конструкторами и инженерами. Это будет полезно, потому что нет ничего более полезного, чем человеческое общение, когда возникают личные отношения и поддержка друг друга.

Последнее, о чём мне хотелось бы сказать, — это популяризация науки. Можно сделать большое дело, но об этом никто не узнает, и вы останетесь неизвестным героем, если не говорить об этом во всеуслышание. Посмотрите, как сегодня работает пропагандистская машина наших американских коллег. Результаты любых исследований они преподносят как фундаментальное интеллектуальное достижение, конечно, американское. А как мы рекламируем наши достижения? Характерный пример — “Спектр-РГ”. Какая работа проделана, уникальный аппарат находится в точке Лагранжа L2, осуществляет уже второй обзор звёздного неба! Информация, которую мы получаем от этих телескопов, тянет на несколько Нобелевских премий. Но кто об этом знает даже в нашей стране? Кроме нескольких интервью и слабых попыток популяризовать эту работу,

ничего сделано не было. Мы не умеем должным образом преподнести общественности собственное достижение, которое потребовало героических усилий. А ведь цель в данном случае — не потешить собственное тщеславие, цель — вложить в головы молодёжи мысль о том, что нам есть чем гордиться, есть на кого равняться.

Сегодня, когда мы отмечаем 60-летие полёта Гагарина, особенно важно помнить собственную историю, важно гордиться своими предками. Но в то же время нельзя упускать из виду, что сегодня в нашей среде есть талантливые инженеры и конструкторы, создатели и организаторы производств, крупные учёные, которые делают открытия мирового уровня. Пусть страна при жизни узнает их имена. Давайте относиться к себе с гораздо большим уважением, видеть и Челомея, и Королёва, и Глушко, и всех остальных великих среди тех молодых ребят, которые сегодня пришли в наши коллективы и за небольшие зарплаты делают колоссальную работу, которая принесёт нашей стране новую славу.

— НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
— “ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ” —

**ПРИВЕТСТВИЕ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ “СОЮЗ МС-18”  
КОСМОНАВТОВ ОЛЕГА НОВИЦКОГО И ПЕТРА ДУБРОВА**

DOI: 10.31857/S0869587321110086

**Олег Новицкий:** Уважаемые участники общего собрания членов Российской академии наук! Мы рады приветствовать вас из космоса в эти апрельские дни Года науки и технологий. Мы находимся здесь благодаря тысячам учёных и инженеров, которые за много десятилетий до 1961 г. начали путь человечества в космос: физики и химики, врачи и биологи, математики и инженеры изучали космос доступными им способами, создавали ракеты и системы, которые бы позволили человеку жить в отрыве от Земли.

**Пётр Дубров:** На вопрос, зачем это надо, мы уверены, каждый из них ответил бы: “Благодаря космосу мы узнаём о мире много больше того, что можем открыть, находясь на Земле”. Многие институты Академии наук непосредственно занимались подготовкой первой пилотируемой экспедиции на орбиту вокруг Земли. Президент академии, выдающийся математик Мстислав Келдыш возглавлял научную программу космической деятельности нашей страны.

**Олег Новицкий:** Космические полёты сразу же начали приносить те плоды, которых от них ожи-

дали. Учёные смогли непосредственно изучать космическое пространство, привезти на Землю частицы вещества другого небесного тела, наконец узнать гораздо больше о том, что происходит с земными организмами и человеком под воздействием факторов космического полёта. Множество открытий пришло из смежных областей — электроники, материаловедения и других. Наука XX века шагнула далеко вперёд, и космонавтика была одним из главных ускорителей этого прогресса.

**Пётр Дубров:** Мы желаем вам, чтобы этот процесс продолжался. Впереди Луна и Марс, планеты-гиганты, крохотные астероиды. Может быть, человек не сможет побывать во всей Солнечной системе, но его мысль, воплощённая в космических аппаратах и научных приборах, наверняка достигнет самых далёких галактик. Поздравляем всех участников общего собрания РАН с 60-летием полёта Юрия Гагарина, первого человека, шагнувшего в космос, желаем вдохновения, творческих озарений, здоровья и доброго полёта. Поехали!

— НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
— “ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ” —

**ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО ЗАМЕСТИТЕЛЯ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ  
ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ВОПРОСАМ  
ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА Ю.И. БОРИСОВА**

DOI: 10.31857/S0869587321110037

Сегодняшнее мероприятие посвящено историческому событию в жизни нашей страны и всего мирового сообщества — первому орбитальному полёту человека в космос. Знаменательно, что 60-летие полёта Юрия Гагарина отмечается в год, объявленный в нашей стране годом науки и технологий.

После запуска первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. и полёта Юрия Гагарина наша страна стала признанным лидером в освоении космического пространства. Это стало возможным благодаря труду отечественных учёных, основоположников теоретической космонавтики Константина Эдуардовича Циолковского, Николая Ивановича Кибальчича, Фридриха Артуровича Цандера, Юрия Васильевича Кондратюка, Георгия Эриховича Лангемака, Михаила Клавдиевича Тихонравова и многих других.

В 1948 г. под руководством Сергея Павловича Королёва была разработана и запущена первая советская баллистическая ракета Р-1, а затем целая серия оперативно-тактических, стратегических и межконтинентальных баллистических ракет военного назначения. Это обеспечило запуск первого в мире искусственного спутника Земли и выход человека в космос. Сам факт грандиозного прорыва нашей страны, ещё не оправившейся от последствий Великой Отечественной войны, в космическое пространство отражает высокий уровень отечественной науки, негибаемую волю и колоссальный творческий потенциал нашего народа.

Последующее развитие космических технологий во многом определило эффективное развитие науки, экономики, оборонно-промышленного комплекса, энергетики, способствовало повышению обороноспособности государства и обеспечению его безопасности.

Академия наук внесла определяющий вклад в становление космического ракетостроения и освоение космоса. Многие свершения стали возможными благодаря таланту и творческому гению отцов-основателей практической космонавтики — главного конструктора космонавтики академика Королёва, главного теоретика космонавтики академика Келдыша и многих других прославленных учёных, их самоотверженному

труду и плодотворному, конструктивному взаимодействию с проектными организациями и промышленными предприятиями.

В настоящее время наша жизнь немыслима без космической связи, спутникового телевидения, спутниковой навигации, дистанционного зондирования земли. Космические технологии и информация, получаемая из космоса, широко используются в целях мониторинга окружающей среды, предупреждения и оценки последствий чрезвычайных ситуаций, а также в интересах различных отраслей экономики. Велика роль космических технологий и ракетной техники в обеспечении обороноспособности страны и национальной безопасности государства. Достаточно сказать, что в настоящее время 90% информации войска получают из космоса или через космос, что обеспечивает их мобильность и эффективность.

Мы высоко чтим генеральных конструкторов, членов Академии наук — Владимира Николаевича Челомея, Анатолия Ивановича Савина, Дмитрия Ивановича Козлова, Михаила Кузьмича Янгеля и других, внёсших огромный вклад в создание военно-космических систем. Российская академия наук продолжает бережно хранить традиции всех поколений предшественников, их уникальное интеллектуальное космическое наследие. Сегодня Академии наук крайне важно активно участвовать в решении масштабных общенациональных задач, связанных с ответами на большие вызовы, наращивать фундаментальные поисковые и прикладные исследования в космических областях, как по приоритетам научно-технологического развития России, так и для повышения обороноспособности и обеспечения безопасности нашего государства.

Позвольте выразить уверенность в том, что нынешнее Общее собрание членов Российской академии наук и Научная сессия, посвящённая 60-летию полёта в космос Юрия Алексеевича Гагарина, пройдут на высоком научном уровне, позволят участникам обменяться накопленным научным опытом, обсудить пути дальнейшего развития космической отрасли, наметить планы будущих работ по исследованию и освоению космического пространства.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

ОСНОВОПОЛОЖНИКИ ПРАКТИЧЕСКОЙ КОСМОНАВТИКИ  
С.П. КОРОЛЁВ И М.В. КЕЛДЫШ

© 2021 г. М. Я. Маров<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

\*E-mail: marovmail@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 05.06.2021 г.

Принята к публикации 19.07.2021 г.

С.П. Королёв и М.В. Келдыш принадлежат к плеяде выдающихся учёных и создателей основных направлений научно-технического прогресса XX столетия. С их именами связана новая страница в истории человеческой цивилизации — начало изучения и освоения космического пространства. Они внесли неоценимый вклад в достижения отечественной космонавтики и заложили основы её дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** Королёв, Келдыш, космос, история космонавтики, первый ИСЗ, полёт Гагарина, лунная гонка, лунно-планетные исследования, наследие.

DOI: 10.31857/S0869587321110074

В юбилейный год полёта Юрия Гагарина мы с глубочайшим уважением и благодарностью вспоминаем многочисленные коллективы учёных, инженеров, специалистов, которые сделали возможным это историческое свершение. Во главе этих коллективов стояли наши выдающиеся современники, основоположники практической космонавтики, настоящие космические лидеры — С.П. Королёв и М.В. Келдыш. Именно они смогли объединить и сплотить единством цели, преданностью идее освоения космоса поколение людей, положивших начало новому этапу развития нашей цивилизации.

Академики Королёв и Келдыш принадлежат к плеяде выдающихся учёных, создавших славу

отечественной науки и техники. Их знают как руководителей крупнейших государственных проектов, как содружество “трёх К” (Курчатов, Королёв, Келдыш), сыгравшее определяющую роль в создании ядерного щита страны. В течение многих лет они были известны широкой общественности как Главный конструктор и Главный теоретик космонавтики, открывшие космическую эру человечества. Они заложили основы практической космонавтики, воплотив в жизнь идеи и теоретические предсказания о возможности полёта в космос их замечательных предшественников К.Э. Циолковского, Ю.В. Кондратюка и Ф.А. Цандера. Разносторонняя творческая деятельность Королёва и Келдыша оставила глубочайший след в отечественной и мировой истории.



МАРОВ Михаил Яковлевич — академик РАН, заведующий отделом планетных исследований и космохимии ГЕОХИ РАН.

КОСМОНАВТИКА:  
ИСТОРИЧЕСКИЕ КОРНИ

Практическая космонавтика зарождалась в условиях напряжённой международной обстановки, когда Советский Союз должен был в срочном порядке создавать атомное оружие и средства его доставки на большие расстояния. М.В. Келдыш вместе с И.В. Курчатовым и другими учёными-физиками сыграл исключительно важную роль в создании атомной, а затем и термоядерной



М.В. Келдыш и С.П. Королёв

бомбы. Он возглавил коллективы математиков, которые с помощью математического моделирования провели ряд исследований физических процессов и выполнили сложнейшие модельные расчёты, лежащие в основе проектно-конструкторских работ по атомному и термоядерному оружию. Моделирование с использованием искусных вычислительных методов оказалось единственным способом познания процессов, исключая возможность их экспериментального изучения в лабораторных условиях или естественной природной среде. Именно тогда Келдышем были заложены основы прикладной математики, получившей впоследствии бурное развитие.

С.П. Королёву принадлежит ключевая роль в создании первых ракетных комплексов как средств доставки атомных зарядов на межконтинентальные расстояния. Совместно с главными конструкторами, возглавлявшими коллективы специалистов по созданию ракетных двигателей, систем управления, радиосвязи, электропитания и наземных комплексов, он разработал и провёл экспериментальную отработку нескольких поколений баллистических ракет.

Создание отечественного ракетно-ядерного щита (“меча” как средства возмездия, по Б.Е. Чертоку [1]) в разгар холодной войны гарантированно обеспечило безопасность страны и длительное мирное сосуществование двух сверхдержав. Наряду с этим были заложены основы проектирования и производства средств для полётов в космос.

Обращаясь к историческим корням космонавтики, мы говорим о сочетании теоретических ис-

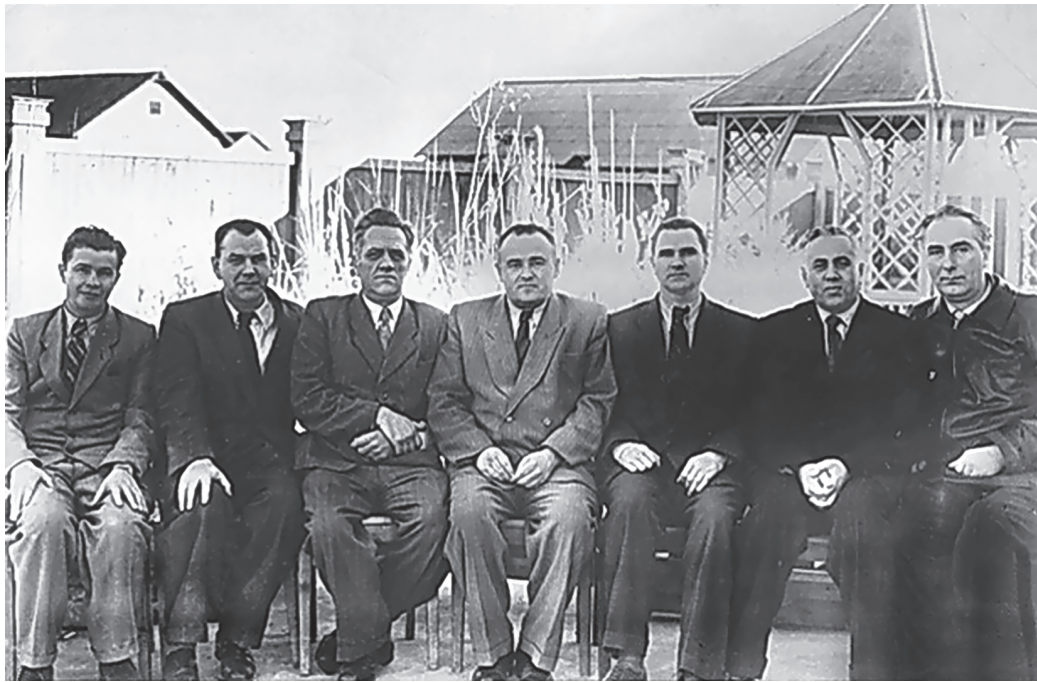
следований наших выдающихся предшественников с первыми разработками и опытными пусками пороховых и жидкостных ракет, выполненными в 1930-х годах талантливыми инженерами Газодинамической лаборатории (ГДЛ) и Группы изучения реактивного движения (ГИРД). Эти исследования стали важной вехой на пути развития ракетной техники в последующие десятилетия.

В 1946 г. было основано ОКБ-1 под руководством С.П. Королёва, где начались разработки и испытания семейства ракет на жидком топливе Р-1 — Р-5 по образу и подобию немецкой баллистической ракеты “Фау-2” [2], которые привели к созданию в 1956 г. оригинальной конструкции многоступенчатой межконтинентальной баллистической ракеты Р-7, способной нести атомный заряд и достигать потенциального противника за океаном. Такой успех сильно отрезвил сторонников силового давления на Советский Союз и предотвратил вероятность третьей мировой войны. Как показали расчёты, Р-7, кроме того, обеспечивала возможность вывода искусственного тела на околоземную орбиту.

В том же 1946 г. М.В. Келдыш возглавил НИИ-1 — бывший Реактивный научно-исследовательский институт Министерства авиационной промышленности СССР, в котором решались многие важные вопросы ракетостроения и их практического использования. Здесь в предвоенные годы были созданы знаменитые ракетные миномёты “Катюша”. Под руководством М.В. Келдыша в НИИ-1 проводились комплексные исследования различного типа ракетных двигателей, решались актуальные задачи теории горения, физической газовой динамики, гиперзвуковой аэродинамики, теплообмена в вакууме, создания составных ракет с жидкостным ракетным двигателем [3]. Результаты этих исследований были воплощены Келдышем и его коллегами в межконтинентальной сверхзвуковой крылатой ракете с ядерным зарядом (проект “Буря”), прошедшей успешные лётные испытания.

### ПРЕЛЮДИЯ К ЗАПУСКУ ПЕРВОГО ИСЗ

В середине 1940-х годов началось многолетнее творческое сотрудничество и дружба выдающихся пионеров практической космонавтики — конструктора-практика Королёва и идеолога-теоретика Келдыша. В руководимом С.П. Королёвым ОКБ-1 и тесно сотрудничавших с ним смежных организациях были созданы великолепные школы отечественного ракетостроения и спроектированы первые варианты искусственных спутников Земли. С.П. Королёв возглавлял легендарный Совет главных конструкторов, членами которого были В.П. Глушко, В.П. Бармин, Н.П. Пилюгин, М.С. Рязанский, В.И. Кузнецов. Это был настоящий штаб единомышленников, где решались ос-



Члены королевского Совета главных конструкторов (слева направо): А.Ф. Богомолов, М.С. Рязанский, Н.А. Пилюгин, С.П. Королёв, В.П. Глушко, В.П. Бармин, В.И. Кузнецов

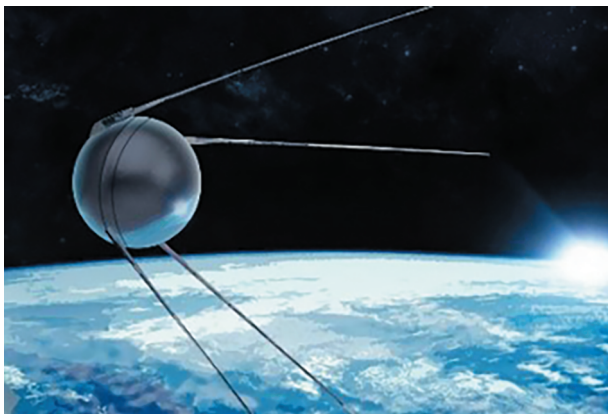
новые вопросы создания ракетных и космических комплексов.

По существу, всё пришлось делать с нуля, к тому же выдерживая достаточно жёсткие сроки, отводимые на разработки и испытания. Зачастую это не позволяло уделять достаточного внимания наземной отработке изделий, за что приходилось расплачиваться многочисленными авариями при лётных испытаниях. Тем не менее надо отдать должное Королёву, его колоссальной требовательности и настойчивости. Эти особенности его характера находили понимание и поддержку у членов его Совета и позволяли обеспечивать наши прорывные достижения, начиная с запуска первого ИСЗ.

Одновременно с техническими работами по созданию ракет и спутников М.В. Келдыш, наряду с исследованиями по атомной проблеме и руководством НИИ-1, возглавил в Математическом институте им. В.А. Стеклова АН СССР (МИАН) талантливую группу молодых учёных с целью изучения теоретических проблем космических полётов, включая вывод аппаратов на околоземные орбиты, полёты к Луне и планетам Солнечной системы. Группа вскоре получила статус Отделения прикладной математики МИАН, а позднее на его основе был создан Институт прикладной математики АН СССР, который ныне носит имя его создателя М.В. Келдыша. Институт стал признанным центром по решению многих крупных научно-технических проблем и многоцелевых задач

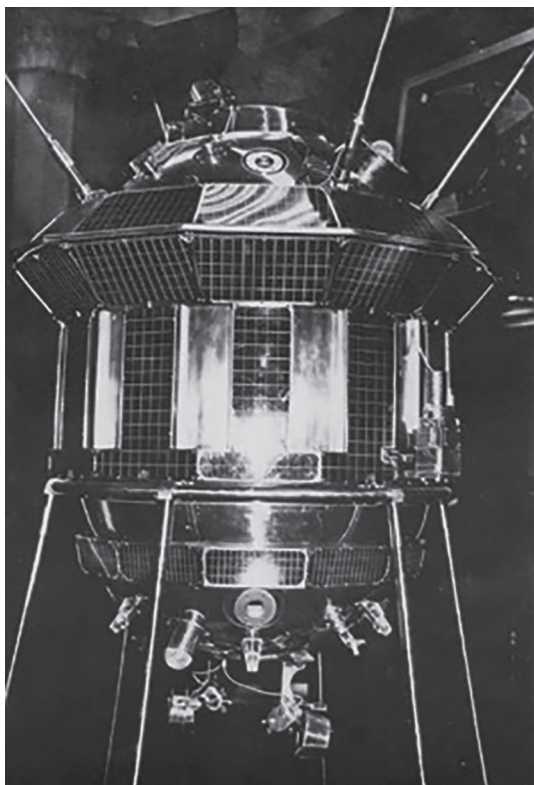
государственной важности, в том числе связанных с баллистическим проектированием и обеспечением полётов космических аппаратов на основе математического моделирования с использованием вычислительных средств.

Тщательно оценив энергетические возможности ракеты Р-7 и перспективы запуска искусственного спутника Земли, С.П. Королёв и М.В. Келдыш вместе со своим замечательным сподвижником, одним из пионеров ракетостроения М.К. Тихонравовым обратились в 1956 г. в ЦК КПСС с запиской, в которой обосновывалась возможность запуска искусственного спутника Земли, и получили согласие на его создание. В том же году М.В. Келдыш по решению Правительства страны возглавил Комиссию по “объекту Д” (так назывался проект первого ИСЗ), которая в 1958 г. была преобразована в главный орган по разработке и координации советских научных и прикладных программ — Межведомственный научно-технический совет по космическим исследованиям (МНТС по КИ) при АН СССР. Совет был закрытым органом, наряду с координацией программ научных и прикладных исследований и перспективных космических проектов он рассматривал ряд оборонных вопросов. В МНТС по КИ входили наиболее авторитетные учёные Академии наук и руководители ведущих предприятий ракетно-космической отрасли, включая С.П. Королёва, членов его Совета главных конструкторов, директоров крупных научно-иссле-



Первый в мире ИСЗ

довательских институтов [3]. На заседаниях МНТС по КИ, регулярно проходивших в институте Келдыша и собиравших весь цвет ракетно-космической отрасли, заслушивались доклады и сообщения по самым актуальным текущим и перспективным проблемам изучения и освоения космоса, принимались ответственные решения, которые докладывались руководству страны, и многие из них становились основой директивных документов. Келдыш был настоящим лидером,



Космический аппарат "Луна-3"

он инициировал острые дискуссии по спорным вопросам, часто переходившие в настоящий мозговой штурм.

### ПЕРВЫЙ ИСЗ И ПОЛЁТ ГАГАРИНА

Запуск 4 октября 1957 г. первого в мире советского искусственного спутника Земли стал эпохальным событием в истории человеческой цивилизации. Он имел громадное значение не только потому, что подтвердил правильность выбора путей решения сложной проблемы выведения тел на космические орбиты, но и убедительно продемонстрировал всему миру выдающиеся достижения советской науки и техники. "Мы сами не сразу осознали всю важность того, что произошло", — вспоминал М.В. Келдыш. В своей лекции в Королевском обществе в Лондоне в 1965 г. он говорил: "Я думаю, что мы по праву можем сказать, что запуск Советским Союзом первого искусственного спутника Земли открыл первую из многих новых страниц науки о Вселенной, которые человек только начал перелистывать. Этот успех был достигнут благодаря высокому уровню развития ракетной техники, которая, я позволю себе выразить надежду, будет всё в большей мере служить развитию науки и полезным для человечества целям. Вероятно, излишне говорить о том, что создание средств для осуществления космических полётов требует высокого уровня организации промышленности, работы многих конструкторских организаций и исследования многих научных проблем" [4].

Исторически незначительный по времени период после начала полётов в космос можно охарактеризовать как время эйфории, когда обнаруживалось много нового о свойствах окружающего Землю космического пространства, предпринимались первые шаги на пути его практического использования, открывались безграничные горизонты полётов в дальний космос. Эпохальным достижениям в первые десятилетия космической эры мы во многом обязаны творческому содружеству С.П. Королёва и М.В. Келдыша. Появилась возможность наблюдения Солнца во всех диапазонах длин волн, были получены уникальные данные об околоземном космическом пространстве, параметрах верхних слоёв атмосферы, структуре и свойствах магнитосферы Земли, особенностях солнечно-земных связей. Астрономия стала всеволновой, избавившись от экранирующего влияния земной атмосферы. Уже в 1959 г. были совершены первые полёты советских космических аппаратов к Луне и сфотографирована её невидимая с Земли обратная сторона — осуществилась многовековая мечта человечества.

Менее чем через четыре года после запуска первого ИСЗ был совершён первый полёт человека в космос. Исторический виток Юрия Гагарина



М.В. Келдыш и С.П. Королёв с участниками эксперимента по фотографированию обратной стороны Луны

вокруг Земли 12 апреля 1961 г. стал настоящим триумфом нашей космонавтики, отправной точкой освоения человеком безграничных пространств за пределами собственной планеты.

Полёт Гагарина положил начало бурному развитию советской пилотируемой космонавтики. Были осуществлены одиночные и групповые полёты космонавтов, в том числе первой женщины-космонавта Валентины Терешковой, совершён выход Алексея Леонова в открытый космос, созданы прообразы первых орбитальных станций [2, 5]. Следует подчеркнуть, что эти достижения стали возможны не только вследствие прогресса космических технологий, но и благодаря успехам нашей космической медицины, до сих пор сохраняющей лидирующие позиции в мире.

### ЛУННО-ПЛАНЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Королёв и Келдыш были энтузиастами исследований Солнечной системы и внесли неоценимый вклад в изучение Луны и планет. Первые попытки мягкой посадки на Луну, первые полёты к Венере и Марсу (1961–1966) сопровождалась досадными неудачами, но это был неизбежный период развития космонавтики, связанный с освоением новой техники, который С.П. Королёв назвал “эпохой познания” [1].

В 1965 г. по инициативе М.В. Келдыша и с согласия С.П. Королёва, перегруженного заданиями по нескольким направлениям космических исследований, работы по лунно-планетной тема-

тике вместе с проектно-конструкторской документацией и бесценным опытом, полученным по результатам испытаний, были переданы из королёвского ОКБ-1 на авиационное предприятие ле-



Ю.А. Гагарин после завершения полёта на корабле “Восток-1”



Первые орбитальные станции «Салют» и «Мир»

генерального авиаконструктора С.А. Лавочкина, вскоре преобразованного в НПО им. С.А. Лавочкина. Его возглавил талантливый инженер, страстный энтузиаст космических исследований Георгий Николаевич Бабакин. Эта инициатива Келдыша, поддержанная руководством страны, имела поистине историческое значение для нашей непилотируемой космонавтики. НПО им. С.А. Лавочкина и его выдающийся лидер Г.Н. Бабакин сыграли громадную роль в создании лунно-планетных автоматов-роботов, ряда астрономических космических обсерваторий и космических аппаратов для прикладных исследований. Бабакин прожил короткую, но очень яркую жизнь, сумев менее чем за шесть лет (1965–1971) создать 15 (!) аппаратов двух поколений для исследования Луны, Венеры, Марса, и этот период нашей космической истории можно по праву назвать «бабакинским ренессансом», о чём сегодня можно только мечтать [6, 7].

Особенно важное значение эти достижения имели в десятилетие космической гонки — состязания между СССР и США в попытке первыми высадить человека на Луну, начавшегося в начале 1960-х годов. У американцев эта задача имела исключительно политическую мотивацию — компенсировать ущерб, нанесённый их престижу запуском первого советского искусственного спутника

Земли и полётом Гагарина. Советский Союз принял вызов и поначалу даже опережал американцев в разработке технических средств. Но затем последовали неудачи, связанные главным образом с аварийными пусками сверхтяжёлой ракеты Н-1, усугубившиеся с уходом из жизни в 1966 г. С.П. Королёва. В итоге лунную гонку мы проиграли, уступив США первенство пилотируемых полётов на Луну.

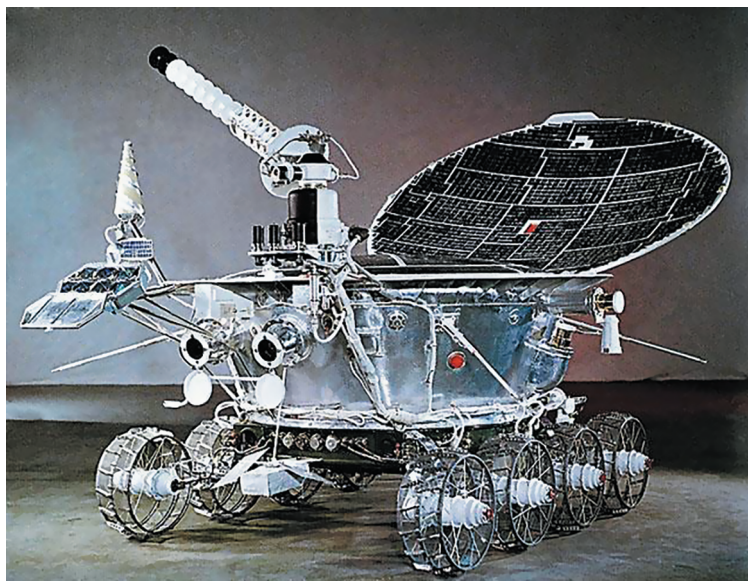
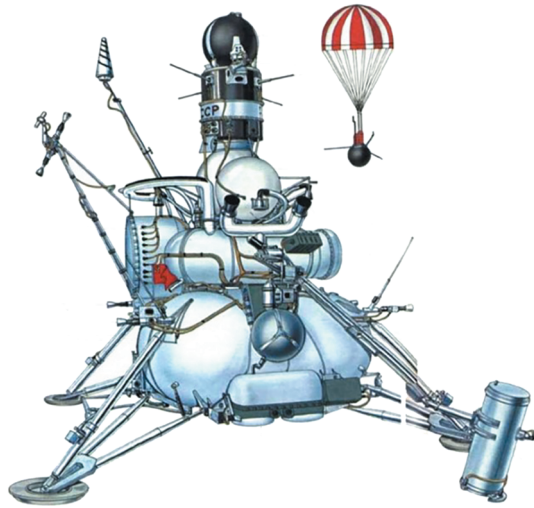
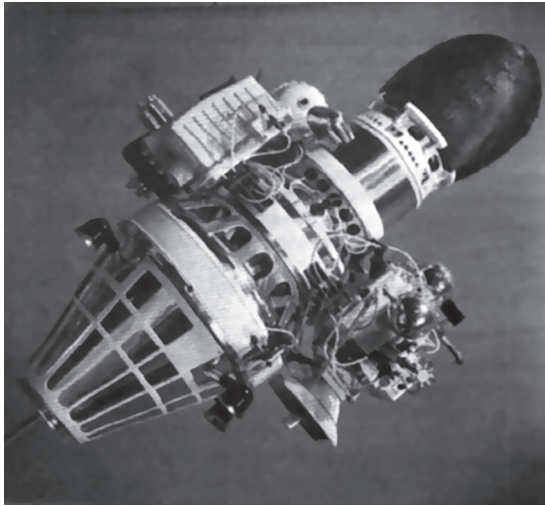
И здесь в полной мере проявилась дальновидность М.В. Келдыша. Успеху американцев в осуществлении программы «Аполлон» мы смогли дать своего рода асимметричный ответ, создав поколение эффективных аппаратов-роботов для автоматического забора и доставки на Землю лунного грунта и высадки на поверхность Луны дистанционно управляемых самоходных аппаратов «Луноход» [5, 6].

Уже в 1966 г. была совершена первая в мире мягкая посадка на Луну и передана на Землю панорама её поверхности, позволившая увидеть мельчайшие детали лунного ландшафта. Автоматическая доставка на Землю лунных пород, длительная работа на Луне самоходных аппаратов существенно ослабили политические последствия от проигранной СССР лунной гонки. Одновременно были достигнуты выдающиеся успехи в исследованиях Венеры и Марса: осуществлены первые в мире мягкие посадки на поверхность этих планет, проведены прямые измерения параметров атмосферы.

Особенно успешной оказалась долговременная программа исследований Венеры, позволившая открыть её удивительную чрезвычайно горячую и плотную атмосферу, передать сначала чёрно-белые, а затем и цветные панорамы поверхности, исследовать свойства облаков и поверхностных пород. Впервые удалось выполнить радиолокационное картирование поверхности Венеры, недоступной наблюдениям в оптическом диапазоне длин волн, осуществить полёты к комете Галлея и спутнику Марса Фобосу. Все эти космические аппараты были сделаны на предприятии, у истоков создания которого стоял Келдыш [7].

## ИСТОРИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ КОРОЛЁВА И КЕЛДЫША

Академики Королёв и Келдыш на многие десятилетия определили пути развития практической космонавтики. Их ранний уход из жизни нанёс непоправимый урон отечественным космическим исследованиям. Они оставили глубочайший след в истории не только как выдающиеся учёные и руководители крупных коллективов с непрекаемым авторитетом, но и как выдающиеся личности, обладавшие высочайшей гражданской от-



Аппараты-роботы для мягкой посадки на Луну, автоматического забора и доставки на Землю лунного грунта и дистанционно управляемый аппарат “Луноход”

ветственностью, гражданским мужеством, бесконечно преданные науке и интересам страны [8]. Им был присущ патриотизм в самом ёмком значении этого слова, они служили науке, стране, а не власти. Оба были настоящими космическими лидерами не по положению, а по призванию, каких нам так не хватает сегодня.

М.В. Келдыш оставался преданным космосу и на посту Президента АН СССР, органично сочетая эту огромную работу с руководством МНТС по КИ. Он сыграл поистине историческую роль в решении ряда принципиальных вопросов государственного значения [9]: нашёл убедительные аргументы для устранения противоречий между главными конструкторами М.К. Янгелем и В.Н. Челомеем в вопросе выбора и постановки на

боевое дежурство разработанных в возглавляемых ими коллективах баллистических ракет с ядерным зарядом; решительно отстоял необходимость создания в КБ В.Н. Челомея тяжёлой ракеты среднего класса УР-500 — “Протон” на фоне ожиданий сверхтяжёлой королёвской ракеты Н-1. Ракета Н-1 так и не была создана, и работы по ней в 1974 г. были закрыты, а ракета “Протон” стала на многие годы нашим единственным тяжёлым носителем, обеспечившим запуски орбитальных станций и новых поколений лунно-планетных аппаратов, она получила большой спрос на мировом рынке ракет-носителей. Сегодня даже трудно представить, что стало бы с нашей космонавтикой без этой ракеты. Уже подробно говорилось о роли Келдыша в создании предприятия Бабаки-

на, обеспечившего по существу все наши успехи в непилотируемой космонавтике.

С именами академиков М.В. Келдыша, С.П. Королёва и их соратников связана историческая роль Академии наук в космических исследованиях и развитии космонавтики. Под идеологическим началом Академии наук разрабатывались и осуществлялись научные программы изучения околоземного космоса, планет Солнечной системы, звёздно-галактической астрономии и познания Вселенной, ей принадлежит инициативная роль в определении задач научных проектов. Эту миссию АН взяла на себя с самого начала космической эры.

Институтами Академии наук создавались и продолжают создаваться оригинальные бортовые приборы для широчайшего спектра исследований космоса, анализируются и обобщаются результаты, на основе которых совершенствуются модели изучаемых явлений. Часто сами характеристики научных инструментов определяют облик космического аппарата, его конструктивные свойства.

Ведущие руководители и специалисты ракетно-космической отрасли, в том числе представители королёвского Совета главных конструкторов, были членами АН СССР — так высоко академия оценивала наши передовые технические достижения. Келдыш во многом способствовал избранию членов этого Совета и их сподвижников в академию, всегда считая решение крупных технических задач и разработку научно-технических проектов высокой наукой [9].

Эти замечательные традиции, заложенные Президентом АН СССР М.В. Келдышем, и ведущую роль в развитии космонавтики в новых условиях стремятся сохранять Российская академия наук и преемник МНТС по КИ — Совет по космосу РАН.

С.П. Королёв и М.В. Келдыш были убеждены в том, что полёты в космос станут одним из величайших устремлений нашей цивилизации. Это была их философская позиция. В своём докладе на Международном астронавтическом конгрессе в 1972 г. Келдыш отмечал: “Можно с уверенностью сказать, что человечество придёт к межпла-

нетным полётам. И точно так же, как много лет назад нельзя было предсказать, что именно найдёт человечество на новых континентах, нельзя заранее предсказать, что оно найдёт на планетах. Может быть, через много лет тем, кто полетит на другие планеты, современные космические ракеты будут казаться столь же примитивными и несовершенными, какими нам кажутся древние пироги, на которых первые отважные мореплаватели переплывали океан. Ведь мы находимся только в самом начале пути за пределы Земли. Предстоит ещё решить много сложных технических вопросов. Но этот процесс начался, его темпы стремительно нарастают, и нет сомнения в том, что пророческие слова К.Э. Циолковского о завоевании всего околосолнечного пространства станут уделом человечества грядущего столетия” [4].

В этих словах — завет нынешнему и грядущему поколениям исследователей бесконечных пространств за пределами собственной планеты обитания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Чертюк Б.Е.* Ракеты и люди. Горячие дни холодной войны. М.: Машиностроение, 1997.
2. Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва (1946–1996). Кн. 1 / Под ред. Ю.П. Семёнова. М.: РКК Энергия, 1996.
3. *Маров М.Я.* Лидер космических исследований — не по положению, а по призванию // Вестник РАН. 2021. № 2. С. 172–187.
4. *Келдыш М.В.* Избранные труды. Общие вопросы развития науки. М.: Наука, 1985.
5. *Келдыш М.В., Маров М.Я.* Космические исследования. М.: Наука, 1981.
6. Автоматические космические аппараты для фундаментальных научных и прикладных исследований / Под общ. ред. Г.М. Полищука и К.М. Пичадзе. М.: МАИ-Принт, 2010.
7. *Маров М.Я., Хантрес У.Т.* Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия. М.: Физматлит, 2017.
8. М.В. Келдыш. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2002.
9. *Маров М.Я.* Слово об Учителе. Академик Мстислав Всеволодович Келдыш. М.: Физматлит, 2021.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

АКАДЕМИЯ НАУК И КОСМОС. ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

© 2021 г. Ю. М. Батури

*Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва, Россия*

*E-mail: baturin@ihst.ru*

Поступила в редакцию 28.05.2021 г.

После доработки 31.05.2021 г.

Принята к публикации 10.06.2021 г.

Автор доклада сосредоточил внимание на деятельности Академии наук СССР в области космических исследований — с первых шагов в этой области — изучения высоких слоёв атмосферы, до первого полёта человека в космос. Приводятся примеры заданий Академии наук на высотные ракеты до и во время Великой Отечественной войны. Описывается история проекта первого советского пилотируемого полёта в космос, подготовленного группой М.К. Тихонравова, но не осуществлённого, подготовка которого была предпринята Академией наук. Отмечается значение встречи президента АН СССР С.И. Вавилова с С.П. Королёвым, с которой началась кооперация академической науки и ракетной промышленности Советского Союза. Рассказывается о “золотом веке” Академии наук, когда без её участия или поручения ей не планировалось ни одно значимое мероприятие в области исследования космоса. Подробно анализируется предстартовая подготовка и ход полёта Ю.А. Гагарина.

**Ключевые слова:** Академия наук СССР, космические исследования, высотные ракеты, надёжность, первый спутник, первый пилотируемый космический полёт, Ю.А. Гагарин, М.В. Келдыш, С.П. Королёв.

DOI: 10.31857/S0869587321110025

Хронологические рамки настоящей работы охватывают период с 1934 по 1961 г. — чуть больше четверти века. Истоки события, 60-летие которого отмечает Академия наук, можно отнести к 1934 г., когда завершались съёмки художественного фильма режиссёра В.Н. Журавлёва “Космический рейс”, консультантом которого выступил К.Э. Циолковский. 1934 год случайно или неслучайно соединил, сообщив дальнейшему ходу истории необходимую энергию, два события: 9 марта в деревне Клушино Гжатского района Западной области в рабочей семье Гагариных родился



БАТУРИН Юрий Михайлович — член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН.

мальчик, которого назвали Юрием, а в Ленинграде 31 марта в большом конференц-зале Академии наук по инициативе академика С.И. Вавилова открылась первая в мире Всесоюзная конференция по изучению стратосферы [1]. В ней приняли участие многие выдающиеся отечественные учёные — президент Академии наук А.П. Карпинский, академики А.Ф. Иоффе, Л.А. Орбели и другие. С сообщением “Достижение высот стратостатом” выступил К.Э. Циолковский [1, с. 709–716], а С.П. Королёв прочитал доклад “Полёт реактивных аппаратов в стратосфере” [1, с. 857–868]. Кто-то его спросил: “Вы верите, что человек полетит в стратосферу на реактивном аппарате в ближайшем будущем?... — Нет, я не верю, я просто знаю, что он полетит, — ответил Королёв” [2, с. 237]. Так причудливо и незаметно для всех живущих на нашей планете пересеклись линии жизни будущего первого космонавта Земли, теоретика космонавтики К.Э. Циолковского, действующего (А.П. Карпинский) и будущего (С.И. Вавилов) президентов Академии наук СССР, будущего Главного конструктора наших космических кораблей академика С.П. Королёва.

Есть ещё одна героиня этой драматической научно-технической и космической истории, которая незримо будет сопровождать Юрия Гагарина в его эпохальном полёте, — *надёжность*<sup>1</sup>. В том же 1934 г. проблема надёжности в концептуальном аспекте обсуждалась на сессии АН СССР, а следом за тем по инициативе академика С.А. Чаплыгина была создана Комиссия по надёжности при АН СССР.

Конференция по исследованию стратосферы 1934 г. стала мощным импульсом для создания исследовательских ракет. Многое было сделано в рамках созданной после конференции Комиссии по изучению стратосферы под председательством С.И. Вавилова. В 1937 г. вышла в свет книга А.А. Штернфельда “Введение в космонавтику”. Так, почти за четверть века до полёта Ю.А. Гагарина в отечественную практику стал постепенно входить термин “космонавтика”.

В 1938 г. Геофизический институт АН СССР подготовил задание на создание ракеты с высотой подъёма 50 км, а в следующем году — на 100 км.

Великая Отечественная война прервала эти проекты. Но не все. Уже в 1943 г., несмотря на тяжёлую военную обстановку, по заданию Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР промышленность приступила к созданию ракеты для подъёма приборов на высоту около 40 км. Предусматривалась возможность старта с высокогорной станции Академии наук СССР на Памире (высота около 4 тыс. м) [3, с. 78].

В 1944 г. в Польшу на немецкий ракетный полигон Дебице была направлена группа специалистов НИИ-1 Минавиапрома, которая вошла туда с наступающими войсками. В состав группы входил инженер-подполковник М.К. Тихонравов. Изучая немецкую ракету “Фау-2”, Тихонравов пришёл к идее спроектировать на базе этой ракеты комплекс для пилотируемых полётов в космос. В начале 1945 г. в Ракетном НИИ, созданном ещё М.Н. Тухачевским в 1933 г., инженер-полковник М.К. Тихонравов организовал группу специалистов (Н.Г. Чернышёв, В.А. Штоколов, П.И. Иванов, В.Н. Галковский, Г.М. Москаленко, А.Ф. Крутов и другие), поставив задачу разработать проект пилотируемого высотного ракетного аппарата (герметичной кабины с двумя пилотами) на базе одноступенчатой жидкостной ракеты с характеристиками, рассчитанными для полёта на высоту до 200 км. В начале 1946 г. проект высотной ракеты (ВР-190) был подготовлен.

Осуществление этой идеи разработчики начали с обращения в Академию наук СССР. Первы-

ми его поддержали академики Н.Г. Бруевич, А.А. Орбели, А.Д. Папалекси, В.Р. Фесенко [4, с. 112, 113]. 16 марта 1946 г. их записка уже лежала на столе президента АН СССР академика С.И. Вавилова [5, с. 39], который дал указание подготовить предложения для Министерства авиационной промышленности. В письме, направленном в Минавиапром 23 марта 1946 г., Академия наук СССР отмечала исключительную научную значимость проекта и свою особую в нём заинтересованность.

По поручению министра авиационной промышленности М.В. Хруничева 12 апреля 1946 г. (кто тогда мог догадываться о будущем значении этой даты для нашей страны?) проект был рассмотрен экспертной комиссией министерства под председательством академика С.А. Христиановича, заместителя начальника ЦАГИ. Положительное заключение комиссии передали на утверждение заместителю министра (и одновременно заместителю главного учёного секретаря АН СССР) А.И. Михайлову, который несколько притормозил его ход. Он знал про уже подготовленный проект Постановления Совета Министров СССР о создании Специального комитета по реактивной технике при Совете Министров СССР, в числе первоочередных задач которого назывались и работы по ракетной технике. А.И. Михайлов ожидал, что проект пилотируемого ракетного аппарата будет рассмотрен именно там, с принятием соответствующего решения. Постановление Совета Министров СССР “Вопросы реактивного вооружения”, в котором говорилось о Специальном комитете, было утверждено 13 мая 1946 г. [6, с. 30–36].

Условия для первого космического пилотируемого проекта сложились крайне благоприятные. Однако авторов обращения, М.К. Тихонравова и Н.Г. Чернышёва, подвели недостаток выдержки и исключительно рациональное техническое мышление, не учитывающее психологию принятия решений. Полуторамесячное ожидание ответа показалось им слишком долгим, и 21 мая они отправили письмо о проекте ВР-190 лично И.В. Сталину. В нём указывалось не только на *научную*, но и на *политическую* значимость проекта [4, с. 115]. Характерно, что ни слова не говорилось о *военном* применении ракеты. (Заметим, что Сталин в то время ещё сохранял за собой пост министра обороны, затем министра Вооружённых сил, совмещая его с постами председателя правительства и генсека ЦК ВКП(б). Лишь в марте 1947 г. он уступил министерскую должность Н.А. Булганину.)

Сталин дал поручение министру авиационной промышленности М.В. Хруничеву рассмотреть проект М.К. Тихонравова и Н.Г. Чернышёва.

<sup>1</sup> Культ богини Весты (греческой богини Гестии) — символ *надёжности* и *устойчивости* — был введён в Риме царём Помпилием (правил с 715 по 672 г. до н.э.).

Хруничеву не составило труда вспомнить недавно рассмотренный документ, и 6 июня 1946 г. он собирает у себя совещание, а через неделю ставит его на вторичное обсуждение на совещании у А.И. Михайлова — теперь совместно со специалистами не только авиапромышленности, но и министерств вооружения и электротехнической промышленности. 20 июня 1946 г. М.В. Хруничев докладывает И.В. Сталину о возможности создания пилотируемой космической ракеты, отмечая, что в письме Тихонравова и Чернышёва назывался срок создания космического аппарата близкий к году, но комиссия оценивает минимальный и весьма напряжённый период подготовки в два года. К ответу министра прилагался проект постановления Совета Министров СССР по этому вопросу. Сталин, однако, никакой резолюции на письмо М.В. Хруничева не наложил, и постановление принято не было [7, с. 17, 18].

Примерно в 1947 г. С.И. Вавилов по своей инициативе и по договорённости с Д.Ф. Устиновым посетил НИИ-88, где работал С.П. Королёв, и впервые внимательно рассмотрел возможность использования ракетной техники в целях исследования верхних слоёв атмосферы. Была образована Комиссия Академии наук СССР для координации исследовательских работ, которая ныне действует в виде Совета РАН по космосу. Ею в 1949 г. было подготовлено, а в 1950 г. утверждено техническое задание на проведение исследований на ракетах. Первым пунктом определялось, что общее руководство всеми работами возлагается на Академию наук [8, л. 79, 80]. В рамках работы Комиссии летом 1947 г. по предложению ФИАН С.П. Королёв провёл совещание, на котором рассматривалась возможность установки на жидкостных ракетах приборов для проведения экспериментов в верхних слоях атмосферы, а 2 ноября 1947 г. в нашей стране впервые были подняты на ракете на высоту около 80 км научные приборы.

Тем временем М.К. Тихонравов на основе идеи “ракетного пакета”, проведя расчёты, в 1948 г. пришёл к выводу о технической возможности вывода на орбиту искусственного спутника Земли (ИСЗ) на достигнутой технологической базе [9, с. 18]. В июле 1949 г. с основными материалами по “ракетному пакету” был ознакомлен С.П. Королёв. В марте 1950 г. М.К. Тихонравов сделал на научной конференции публичный доклад, в котором затронул перспективу создания искусственного спутника Земли *вплоть до полёта на нём человека*. Идею создания ИСЗ С.П. Королёв доложил 16 марта 1954 г. на совещании у академика М.В. Келдыша. Тот в свою очередь получил одобрение этого начинания у президента Академии наук СССР А.Н. Несмеянова. 27 мая 1954 г.

С.П. Королёв обратился к министру вооружения Д.Ф. Устинову с докладной запиской “Об искусственном спутнике Земли”, подготовленной М.К. Тихонравовым. В записке предлагалось параллельно вести работы по спутнику и полёту человека в космос. “Программа всех опытов должна войти составной частью в программу работ Академии наук СССР”, — писал он [10, с. 31–43]. В августе 1954 г. Совет Министров СССР утвердил предложения по проработке научно-теоретических вопросов, связанных с космическим полётом.

Идеями М.К. Тихонравова очень заинтересовался М.В. Келдыш. Он стал собирать совещания, приглашая М.К. Тихонравова, Д.Е. Охотимского, Т.М. Энеева, К.Д. Бушуева, В.А. Амбарцумяна и других учёных. С декабря 1955 г. до марта 1956 г. в Академии наук Келдыш провёл ряд совещаний, на которых были сформированы широкие планы создания ракетно-космической техники для исследования космического пространства.

В самом начале 1956 г. Совет Министров СССР принял предложения Академии наук СССР (Несмеянов, Топчиев, Келдыш) и главных конструкторов (Королёв, Глушко, Рязанский, Пилюгин, Кузнецов, Бармин) о создании в 1957–1958 гг. на базе ракеты Р-7 искусственного спутника Земли и издал постановление, ставшее одним из триумфальных в космической истории Академии наук СССР (ей посвящено более половины постановления). Академия была признана правительством ведущей научной организацией в области космических исследований [11, с. 57–61]. С тех пор без участия Академии наук или поручения ей не планировалось ни одно значимое мероприятие в области исследования космоса.

Как известно, космическая эра человечества была открыта 4 октября 1957 г. запуском в Советском Союзе первого искусственного спутника Земли. А через год — 17 ноября 1958 г. — С.П. Королёв подписал отчёт “Материалы предварительной проработки вопроса создания спутника Земли с человеком на борту” [12, с. 91]. В начале 1959 г. под председательством академика М.В. Келдыша в Академии наук СССР прошло совещание, на котором подробно обсуждался вопрос о полёте человека в космос, вплоть до того, из кого выбирать будущих кандидатов в космонавты [13, с. 114]. 7 марта 1960 г. на должность слушателей-космонавтов были зачислены первые 12 лётчиков. 17–18 января 1961 г. шесть космонавтов, включая Ю.А. Гагарина, сдали экзамены на “отлично”. Комиссия рекомендовала очередность полётов. Первым был назван Гагарин.

И здесь мы снова не можем не вспомнить незримую участницу событий — *надёжность*, ради которой конструкторы и инженеры, занимавшиеся подготовкой пилотируемого полёта, делали

всё, что было в их силах, часто — по собственной инициативе.

У корабля “Восток” все жизненно важные системы были продублированы, за исключением тормозного двигателя — из-за его внушительного веса, поэтому для аварийного спуска в случае отказа двигательной установки была выбрана орбита, на которой корабль находился бы не более 7 суток, то есть в качестве резервного режима спуска использовалось естественное торможение в атмосфере. Однако в этом случае орбита, по мере её снижения, превращается в круговую с равновероятным захватом корабля атмосферой в любой области орбиты, и он падает в произвольную нерасчётную точку под трассой полёта. Попади он в океан, служба поиска практически не имела шансов его найти, и космонавт, выполнив задачу, погиб бы на Земле. И вот у А.В. Гурко, участника запуска “Спутника-1”, родилась идея использовать аэродинамическую несимметричность. Баллистический коэффициент корабля различался в полтора раза в зависимости от его ориентации. Если с помощью ручной системы ориентации проходить перигей носом корабля вперёд, обеспечивая минимум сопротивления, а апогей ориентировать поперёк потока, добиваясь таким образом максимума сопротивления, тогда по законам небесной механики можно сохранить эллиптичность орбиты. Выбирая области торможения, удаётся переместить перигей так, чтобы захват космического корабля атмосферой происходил в нужной области орбиты и он приземлялся бы в расчётную зону. Достаточно космонавту задать в бортокументации программу разворотов корабля по времени, чтобы обеспечить его посадку на нашей территории.

Работа была завершена 11 апреля 1961 г.! Телеграмму об этом немедленно отправили С.П. Королёву на полигон. Ответа не было. Перед стартами С.П. Королёв совершенно выматывался и уходил в свой домик, его старались не беспокоить. Начальники устроились: “Завтра старт! Ты что раньше не мог это придумать? Пойдёт на следующий запуск”. Тогда автор решения О.В. Гурко решил позвонить секретарю С.П. Королёва, но трубку неожиданно взял сам Сергей Павлович. Гурко представился (они были знакомы) и доложил ситуацию. С.П. Королёв буквально взорвался: “Почему мне такие телеграммы не докладывают!” И устроил разнос. Срочно была создана группа. Гагарина будить не стали, но утром С.П. Королёв дал ему расчёты разворотов и лично проинструктировал о новом методе спуска. Впоследствии этот способ был официально принят к использованию, и космонавты сдавали по нему экзамен. Что же касается автора идеи О.В. Гурко, то, как водится, он получил взыскание и был ли-

шён квартальной премии за то, что занимался неплановой работой [14, с. 473–475].

Не имела удовлетворительного решения и проблема спасения космонавта на старте. В случае аварии ракеты-носителя на стартовой позиции предложили катапультирование космонавта из спускаемого аппарата по команде из бункера. В головном обтекателе ракеты для этой цели был сделан специальный вырез, а в фермах агрегата обслуживания — проходные окна по размеру кресла с космонавтом, обеспечивающие возможность катапультирования при подведённых площадках обслуживания [15, с. 315]. Приземляться космонавт должен был без парашюта на специальную сетку с последующей его эвакуацией стартовой командой в бункер [16, с. 115]. Понятно, что подобная схема не только не спасла бы космонавта, но и повлекла бы гибель спасателей. В результате от неё отказались.

Во время последнего перед отправкой корабля для пилотируемого полёта на полигон испытания антенного тракта в электропроводке произошло короткое замыкание. Разобрали чуть ли не половину корабля, но место короткого замыкания не обнаружили. Поэтому, чтобы не рисковать, приняли решение заменить весь тракт, а корабль отправлять в Тюра-Там (ближайшая к Байконуру железнодорожная станция) по частям, что особенно взволновало Королёва. Первым отправили приборно-агрегатный отсек. Во время его испытаний на полигоне при опробовании двигателей ориентации обнаружилась нечёткая работа одного из клапанов, управляющего расходом газа. Его пришлось заменить. Спускаемый аппарат был доставлен с опозданием на два дня [17, с. 61].

Королёв незамедлительно рассматривал любые предложения, направленные на повышение надёжности первого пилотируемого космического комплекса (ракеты-носителя и космического корабля). Так, 10 апреля 1961 г. на совещании технического руководства было предложено для повышения надёжности вывести резервный комплект средств траекторных измерений из “холодного” резерва и уходить со старта с двумя работающими комплектами. Учитывая сроки старта, возражения против такого предложения выглядели очень серьёзно. Но поскольку речь шла о надёжности пуска, была создана рабочая группа под руководством академика М.В. Келдыша. Срочно провели необходимые расчёты, и предложение приняли [18, с. 172].

Во время испытания ракеты-носителя отказало одно из реле. Его заменили, но при проверке электросети вдруг обнаружился “минус” на корпусе. Поиск места контакта весьма затруднителен из-за ограниченности доступа к оборудованию внутри ракеты. Следствием может быть отмена

пуска. Но кто-то вспомнил, что двигателисты во избежание попадания пыли в электрические разъёмы закрывают их подручными средствами. Может быть, именно эти нештатные приспособления и дают “минус” на корпусе? Предположение подтвердилось. Отстыковки всей кабельной сети не потребовалось. Королёву доложили: “Необходимости в повторении испытаний нет”. Но Сергей Павлович оставался хмурым. История с “минусом” на корпусе вызвала у него тягостные воспоминания. Во время одного из первых запусков ракеты Р-7 он не принял во внимание появление такого “минуса” на корпусе, и это привело к аварии [17, с. 105, 106]. А ведь на этот раз предстояло запускать в космос корабль с человеком!

В тот же день, 10 апреля 1961 г., при взвешивании Ю.А. Гагарина в скафандре с креслом обнаружился перевес в 14 кг. (Завод, поставивший катапультируемое кресло, завесил его вес на 20(!) кг [19, с. 10]). Ночью для облегчения корабля с него сняли часть аппаратуры, обрезали кабели, которые использовались на беспилотных кораблях. (Богиня надёжности Веста в это время заламывала руки и рвала на себе волосы!) Поскольку работы проводились в спешке без анализа схемы бортовой сети, заодно, как потом выяснилось, оказались отрезанными один датчик давления и один датчик температуры. В спускаемом аппарате, правда, имелись другие датчики давления и температуры. Хуже было то, что появилась “паразитная” гальваническая связь наземных шин с корпусом спускаемого аппарата.

11 апреля 1961 г. ракета-носитель с космическим кораблём “Восток” была вывезена на стартовую позицию. Начались предпусковые проверки. В середине дня перед окончанием проверок Гагарин на нулевой отметке старта встретился с боевым расчётом, готовившим ракету и корабль к пуску. В это время и обнаружилось, что технологическая шина электропитания, с помощью которой проводились все испытания, связана с корпусом корабля. Эта связь как раз и появилась в результате проведённых внутри спускаемого аппарата (СА) работ по снижению веса корабля. При плотном монтаже аппаратуры в СА и в условиях, когда ракета находится на старте, найти дефект не представлялось возможным. Положение осложнялось тем, что данная шина мотор-генератора обеспечивала технологическим электропитанием не только космический корабль, но и ракету-носитель. Инженеры искали решение и к ночи нашли его — отключиться от мотор-генератора и обеспечить питание технологических шин с помощью аккумуляторов. Королёв утвердил это решение, и в течение ночи новая схема была собрана и проверена [20, с. 113].

До последнего предстартового дня вносились предложенные технические изменения, которые частично снижали надёжность комплекса. Космический комплекс ракета + корабль — чрезвычайно сложная система. Любое изменение может сказаться на срабатывании (или несрабатывании) какого-то технического элемента. Подобные связи выявляются долгим тщательным анализом и тестированием, а надёжность всей этой махины может зависеть от маленького винтика, от одного контакта. Мелочей в космической технике не бывает.

Автономные испытания корабля “Восток” проходили с 27 по 30 марта 1961 г. Было выявлено 20 дефектов, сделано 52 замечания и проведено 48 доработок [21, с. 3]. Испытание ракеты-носителя на технической позиции продолжалось с 30 марта по 6 апреля 1961 г. В этот период было проведено шесть серьёзных доработок и устранены 70 замечаний по конструкции изделия, по двигательной установке и по системе управления, проведены работы по 48 техническим указаниям, заменено 9 бортовых приборов. Подготовка на технической позиции заняла 360 часов, но большое число отказов было предотвращено [17, с. 78].

Тогда ещё не существовало единой точки зрения относительно критериев и методов оценки надёжности ракетно-космических комплексов. Вот пример типичной реакции технических руководителей того времени. Один из главных конструкторов, когда его попросили прислать специалистов по надёжности на совещание, сказал, что проблемы здесь нет, и любой инженер сможет оценить надёжность, прочитав учебник по теории вероятности. Правда, через некоторое время он признал, что был неправ [22, с. 115]. Сразу понял проблему академик Б.В. Гнеденко. Когда с аналогичной просьбой приехали к нему в МГУ, он пожаловался, что, к сожалению, они готовят математиков главным образом по классической математике, тогда как для решения поставленной задачи нужны специалисты по прикладной математике. Но он выделил аспирантов, которые, освоив новую проблематику, стали со временем прекрасными специалистами по надёжности ракетно-космических систем. Большую роль в решении этой задачи сыграли учёные Академии наук СССР. Многие замечательные идеи были выдвинуты на семинарах по надёжности, которые организовал в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР академик Н.Г. Бруевич.

На том этапе развития теории надёжности основное внимание уделялось вероятностным характеристикам потоков отказов. Для расчёта надёжности при испытании ракет в период с 1957 по 1960 г. хорошо подходило биномиальное распре-

деление. Биномиально распределённая случайная величина описывает число успехов в  $n$  испытаниях Бернулли (независимых испытаний с двумя исходами — успехом и неудачей), когда вероятность успеха в отдельном испытании равна  $p$  (соответственно, вероятность неудачи равна  $1-p$ ). Распределение Пуассона является хорошей аппроксимацией для биномиального распределения при большом числе  $n$  испытаний Бернулли и малом  $p$  (вероятность успеха в отдельном испытании), что, безусловно, было правильно при первых пусках ракет-носителей с беспилотными аппаратами, которые в большинстве своём заканчивались неудачей (что естественно при испытании любой принципиально новой техники).

Вот как закончились запуски пяти беспилотных космических кораблей в 1960 г.:

- 15 мая — корабль вместо спуска перешёл на более высокую орбиту;
- 28 июля — взрыв двигателя при старте;
- 19 августа — успешный запуск (в корабле находились собаки Белка и Стрелка), но отказы были;
- 1 декабря — величина тормозного импульса оказалась недостаточной (космический корабль подорван, чтобы он не приземлился на территорию зарубежного государства);
- 22 декабря — корабль на орбиту не вышел из-за аварийного выключения двигателя.

Королёв торопился и ввёл простое правило: “Пилотируемому полёту должны предшествовать два удачных пуска корабля с манекеном вместо пилота” [23, с. 334]. В начале 1961 г. “правило С.П. Королёва” было выполнено:

- 9 марта 1961 г. — успешный полёт (хотя имело место неразделение спускаемого аппарата и приборно-агрегатного отсеков, следствием чего стал перелёт);
- 25 марта 1961 г. — успешный полёт (неразделение повторилось).

Согласно “правилу Королёва” можно было запускать человека. Но следовало ли это делать, учитывая полученные показатели надёжности?

По расчётам, вероятность успешного завершения полёта пилотируемого корабля составляла 0.875, а вероятность спасения жизни космонавта, даже при неудачном запуске, с учётом системы аварийного спасения, составляла уже 0.94 [24, с. 76]. Тогдашние требования к уровню надёжности составляли 0.95 [25, с. 114]. Но это был расчёт “схемной” надёжности. В реальных условиях подготовки к старту степень надёжности пилотируемого космического комплекса менялась.

Задача обеспечения и оценки надёжности решается благодаря, во-первых, многократным ис-

пытаниям важнейших элементов комплекса (двигатели, системы раскрытия антенн, отделение корабля от носителя, разделение отсеков, система приземления и т.п.), лётно-конструкторским испытаниям комплекса в целом [26, с. 360–370], во-вторых, расчёту надёжности. Получаемый численный показатель надёжности, который фиксируется в документах, оказывается априорной оценкой. Реальная степень надёжности продолжает меняться под воздействием факторов и условий подготовки комплекса к старту, когда надёжность повышается редко, хотя иногда это случается (так было с группой М.В. Келдыша по средствам траекторных измерений на участке выведения космического корабля на орбиту). Чаще встречаются противоположные ситуации, яркий пример которых — упомянутое выше срезание кабелей на подготовленном к полёту космическом корабле без анализа бортовой сети. Конечно, на такой анализ просто не было времени, поскольку процесс подготовки изделия к старту не только был запущен, но и близился к завершению. Однако если понимать надёжность как приоритет, надо отменять старт и выполнять необходимые работы.

Но в апреле 1961 г. речь шла о приоритете политическом, даже историческом. Поэтому проблема надёжности неизбежно отошла на второй план. И это было понятно как Королёву, так и Гагарину. Ответственность за то, что показатель надёжности на 0.01 не дотянул до заданного, Королёв принял на себя. Безусловно, он понимал, что расчёт надёжности делался, что называется, “для прокурора”. Этот вывод подтверждается тем фактом, что Королёв не подписал первый том “Проекта космического корабля-спутника” (остальные тома подписал) к моменту старта Гагарина. (Он сделал это только 30 июля 1961 г. перед полётом Г.С. Титова [12, с. 96]). Так надёжность, личная ответственность и мужество слились в характеристику, не измеримую и не представимую численно, но без которой не бывает настоящих побед.

Ю.А. Гагарин был первым человеком, отправлявшимся в космос. Впервые предстоял пилотируемый полёт, его, строго говоря, уже нельзя рассматривать в ряду других. Математической теории риска ещё не существовало. Теория надёжности в том виде, в каком она применялась тогда инженерами, была теорией ухудшения структуры объекта. Интенсивность отказов пригодна для расчётов цикла старения, но не для цикла развития. Первые космонавты, в том числе и Гагарин, с точки зрения теории надёжности того времени попадали в вырожденный случай. Требовалась новая теория. В первом пилотируемом космическом полёте необходимо было

учесть эффект, смысл которого в том, что на начальном этапе эксплуатации надёжность резко снижается.

В условиях отсутствия адекватной теории расчёта надёжности с пониманием можно отнестись к тому, как в стремлении максимально обеспечить успех полёта Гагарина учитывались даже местные приметы. Например, заметили, что, когда полётное задание печаталось на финской мелованной бумаге, пуски были аварийными. Когда использовали отечественную, отдающую желтизной, пуск Белки и Стрелки прошёл отлично. Потом опять использовали мелованную бумагу — вновь аварийные пуски. В марте 1961 г. финская бумага кончилась, и вновь пуски оказались успешными. Когда готовили полётное задание к первому пилотируемому старту, учли эту “статистику”, не стали рисковать [27, с. 534, 535].

И вот в 9.07 состоялся старт ракеты-носителя с кораблём “Восток”. Первые, самые опасные секунды, для которых изобретали экзотическую схему спасения со стальной сеткой, пролетели. Но уже на 156-й секунде выведения произошёл отказ блока питания антенн системы радиуправления центрального блока “А”, и команда на отключение двигателя не прошла. Двигатель отключился на 0.46 секунды позже положенного, по резервному варианту — по временной метке системы управления ракеты-носителя. В результате вторая ступень набрала скорость на 22.0 м/с выше расчётной. Двигатель третьей ступени также проработал на 2.4 секунды дольше расчётного времени. Суммарное завышение скорости носителя составило 25.43 м/с [21, с. 4], и корабль вышел на более высокую орбиту. Её апогей оказался 327 км вместо расчётных 230 км, а перигей — 181 км. В результате была исключена возможность резервного режима спуска, поскольку время движения корабля по данной орбите до посадки за счёт естественного торможения составляло около 30 суток. К этому времени космонавт погиб бы. Оставалось надеяться, что тормозная двигательная установка сработает штатно.

К траекторным измерениям были привлечены пять (!) вычислительных центров: ВЦ-5 (НИИ-4, фактически первый в мире Центр управления полётом), ВЦ-1 (Министерство обороны), ВЦ-2 (Вычислительный центр АН СССР), ВЦ-3 (Отделение прикладной математики АН СССР), ВЦ-4 (МГУ). Необходимо было оперативно принять все измерения, определить орбиту по измерениям как минимум от двух измерительных пунктов, зафиксировать факт вывода космического корабля на орбиту и через измерительный пункт на Камчатке, перед выходом корабля за пределы территории СССР, сообщить Гагарину о выведении его корабля на штатную орбиту и передать в ТАСС

параметры орбиты, подтвердив тем самым факт запуска на орбиту космического корабля с человеком на борту. Уточнённые параметры орбиты предполагалось использовать для корректировки трассы спуска и точки приземления корабля, а также для реагирования на возможные нештатные ситуации.

Однако попытки внести поправки в параметры орбиты осложнились, так как очередное измерение не поступило [28, с. 531–533]. Региональная группа управления на Камчатке, которую возглавлял будущий космонавт А.А. Леонов, не получила к сеансу связи с Гагариным сведений от Координационно-вычислительного центра в Москве о фактической орбите полёта “Востока”. Траекторные измерения Камчатского измерительного пункта не соответствовали ранее полученным данным из-за использования для привязки системы единого времени сигналов японской станции, а не Государственной эталонной станции СССР, которую не было слышно из-за сильных помех связи. Тогда Леонов, чтобы не волновать Гагарина, взял на себя ответственность сообщить ему, что орбита нормальная.

Оператор командной станции на Камчатке передал на космический корабль разовую команду включения программно-временного устройства без учёта отклонения фактической орбиты от расчётной. Это отличие было тогда неизвестно. Кроме того, команда поступила с некоторым сдвигом во времени. Это означало, что параметры орбиты, на которую вышел корабль, могли оказаться очень неточными, что, в свою очередь, создавало неопределённость в выдаче тормозного импульса необходимой продолжительности, то есть усложняло возвращение [29, с. 76].

Задержки сообщения ТАСС по радио, которого с нетерпением ожидал на полигоне Королёв, было достаточно, чтобы американское руководство узнало о полёте Гагарина раньше всех: их станция радиоэлектронной разведки на острове Шемия (Аляска) перехватила переговоры космонавта с Землёй и даже телевизионное изображение через 20 минут после старта. Ещё через 10 минут президенту США доложили о событии.

Подшло время, и в корабле Гагарина включилась тормозная двигательная установка. Однако произошла ещё одна нештатная ситуация. При появлении рабочего давления в камере сгорания должен был закрыться обратный клапан наддува камеры. Однако клапан закрылся не полностью, в результате чего горючее после турбонасосного агрегата поступало в камеру сгорания как штатно, так и нештатно — через незакрывшийся клапан в полость разделительного мешка (нужен для предварительного наддува) бака горючего. Попавшее в разделительный мешок горючее не могло быть

использовано для выработки тормозного импульса, то есть произошла незапланированная потеря горючего. В результате горючего не хватило на отработку штатного импульса тяги.

Двигатель прекратил работу менее чем за секунду до того, как по циклограмме должна была поступить команда на его отключение. Следствием этой неполной секунды стал перелёт в 600 км и посадка не в том районе, где предполагалось. Поскольку команда не прошла, цикл “разделение отсеков” не запустился. Оставалось ждать включения резервного режима разделения по термодатчикам, которые расположены в приборно-агрегатном отсеке и срабатывают при нагреве корпуса до 150 градусов. Но это ещё не всё. После того, как команда не прошла, арматура тормозной двигательной установки осталась открытой. По открытым трактам газ наддува и окислитель под давлением 60 атмосфер продолжали поступать в камеру сгорания и в рулевые сопла по тангажу, крену и рысканию. Процесс был произвольным и неконтролируемым. Результирующее возмущающее воздействие на космический корабль привело к его закрутке вокруг центра масс корабля по трём осям. Тут Гагарину и пригодились интенсивные тренировки в Центре подготовки космонавтов.

Команда на отстрел кабель-мачты поступила от термодатчиков одновременно с командой на отстрел четырёх стальных лент, соединяющих спускаемый аппарат и приборный отсек. Ленты отстрелились нормально, однако отстрел кабель-мачты не прошёл. Причина была в том, что цепи кабелей запитки пиропатронов отстрела кабель-мачты ошибочно проложили через пироножки лент, перерубавшие кабели лент и кабели пиропатронов отстрела кабель-мачты до прохождения команды на пиропатроны гермоплаты, которая шла с задержкой по отношению к команде “отстрел лент”. То же самое произошло при двух предшествующих пусках беспилотных кораблей. Однако эта ситуация угрозы безопасности космонавта не создавала (кабель-мачта сгорала при спуске), и Королёв запретил проводить какие-либо доработки системы разделения [25, с. 120].

В 10.48 обзорный радиолокатор радиотехнического пункта наведения аэродрома г. Энгельса зафиксировал цель в юго-западном направлении на высоте 8 км и на удалении 33 км. Это был спускаемый аппарат “Восток” с Гагариным на борту. Спускаемый аппарат приземлился раньше космонавта и ближе к берегу Волги на 1–2 км. Космонавт приземлился на парашюте в районе деревни Смеловка Энгельсского района. Возвращение произошло со значительным перелётом по сравнению с расчётным: не в Волгоградской, а в Саратовской области. Продолжительность пер-

вого в мире космического полёта составила 106 минут, как и было указано в полётном задании. Неверная продолжительность полёта (108 минут) — факт, ставший широко известным и вошедшим во все справочники, объясняется тем, что присутствовавшему на месте посадки спортивному комиссару Международной авиационной федерации (ФАИ) И.Г. Борисенко сразу сообщили оперативные сведения для регистрации мирового рекорда. Когда же данные были уточнены, изменять их советская делегация в ФАИ не захотела, чтобы избежать лишних споров об обстоятельствах посадки Ю.А. Гагарина (раздельное парашютирование космонавта и спускаемого аппарата) [30, с. 618–621].

\*\*\*

В подготовке и осуществлении первого космического полёта велика роль Академии наук СССР [31, с. 52–54], особенно академика М.В. Келдыша. Работу, которую он выполнил, можно назвать выдающейся. Он внёс в этот грандиозный проект огромный вклад не только как математик, теоретик, но и как организатор, лично участвовал в практической работе, постоянно взаимодействовал с С.П. Королёвым, бывал на полигоне, в том числе в дни подготовки ракеты-носителя и космического корабля. Это подтверждает Научно-технический отчёт Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР “Спуск с орбиты искусственного спутника Земли с торможением в атмосфере”, утверждённый М.В. Келдышем [32, с. 73–76], а также факт ночной работы возглавляемой им группы на полигоне за сутки до старта Гагарина.

Координацию работ в значительной мере осуществлял Межведомственный научно-технический совет по космическим исследованиям при Академии наук СССР, который также возглавлял академик Келдыш. Очень точно сказал о нём министр общего машиностроения СССР в 1983–1988 гг. О.Д. Бакланов: “Он нужен был космической среде для подтягивания академической науки к решению актуальных практических задач... И эта смычка большой науки и большой космической практики, начиная со второй половины пятидесятых годов, произошла. Роль в этом М.В. Келдыша безусловна” [33, с. 173].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Труды Всесоюзной конференции по изучению стратосферы 31 марта–6 апреля 1934 года. М., Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1935.
2. Голованов Я.К. Королёв: факты и мифы. Т. 1. М.: Фонд “Русские витязи”, 2007.

3. Вакулов П.В., Ведешин Л.А. Первые ракетные эксперименты по исследованию космических лучей // Вестник Академии наук СССР. 1973. № 3. С. 123–132.
4. Кантемиров Б.Н. Михаил Клавдиевич Тихонравов. М.: Наука, 2014.
5. Брыков А.В. К тайнам Вселенной. М.: Инвекция, 1993.
6. Постановление Совета Министров СССР “Вопросы реактивного вооружения”. 13 мая 1946 г. / Советская космическая инициатива в государственных документах 1946–1964 гг. / Под ред. Ю.М. Батурина. М.: РТСофт, 2008.
7. Батурин Ю.М. Космическая дипломатия и международное право. Звёздный городок: РГНИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2006.
8. Стенограмма заседания Президиума Российской академии наук. 11.05.1999. АРАН. Ф. 2. Оп. 31. Д. 389. Л. 79–80.
9. 4 Центральный научно-исследовательский институт 1946–1996. Исторический очерк. М.: Министерство обороны РФ, 1996.
10. Докладная записка о технической возможности создания простейшего ИСЗ и перспективах осуществления полёта человека в космос, подготовленная М.К. Тихонравовым по результатам НИР, выполненных в НИИ-4 по заказу ОКБ-1 НИИ-88. 26 мая 1954 г. // Первый пилотируемый полёт. Сборник документов в двух книгах. Кн. 1 / Под ред. В.А. Давыдова. М.: Родина МЕДИА, 2011.
11. Постановление Совета Министров СССР «О создании объекта “Д”». 30 января 1956 г. // Первый пилотируемый полёт. Сборник документов в двух книгах. Кн. 1 / Под ред. В.А. Давыдова. М.: Родина МЕДИА, 2011.
12. Решетин А.Г. Решение проблемы полёта в атмосфере спускаемого аппарата “Восток” с Ю.А. Гагариным // Юбилейный сборник докладов. Материалы юбилейных общественно-научных чтений, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина. Гагарин, 2010.
13. Из воспоминаний доктора медицинских наук профессора В.И. Яздовского о решении медико-биологических проблем полёта человека в космическое пространство // Человек. Корабль. Космос. Сборник документов к 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. М.: Новый хронограф, 2011.
14. Гурко О.В. Годы жизни в космонавтике. В поиске стратегического равновесия. Ветераны 4 ЦНИИ Минобороны вспоминают. М.: Министерство обороны РФ, 2012.
15. Из воспоминаний начальника отдела испытаний ГСКБ Спецмаш Б.И. Хлебникова о создании стартового комплекса ракеты-носителя Р-7 // Человек. Корабль. Космос. Сборник документов к 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. М.: Новый хронограф, 2011.
16. Благов В.Д. Особенности полёта Ю.А. Гагарина // Юбилейный сборник докладов. Материалы юбилейных общественно-научных чтений, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина. Гагарин, 2010.
17. Куприянов В.Н. Космическая одиссея Юрия Гагарина. СПб.: Политехника, 2011.
18. Белостоцкая К.К. Роль ОКБ МЭИ в создании и обеспечении полётов первых пилотируемых космических кораблей // Юбилейный сборник докладов. Материалы юбилейных общественно-научных чтений, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина. Гагарин, 2010.
19. Утро начинается на “Востоке” // Сборник документов, посвящённых подготовке и осуществлению первых пилотируемых полётов в космос / Автор-сост. Е.К. Бабичев, Л.П. Вершинина. М.: Амнит, 2018.
20. Филин Б.Н. Подготовка корабля “Восток” Ю.А. Гагарина на полигоне // Юбилейный сборник докладов. Материалы юбилейных общественно-научных чтений, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина. Гагарин, 2010.
21. Лисов И., Афанасьев И. 106 минут Юрия Гагарина в свете рассекреченных документов // Новости космонавтики. 2011. № 6. С. 2–11.
22. Котин Л.В. В борьбе за надёжность // В поиске стратегического равновесия. Ветераны 4 ЦНИИ Минобороны вспоминают. М.: Министерство обороны РФ, 2012.
23. Молодцов В.В. Некоторые фрагменты истории проектирования космического корабля “Восток” // Человек. Корабль. Космос. Сборник документов к 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. М.: Новый хронограф, 2011.
24. Молодцов В.В. Проектирование корабля “Восток” // Юбилейный сборник докладов. Материалы юбилейных общественно-научных чтений, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина. Гагарин, 2010.
25. Благов В.Д. Особенности полёта Ю.А. Гагарина // Юбилейный сборник докладов. Материалы юбилейных общественно-научных чтений, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина. Гагарин, 2010.
26. Материалы к докладу С.П. Королёва к заседанию Госкомиссии по запуску корабля-спутника с человеком на борту. 29 марта 1961 г. // Первый пилотируемый полёт. Сборник документов в двух книгах. Кн. 1 / Под ред. В.А. Давыдова. М.: Родина МЕДИА, 2011.
27. Воспоминания инженера-испытателя Н.Л. Семёнова о событиях на космодроме, предшествовавших запуску первого пилотируемого космического корабля // Человек. Корабль. Космос. Сборник документов к 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. М.: Новый хронограф, 2011.
28. Пшеничников В.В. Мы рассчитывали на оперативное баллистическое обеспечение полётов Гагарина Ю.А. и Титова Г.С. // В поиске стратегического равновесия. Ветераны 4 ЦНИИ Минобороны вспоминают. М.: Министерство обороны РФ, 2012.
29. История Командно-измерительного комплекса управления космическими аппаратами от истоков до Главного испытательного центра им. Г.С. Титова. Кн. 1. Общий очерк. М.: Контакт-РЛ, 2006.

30. Интервью спортивного комиссара Федерации авиаспорта СССР ИГ. Борисенко о встрече Ю.А. Гагарина после космического полёта // Человек. Корабль. Космос. Сборник документов к 50-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. М.: Новый хронограф, 2011.
31. Постановление Президиума Академия наук СССР от 14 сентября 1956 г. № 502-0011 “О ходе выполнения Постановления Совета Министров СССР от 30.01.1956 г. № 149-88сс” // Вестник Архива Президента Российской Федерации. Советский космос. Специальное издание к 50-летию полёта Юрия Гагарина. М., 2011.
32. Из научно-технического отчёта Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР “Спуск с орбиты искусственного спутника Земли с торможением в атмосфере”. 8 марта 1956 г. // Первый пилотируемый полёт. Сборник документов в двух книгах. Кн. 1 / Под ред. В.А. Давыдова. М.: Родина МЕДИА, 2011.
33. *Бакланов О.Д.* Космос — моя судьба. Записки из “Матросской тишины”. В 2 томах. Т. 1. М.: Общество сохранения литературного наследия, 2014.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

ПИЛОТИРУЕМАЯ КОСМОНАВТИКА:  
ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2021 г. В. А. Соловьёв<sup>а,\*</sup>, А. А. Коваленко<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup>Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва, Королёв, Россия

\*E-mail: Vladimir.Soloviev@sfoc.ru

\*\*E-mail: Andrey.Kovalenko@sfoc.ru

Поступила в редакцию 04.06.2021 г.

После доработки 06.06.2021 г.

Принята к публикации 31.07.2021 г.

В статье рассмотрены основные этапы развития пилотируемой космонавтики в СССР и России. Сформулированы задачи перспективной российской высокоширотной орбитальной станции, облик которой уже определён. В числе главных – обеспечение максимальных возможностей наблюдения территории Российской Федерации, исследования с участием человека в районах околоземного пространства с наименьшей защищённостью от космических излучений, то есть там, где наиболее явно проявляются все воздействия открытого космического пространства. Эти исследования будут проводиться в интересах будущих межпланетных пилотируемых полётов. Авторами статьи рассмотрены также основные задачи пилотируемых полётов к Луне, создания обитаемой лунной базы, лунной транспортной инфраструктуры. Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на научной сессии Общего собрания членов РАН 21 апреля 2021 г.

**Ключевые слова:** пилотируемая космонавтика, орбитальная станция, лунная база.

**DOI:** 10.31857/S0869587321110128

Исторический полёт вокруг Земли Юрия Алексеевича Гагарина на космическом корабле “Восток” 12 апреля 1961 г. открыл эпоху пилотируемой космонавтики. За прошедшие шесть десятилетий она прошла огромный путь – от коротких одиночных полётов до постоянного пребывания на орбите экипажей орбитальных станций. За

эти годы люди побывали на поверхности Луны, научились жить и работать в космическом пространстве, создали международную космическую кооперацию, построили большие конструкции на околоземной орбите.

Развитие техники пилотируемых космических полётов за 60 лет можно проиллюстрировать сравнением технических характеристик первого в мире пилотируемого космического корабля “Восток”, имевшего массу около 5 т (с третьей ступенью ракеты-носителя), объём жилого отсека 5.2 м<sup>3</sup>, и Международной космической станции, имеющей массу на два порядка больше – 450 т, жилой объём существенно больше, чем на два порядка – 900 м<sup>3</sup>, экипаж 11–12 человек. О линейных размерах МКС можно судить по такому сравнению: если бы её разместить на столичной Красной площади, то станция заняла бы практически её всю.

В настоящее время российский сегмент (РС) МКС состоит из пяти модулей, первый из которых был запущен в 1998 г. (функционально-грузовой блок “Заря”), в 2000 г. в состав станции введён служебный модуль “Звезда”, в 2001 г. –



СОЛОВЬЁВ Владимир Алексеевич – член-корреспондент РАН, генеральный конструктор РКК “Энергия”.  
КОВАЛЕНКО Андрей Александрович – кандидат технических наук, начальник отдела РКК “Энергия”.

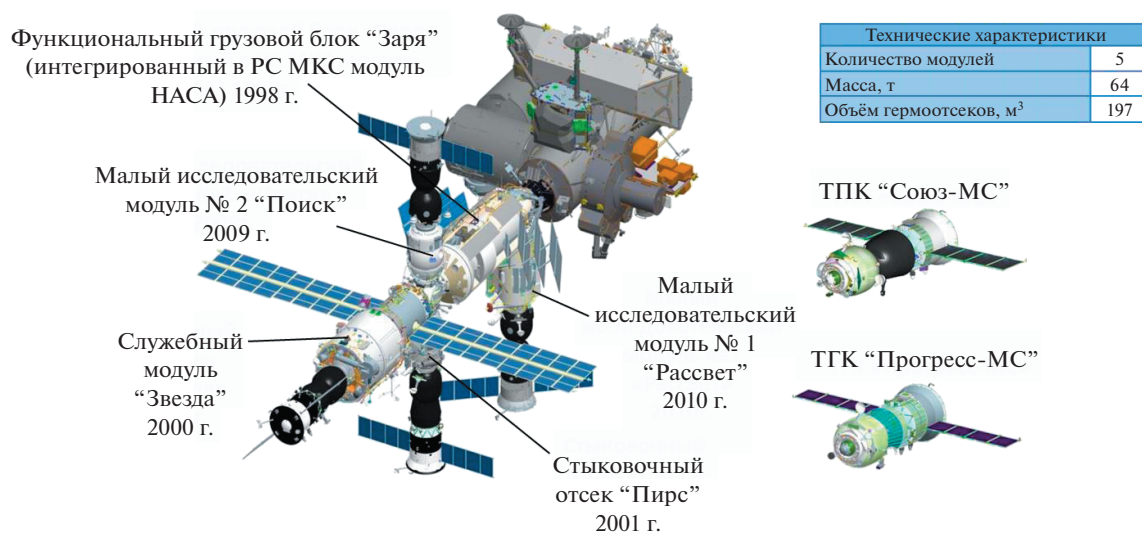


Рис. 1. Российский сегмент МКС

стыковочной отсек “Пирс”, малые исследовательские модули “Поиск” и “Рассвет”, введены в 2009 и 2010 гг. соответственно. Масса сегмента составляет 64 т, объём герметичных отсеков 197 м<sup>3</sup> (рис. 1).

Полётный ресурс российского сегмента МКС составляет 15 лет, он был установлен на основе опыта, полученного в процессе реализации программы полёта станции “Мир”. Сегодня продолжительность эксплуатации российского сегмента МКС в целом достигла 22 лет. Можно ответственно утверждать, что около 80% оборудования служебных бортовых систем РС МКС полностью выработали свой ресурс. Кроме того, в 2020 г. была зафиксирована незначительная негерметичность корпуса. Несмотря на существование этих проблем, в соответствии с межправительственными соглашениями российская сторона будет поддерживать проект МКС до 2025 г.

Надо отметить, что в общей стоимости Международной космической станции финансовый вклад России составляет 10%, при этом наша страна имеет права на проведение работ с использованием более 35% ресурсов станции. Общая масса доставленного на МКС научного оборудования — 76 т, из них на российский сегмент приходится лишь 6.5 т. На станции проведено более 2000 научных экспериментов, из них 400 российских, то есть всего пятая часть. Такой показатель — результат недофинансирования наших научных программ на МКС. Планируемое окончание эксплуатации станции — 2025 г., к этому времени продолжительность её полёта достигнет 27 лет.

Историю отечественных пилотируемых полётов условно можно подразделить на три основных периода. Первый — до 1970 г. включительно, когда состоялся первый относительно длительный

полёт “Союза-9” с космонавтами А.Г. Николаевым и В.И. Севастьяновым на борту, продолжавшийся около 18 суток. В связи с тем, что самочувствие экипажа корабля после посадки по многим показателям оставляло желать лучшего, Академия наук СССР, Академия медицинских наук СССР, специалисты по авиационно-космической медицине очень серьёзно занялись проблемами медицинского обеспечения длительных космических полётов. В Институте медико-биологических проблем АН СССР эти работы возглавили академики О.Г. Газенко и А.И. Григорьев.

Следующим стал период полётов орбитальных станций “Салют” (1971—1986). Он характеризовался совершенствованием технологий, формированием программ научных исследований и направлений, актуальных для всего человечества.

Третий период начался с запуска базового блока многомодульной станции “Мир” в 1986 г. Здесь особо следует отметить увеличение сложности пилотируемых космических систем как объектов управления. По мере углубления понимания преимуществ космических исследований, получения результатов, которые эффективно можно использовать на Земле, расширяется и перечень задач, решаемых в космосе. Соответственно, сложнее становится космическая техника. Одновременно мы всё полнее представляем опасности пребывания человека за пределами Земли. При создании космической техники нам необходимо обеспечивать её надёжность — аппаратура должна стойко выдерживать атаки агрессивного космического пространства.

Усложнение космической техники вызвало усложнение процесса управления ею. Например, управление полётом первого космического ко-

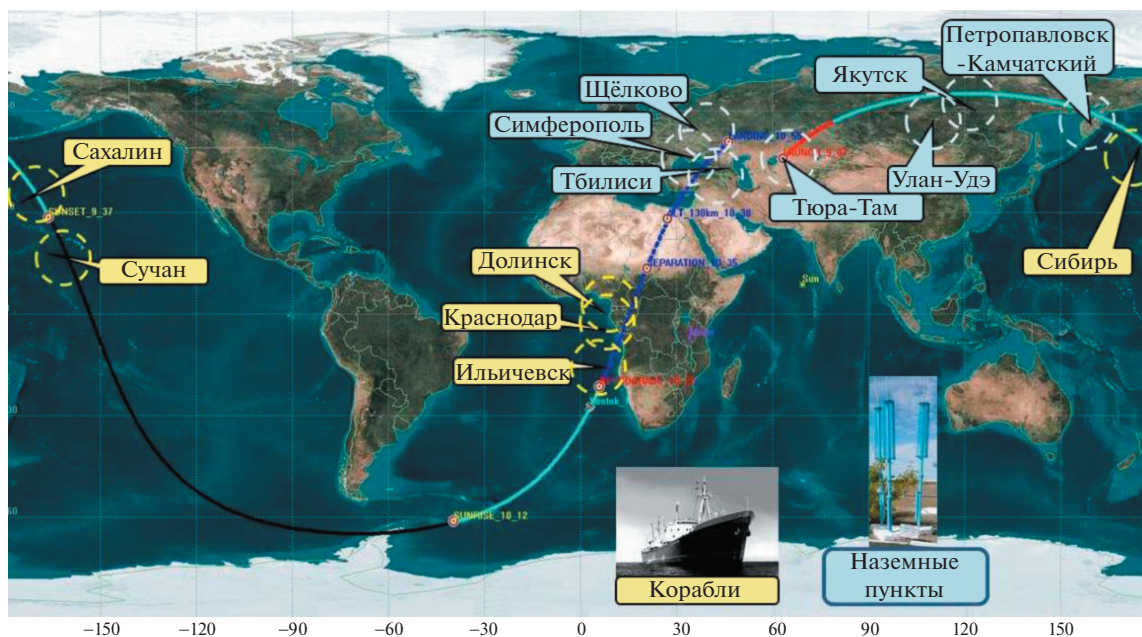


Рис. 2. Организация управления полётом космического корабля “Восток”

рабля “Восток” осуществлялось наземным комплексом управления (помимо контура ручного управления) посредством 40 функциональных команд. Полёт контролировался по 400 телеметрическим параметрам. Выполнялись самые простые операции, в числе которых были ориентация, торможение, сеансы связи. Единственный тогда метод управления полётом — сеансный или радиокомандный. Но не будем забывать, что орбитальный полёт Ю.А. Гагарина, который обеспечивался контуром управления из морских кораблей и наземных командно-измерительных пунктов, был для своего времени очень сложным, ведь всё делалось впервые (рис. 2). Для сравнения: в целях управления российским сегментом МКС в 2021 г. предполагается выполнить 130 тыс. полётных операций, более 12 тыс. управляющих воздействий, проконтролировать 120 тыс. телеметрических параметров. Сам же процесс обеспечивается сложнейшим контуром.

Сегодняшняя организация управления полётом Международной космической станции, если представить её в самом общем виде, базируется на центрах управления, расположенных в России, США, Канаде, европейских странах, Японии. Работают, взаимно дополняя друг друга, два контура управления — наземный и спутниковый, обеспечивая управление полётом не только МКС, но и транспортной системы, которая доставляет на станцию астронавтов и космонавтов, оборудование, расходные материалы [1]. Иными словами, деятельность человека в космическом пространстве поддерживает очень сложная взаимосвязанная инфраструктура (рис. 3).

В Российской академии наук неоднократно говорилось о необходимости выбора наиболее актуальных направлений космических исследований, необходимости создания новой орбитальной станции, в частности, в Совете по космосу РАН ещё пять лет назад академик Л.М. Зелёный проводил дискуссии по этим проблемам, не раз обсуждались они и на заседаниях президиума РАН. Свои предложения выдвигала не только Академия наук, но и заинтересованные ведомства. По результатам этих обсуждений можно в общем виде выделить две крупные задачи. Первая — обеспечение максимальных возможностей наблюдения территории Российской Федерации, включая высокоширотные районы. Вторая — необходимость организации исследований с участием человека в зонах околоземного космического пространства с наименьшей защищённостью от космических излучений, то есть там, где наиболее явно проявляется воздействие открытого космического пространства. Это необходимо для более полного понимания тех проблем, с которыми могут столкнуться в будущем участники пилотируемых межпланетных экспедиций.

Решение указанных задач возможно при размещении новой станции на орбите с углом наклона относительно экватора  $97^{\circ}$ – $98^{\circ}$ , то есть на солнечно-синхронной орбите, где обеспечивается полный обзор Земли с постоянным контролем. Использование российской территории для старта и посадки (наклонение орбиты МКС —  $51.7^{\circ}$ , что обеспечивает обзор только 20% территории России). Не следует также забывать о том, что в современном мире нельзя преуменьшать важно-

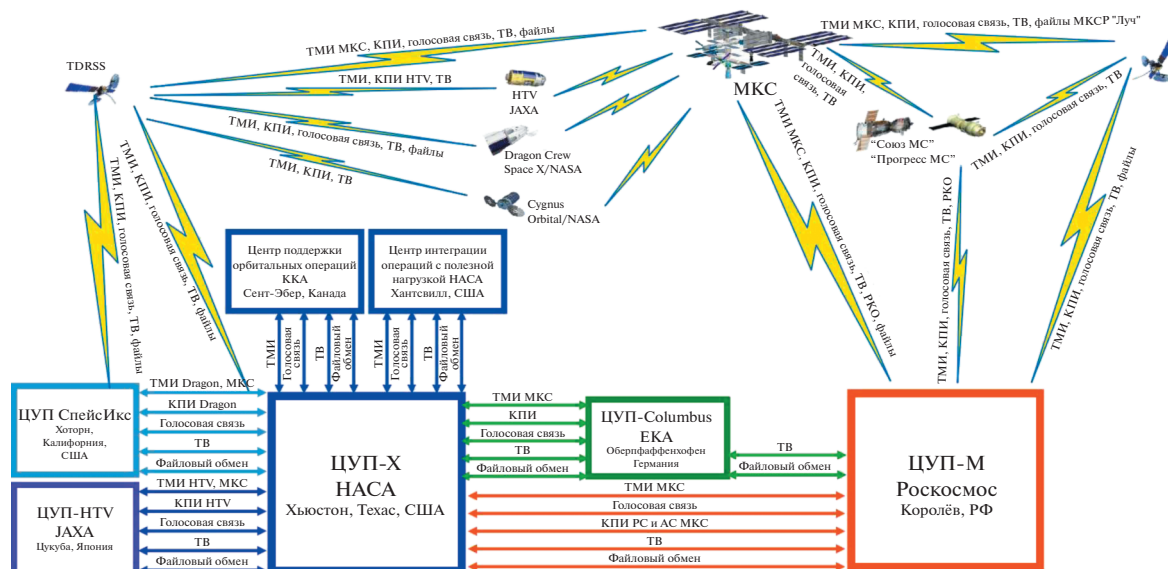


Рис. 3. Организация управления полётом Международной космической станции

КПИ – командно-программная информация, ТМИ – телеметрическая информация, НТВ – Н-II Transfer Vehicle (автоматический грузовой корабль с ракетой-носителем Н-II, Япония), TDRSS – Tracking Data Rely Satellite System, МКСР – многофункциональная космическая система ретрансляции, ККА – Канадское космическое агентство, ЕКА – Европейское космическое агентство, JAXA – Японское космическое агентство

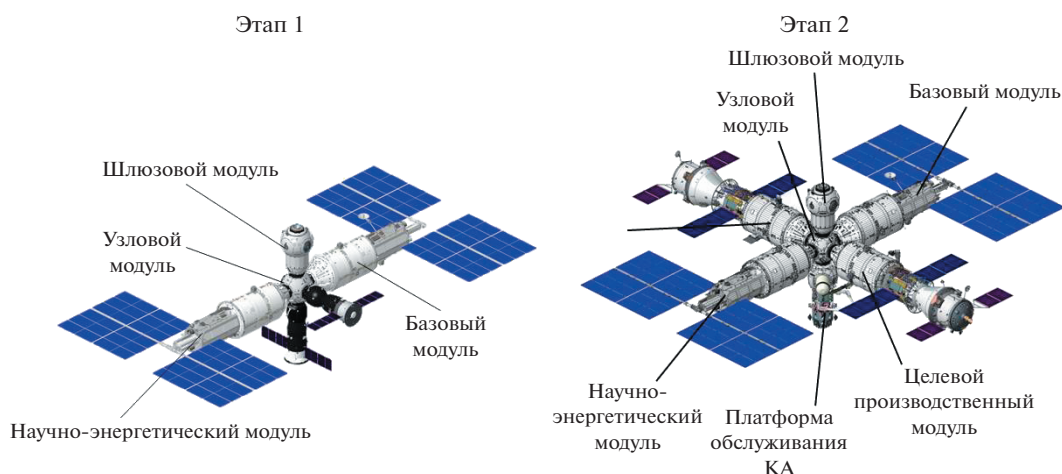


Рис. 4. Российская орбитальная станция, этапы 1, 2

сти решения задач обороны и обеспечения безопасности страны.

С учётом высказанных требований предлагается начать создание новой российской орбитальной станции. На первом этапе она будет состоять из двух основных модулей – научно-энергетического и базового, шлюзового камеры и транспортной системы (рис. 4). Научно-энергетический модуль в качестве первого элемента новой станции обеспечит хороший электроэнергетический потенциал – 55 кВт. Этого достаточно для самых серьёзных экспериментов, в том числе

для радиолокационных, требующих больших затрат электроэнергии. На втором этапе предполагается большее количество модулей, таких как целевые, производственные, платформа внешнего обслуживания, с помощью которой можно собирать и отправлять на другие орбиты различные автоматические космические аппараты [2]. Основные характеристики орбитальной станции приведены в таблице 1.

Предлагается несколько изменить философию пилотируемых полётов на орбитальной станции. Постоянное пребывание человека на орбите вы-

**Таблица 1.** Основные характеристики орбитальной станции

Характеристики	Значение	
	Этап 1	Этап 2
Объёмы гермоотсеков, м <sup>3</sup>	228	667
Объёмы для целевого оборудования, м <sup>3</sup>	до 19	до 49
Электроэнергия для целевого оборудования, кВт	до 55	55
Количество внешних рабочих мест, оснащённых всеми необходимыми интерфейсами	24	48
Хранение топлива АТ + НДМГ, кг	до 3900	до 9100
Информационный обмен, Мбит/с	до 105	до 300
Экипаж, человек	2	2 (4)
Корабли посещения (пилотируемые/грузовые)	1/1–2	1–2/1–3

сокозатратно. Поэтому нужно прорабатывать и реализовывать систему посещаемых станций, при этом, конечно, увеличивая степень автоматизации выполнения научных экспериментов без снижения эффективности проводимых на орбите целевых работ.

Функциональные возможности новой российской высокоширотной орбитальной станции во многом обусловлены углом наклона её орбиты. Благодаря этому, каждые полтора часа (период обращения станции), с борта станции будет возможно наблюдение поверхности Земли с 83 параллели, откуда виден полюс и приполярная зона, которая может контролироваться оптическими и радиолокационными средствами. На новой российской орбитальной станции можно развернуть и систему управления полётом “облака” малых спутников – это совершенно новая задача. В числе таких новых задач система обслуживания автоматических космических аппаратов на так называемой внешней подвеске. Актуальным представляется также развитие перспективных технологий с использованием возможностей станции – создание новых конструкционных материалов, высокоскоростных информационных интерфейсов, интерфейсов человек–машина, перспективных элементов систем жизнеобеспечения с высоким уровнем замкнутости по основным ресурсам (93–95%). Ещё одно перспективное направление – развитие робототехнических средств.

Важнейшим элементом орбитальной инфраструктуры, без которого существование орбитальной станции невозможно, служит система транспортного обеспечения. На первом этапе предлагается сохранить стандартную транспортную схему на базе ракеты-носителя “Союз”, пилотируемых и грузовых космических кораблей “Союз”, “Прогресс”. В то же время ведётся активная работа над перспективным транспортным

кораблём нового поколения “Орёл” и семейством ракет-носителей “Ангара” – на их основе будет развёртываться транспортное обеспечение второго этапа.

На рисунке 5 представлен новый пилотируемый транспортный космический корабль, его характеристики. Как следует из рисунка, он предназначен не только для доставки экипажей на окололунную и околоземную орбиту. В проекте нового корабля заложена возможность возвращать на Землю большее количество космонавтов, чем при старте (стартовый экипаж – четыре человека, возвращаемый может достигать до шести), то есть в случае необходимости решать задачу спасения экипажей. Кроме того, корабль будет многоразовым. Это в высшей степени важное обстоятельство, сейчас весь мир идёт по пути создания многоразовых не только полезных элементов, но и ракет-носителей.

Программа лётной отработки предполагает в 2023 г. первый беспилотный облёт Земли, в 2024 г. беспилотный полёт со стыковкой к Международной космической станции, а в 2025 г. уже пилотируемый запуск корабля “Орёл”.

Важное направление пилотируемой космонавтики – лунные исследования. Руководство Ракетно-космической корпорации “Энергия” и Совета по космосу РАН считают, что программу пилотируемого освоения Луны необходимо начинать после предварительного создания с помощью автоматических космических аппаратов основной первичной инфраструктуры в выбранном районе размещения будущей лунной базы.

В 2022 г. планируется запуск автоматической межпланетной станции “Луна-25”, а далее программу запусков на Луну необходимо синхронизировать таким образом, чтобы пилотируемый полёт состоялся только тогда, когда появится понимание стоящих перед экипажем задач. В насто-

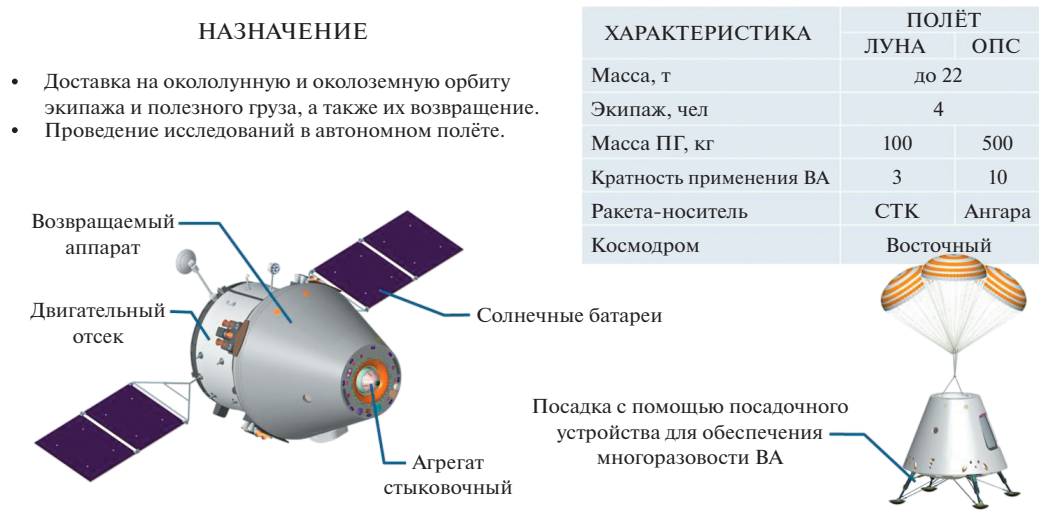


Рис. 5. Пилотируемый транспортный корабль нового поколения

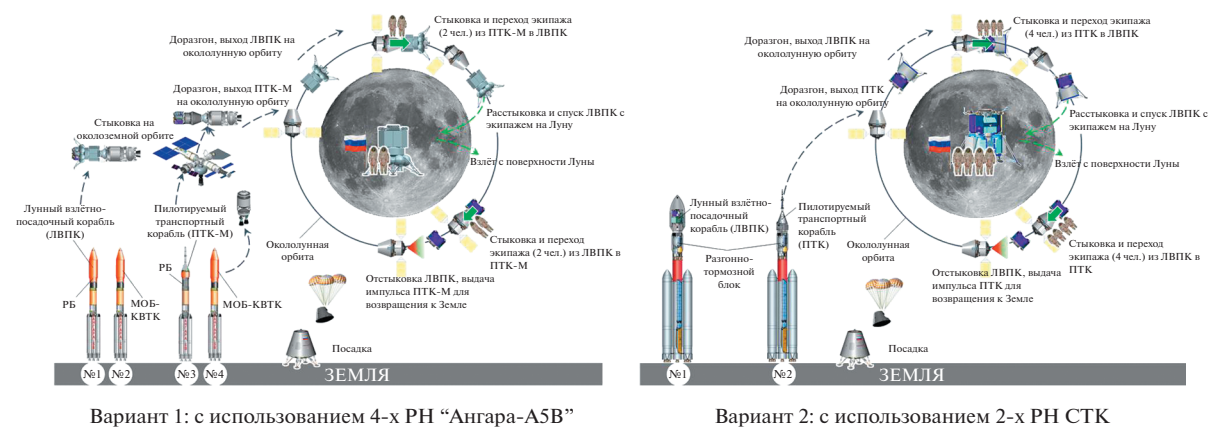


Рис. 6. Схемы пилотируемого полёта на Луну

ящее время предлагаются два варианта схемы пилотируемого полёта на Луну. Первый из них — пусковая схема с использованием четырёх ракет-носителей “Ангара-5В”. Схема достаточно сложная и недешёвая, подлежит серьёзному обсуждению, но она позволяет с известной степенью надёжности достигнуть поверхности Луны двум космонавтам. Вторая схема, с использованием двух ракет-носителей сверхтяжёлого класса, способна доставить четырёх космонавтов на поверхность Луны с более высоким уровнем надёжности (рис. 6).

Как мы полагаем, разворачивание лунной базы будет проходить также в два этапа. На первом необходима отработка технологий, обеспечивающих безопасное пребывание человека на Луне. На следующем этапе очень важно научиться использовать лунные ресурсы для обеспечения возможности пополнения расходуемых запасов. Состав

объектов базы даже в начальной конфигурации должен обеспечивать безопасное пребывание человека — это и радиационная защита, и надёжное энергообеспечение, и возможность экстренного возвращения на Землю. Большое значение имеет надёжная связь с центром управления полётом, а также эффективная навигация.

Развитием лунной базы первого этапа должна стать постоянно обитаемая база с жилыми отсеками, ядерной энергоустановкой, основным и резервным лунным взлётно-посадочным кораблём. База второго этапа позволит помимо научно-исследовательских работ начать строительство прообраза лунного опытно-промышленного комплекса.

Ещё одно важное направление пилотируемой лунной программы — создание перспективной транспортной системы Земля—Луна—Земля. Важным её элементом станут дозаправляемые

межорбитальные буксиры многократного использования. После выведения на орбиту вокруг Земли, перелёта на орбиту вокруг Луны, выполнения операций на орбите и поверхности Луны, корабль возвращается не на поверхность Земли, а на околоземную орбиту, к примеру, на российскую орбитальную станцию. Межорбитальный буксир сохраняется и дозаправляется для будущих полётов, а экипаж, побывавший на Луне, с околоземной орбиты возвращается на Землю.

В процессе подготовки к будущим лунным полётам очень важно отработать операции сближения по быстрым баллистическим схемам. На окололунной орбите, в случае срыва какой-либо операции, вследствие баллистических ограничений повторная попытка станет возможна только через 7 или 14 суток. Фактор времени здесь играет очень важную роль. В настоящее время отработка быстрых схем сближения ведётся на МКС, где успешно опробованы четырёх- и двухвитковые схемы сближения транспортных кораблей и орбитальной станции [3].

\*\*\*

В заключение особо отметим следующее. В силу своего географического положения Россия обречена быть космической державой, без успешной космической деятельности под угрозой окажется целостность страны. Необходимо сохранять российскую орбитальную пилотируемую инфраструктуру, для которой особенно актуальны орбиты с большим углом наклона [4]. В то же время необходимо учитывать, что постоянное пребывание человека на орбите высокостранно, поэтому необходимо реализовывать си-

стему посещаемых орбитальных станций без уменьшения эффективности проводимых на орбите работ. Это достигается за счёт значительного повышения уровня автоматизации выполнения служебных и целевых операций. Перед началом пилотируемого освоения Луны необходимо предварительно осознать цели такого освоения. Принимая во внимание крайне высокую стоимость лунных и в последующем межпланетных пилотируемых полётов, необходимо добиваться максимально широкого международного сотрудничества в реализации масштабных перспективных космических программ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьёв В.А. Система управления полётами пилотируемых космических комплексов. Материалы общих пленарных заседаний 13-й мультikonференции по проблемам управления. СПб.: АО Концерн ЦНИИ “Электроприбор”, 2020.
2. Микрин Е.А. Научно-технические проблемы реализации проекта “Пилотируемые космические системы и комплексы” // Космическая техника и технологии. 2019. № 3 (26). С. 5–19.
3. Муртазин Р.Ф. Схемы ускоренного доступа к орбитальной станции для современных космических кораблей // Космические исследования. 2014. Т. 52. Вып. 2. С. 162–175.
4. Solov'ev V.A., Kovalenko A.A., Solov'ev S.V. Priority Scientific and Technical Problems in the Field of Exploration and Efficient Use of Outer Space // Herald of the RAS. 2019. № 2. P 185–189; Соловьёв В.А., Коваленко А.А., Соловьёв С.В. Связанность территории Российской Федерации: от постановки комплексных задач к формированию комплексных научно-технических проектов // Вестник РАН. 2019. № 5. С. 493–498.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

КОСМИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ,  
ДОСТИЖЕНИЯ И ВЫЗОВЫ

© 2021 г. А. И. Григорьев<sup>a,\*</sup>, О. И. Орлов<sup>a,\*\*</sup>, В. М. Баранов<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Государственный научный центр РФ “Институт медико-биологических проблем РАН”, Москва, Россия

\*E-mail: grigoriev@imbp.ru

\*\*E-mail: orlov@imbp.ru

\*\*\*E-mail: info@imbp.ru

Поступила в редакцию 27.05.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 02.07.2021 г.

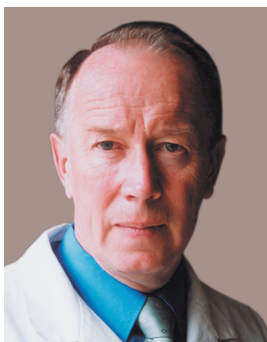
В статье, основанной на докладе, представленном на Научной сессии РАН, освещается история становления космической медицины, её теоретические основы, роль учёных Академии наук в подготовке и осуществлении первого полёта человека в космос. Рассматриваются достижения отечественных специалистов в области космической физиологии, биологии и медицины, способствующие развитию пилотируемой космонавтики. Приводятся примеры внедрения результатов исследований в космосе, а также приборов и устройств, разработанных для медицинского обеспечения экипажей космических объектов, в практическое здравоохранение. Анализируются проблемы медицинского обеспечения будущих межпланетных полётов и пути их решения.

**Ключевые слова:** пилотируемый космический полёт, космическая физиология, медицинское обеспечение экипажей космических объектов, межпланетные миссии.

DOI: 10.31857/S0869587321110050

60 лет назад произошло событие, которое имело громадное общечеловеческое значение, — первый полёт человека в космос. Полёт нашего соотечественника Юрия Алексеевича Гагарина стал не только предметом нашей национальной гордости, но и началом реализации чаяний многих поколений людей, живших и живущих на планете Земля. И поэтому неслучайно Организация Объединённых Наций на своей Генеральной Ассамблее определила 12 апреля международным днём полёта человека в космос.

Американский астронавт Нил Армстронг сказал о Юрии Гагарине: “Он позвал всех нас в космос”. Эта фраза прежде всего означает всплеск энтузиазма учёных всего мира относительно обеспечения космических полётов и создания широкой международной кооперации в этой области, кооперации, которая до настоящего времени успешно осуществляется на разных уровнях. Этот энтузиазм не обошёл стороной и представителей медицины. 12 апреля 1961 г. стал днём рождения не только пилотируемой космонавти-



ГРИГОРЬЕВ Анатолий Иванович — академик РАН, научный руководитель ИМБП РАН. ОРЛОВ Олег Игоревич — академик РАН, директор ИМБП РАН. БАРАНОВ Виктор Михайлович — академик РАН, руководитель научного направления ИМБП РАН.

ки, но и космической медицины. Как и космонавтика, космическая медицина зародилась задолго до своего официального оформления.

**Научные основы космической медицины.** Это новое направление медицины возникло не на пустом месте. Подготовка к полёту человека в космос проходила на фоне формирования системы знаний на базе эволюционной и экологической физиологии, физиологии экстремальных состояний, физиологии труда, и именно эта система составила основу для последующего возникновения и развития космической, гравитационной физиологии, ставшей краеугольным камнем космической медицины. Эта работа в основном выполнялась учениками и последователями школы академика И.П. Павлова. Как известно, в космонавтике есть свой теоретик и свой практик. Так и в космической медицине, можно сказать, что теоретиком являлся Леон Абгарович Орбели — представитель школы И.П. Павлова, который отвечал непосредственно за все вопросы, связанные с обеспечением полёта человека в космос [1]. А практиками были авиационные врачи, военные, яркий представитель которых — Владимир Иванович Яздовский [2]. В 1947 г. был создан Институт авиационной и космической медицины Министерства обороны СССР, и первая группа молодых специалистов пришла на работу в этот НИИ. Многие из них по прошествии десятков лет стали по праву называть основателями российской космической медицины.

Практические работы стартовали в начале 1950-х годов под руководством Сергея Павловича Королёва при участии академиков В.Н. Черниговского, М.Н. Сисакяна, В.А. Энгельгардта и других видных деятелей Академии наук [3]. Первыми в космос полетели животные (собаки). Естественное продолжение эти работы получили на искусственных биологических спутниках Земли “Спутник-2”, “Спутник-5”, которые доказали принципиальную возможность в контролируемых условиях, при отслеживании биологических функций, безопасного орбитального полёта биологических существ. Первые кратковременные полёты человека в космос с точки зрения влияния на его организм факторов космического пространства проходили безопасно, однако с увеличением продолжительности полётов стали обнаруживаться неблагоприятные эффекты длительного пребывания в невесомости. Особенно это проявилось после 17-суточного полёта экипажа космического корабля “Союз-9”. Были поставлены задачи, связанные с системным изучением влияния условий пребывания в космосе на организм человека, с целью разработки средств и методов сохранения здоровья и работоспособности членов экипажей космических кораблей и станций.

Уже в 1963 г. по инициативе С.П. Королёва и М.В. Келдыша при активном участии заместителя министра здравоохранения СССР А.И. Бурназяна был создан Институт медико-биологических проблем (ИМБП), который первоначально называли Институтом космической медицины, но потом, по ряду причин, ему дали более широкое название. На становление и развитие исследований института в разное время оказали решающее влияние его первые директора академики А.В. Лебединский, В.В. Парин, О.Г. Газенко. Институт в широкой кооперации с учреждениями Академии наук, других ведомств и при сотрудничестве с зарубежными коллегами развернул активную работу по изучению влияния факторов космического полёта на организм человека.

**Достижения космической медицины.** Исследования выполнялись широким фронтом, как в космических полётах, так и на земле при моделировании условий пребывания космонавтов на околоземной орбите.

Влияние факторов орбитальных космических полётов на сердечно-сосудистую систему изучалось сотрудниками под руководством академиков В.В. Парина, А.А. Мясникова, Е.И. Чазова. Была установлена ведущая роль перемещения жидкостных сред в верхнюю половину тела в возникновении негативных реакций сердечно-сосудистой системы на невесомость [4].

Академиками Ю.В. Наточиным и А.И. Григорьевым было показано отрицательное влияние условий полёта на функцию почек [5]. Сформированное направление исследований позволило перейти к другой важной задаче, связанной с регуляцией водно-солевого обмена, возникла целая научная школа. Ученики этой школы члены-корреспонденты РАН Б.В. Моруков и Л.Б. Буравкова, академик О.И. Орлов совместно с коллегами изучили проблему нарушения обмена кальция в условиях космического полёта и вымывания кальция из костной ткани, которое наблюдается после космических миссий. Были разработаны соответствующие меры профилактики [6, 7]. Безусловно, важными были результаты исследований влияния космических полётов на респираторную систему, выполненные под руководством академика В.М. Баранова. Установлены значимые изменения в системе внешнего дыхания и газообмена в условиях микрогравитации, приводящие к снижению парциального напряжения кислорода в крови (гипоксемия) [8, 9].

Необходимо вспомнить работы академика В.С. Гурфинкеля, члена-корреспондента РАН И.Б. Козловской и их последователей, которые привели к формулированию концепции гипогравитационного двигательного синдрома как комплекса факторов, нарушающих двигательную функцию в условиях полёта [10].

Конечно, выполнение программы полётов на отечественных орбитальных станциях было бы невозможно без исследований отечественной школы психофизиологии, представленной академиком П.В. Симоновым, М.М. Хананашвили и целым рядом других деятелей науки [11]. Нельзя не сказать и о космической гастроэнтерологии, основанной академиком А.М. Уголевым и его учениками, разработавшими рекомендации по организации питания космонавтов применительно к различным условиям полёта, функциональному состоянию и даже с учётом национальных особенностей членов экипажа [12].

Необходимо также упомянуть системы жизнеобеспечения, в создании которых активно участвовали не только учёные, конструкторы и технологи, но и медики. Именно они, зная физиологию человека, его резервные и приспособительные возможности, формулировали медико-технические требования к системам, обеспечивающим в замкнутом пространстве безопасную комфортную жизнь и деятельность членов экипажей космических объектов, участвовали в испытаниях систем обеспечения жизнедеятельности на соответствие санитарно-гигиеническим нормативам. Говоря о системах обеспечения жизнедеятельности космонавтов, следует упомянуть работы по биологическим системам жизнеобеспечения, которые проводились под руководством академика И.И. Гительзона в ИМБП в Москве и в Институте биофизики в Красноярске. Результаты этих исследований имеют важное значение в свете предстоящих задач по освоению дальнего космоса [13, 14].

Ещё большее значение для будущих межпланетных миссий имеют вопросы радиобиологии и радиационной безопасности. В своё время этими вопросами занимались сотрудники института “Биофизика” под руководством академика Л.А. Ильина [15]. В ИМБП лабораторию с аналогичными задачами применительно к космическим полётам возглавлял член-корреспондент РАМН Е.И. Воробьёв. В настоящее время возможными последствиями повышенного уровня радиации за пределами магнитного поля Земли для здоровья космонавтов продолжают заниматься коллективы академика М.А. Островского, члена-корреспондента РАН Е.А. Красавина и другие учёные. Удалось разработать систему мероприятий по обеспечению радиационной безопасности орбитальных пилотируемых полётов, позволяющую смотреть с оптимизмом на возможность создания подобной системы для будущих межпланетных миссий.

Самым важным достижением космической медицины за период от полёта Ю.А. Гагарина до наших дней следует считать создание системы медико-эпидемиологического обеспечения кос-

мических экспедиций продолжительностью, равной полёту к Марсу и обратно. Врач-космонавт В.В. Поляков провёл в космосе почти 438 суток. Система, включающая в себя различные средства и методы сохранения здоровья и работоспособности космонавтов, опирается на знания, полученные учёными, работающими в разных областях фундаментальной медицины.

**Космическая медицина и здравоохранение.** Прогресс космической медицины сопровождался очень важным эффектом — практическим выходом не только в космонавтику, но и в практическое здравоохранение. Мы научились лучше понимать состояние физиологической нормы, границу между нормой и патологией, оценивать функциональные резервы организма и реакцию организма на различные экстремальные воздействия. Та аппаратура, те методики и средства профилактики, которые разрабатывались для контроля состояния здоровья космонавтов, находили применение в клинической медицине. В этом процессе большую роль сыграла Академия наук, две её программы “Фундаментальные науки медицине” (руководители академики О.Г. Газенко и А.И. Григорьев) и программа “Поддержка инноваций и технологий” (руководители академики Г.А. Месяц и С.М. Алдошин). Эти программы, взаимно дополняя друг друга, создавали единую систему инновационных разработок от фундаментальных исследований до этапа коммерциализации. Опыт этих программ должен быть изучен и использован для расширения и ускорения процессов внедрения результатов в области космических исследований в нашу жизнь на Земле. Один из примеров успешной реализации результатов этих программ — внедрение костюма “Регент” и изделия “Корвит” в практику реабилитации больных с нейромышечной патологией. Эти изделия успешно применяются в клиниках не только нашей страны, но и за рубежом.

В своём ежегодном послании 20 апреля 2021 г. Президент РФ В.В. Путин упомянул телемедицину как один из важных элементов, доказавших свою эффективность в ситуации с пандемией COVID-19. Телемедицина начиналась как космический инструментарий. За прошедшие годы была проделана большая работа, прежде всего коллективом под руководством академика А.И. Григорьева совместно с Московским государственным университетом, Медико-стоматологическим и Нижегородским университетами и другими организациями, в процессе которой космические телемедицинские технологии были адаптированы для задач наземного применения, созданы основы телемедицинского образования, отработаны технологии организационного и правового обеспечения этой области здравоохранения [16]. Телемедицина оказалась инструментарием, в очередной раз доказавшим свою эффек-

тивность в процессе борьбы с коронавирусной инфекцией. Оказались востребованными и знания, полученные космическими медиками в области физиологического, физического и психологического стресса в условиях длительной изоляции. Сейчас эта работа продолжится в составе центра мирового уровня — Павловского центра интегративной физиологии, который создан на базе Института физиологии им. И.П. Павлова, Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова, ИМБП и Электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Современные вызовы.** На данном этапе пилотируемой космонавтики внимание большинства учёных и конструкторов приковано к проблематике межпланетных полётов. Надо признать, что технологии медицинского обеспечения таких миссий будут принципиально отличаться от того, что используется сейчас во время орбитальных полётов. Во-первых, специалисты столкнутся с факторами, с которыми не встречались ранее: это отсутствие магнитного поля Земли, галактическое излучение и др. Во-вторых, придётся поменять парадигму профилактических мероприятий, которые должны быть более гибкими, персонализированными, с использованием искусственной гравитации. Парадигма медицинского обеспечения в условиях автономных космических полётов должна базироваться на широком применении искусственного интеллекта, что мы называем между собой “интеллектуальным телемедицинским контуром”. Необходимо создать научно-технологический задел для более широкого применения робототехнических средств и передовых технологий на более поздних этапах экспансии человека в космос.

Конечно, нельзя забывать о тех технологиях, которые должны быть разработаны в преддверии начала программы освоения Луны, именно освоения, а не просто посещения. В связи с этим требует серьёзного изучения целый ряд вопросов, в частности, проблема лунной пыли. Работы в этом направлении уже начаты, их необходимо активизировать. Речь идёт о программе участия в полётах автоматических станций к Луне и на её поверхность и программе “БИОН-М”. С учётом планируемых изменений в федеральной космической программе потребуется коррекция программы полёта биологического спутника “БИОН-М” № 2, главная задача которого — комплексная оценка влияния космической радиации на живые организмы. В скором времени начнёт реализовываться, как мы надеемся, программа “Возврат” (тот самый “Ноев ковчег”), которая позволит оценить состояние биологических объектов после длительного пребывания в межпланетном космическом пространстве. Для транспортного корабля, который в беспилотном режиме будет осуществлять облёт Луны, готовится специальная биологическая программа исследо-

ваний. Полученные результаты позволят специалистам точнее оценить степень рисков и принять меры для сохранения здоровья и работоспособности космонавтов при выполнении лунных миссий.

Коротко о проекте “Международная космическая станция”. Медико-биологическая часть “Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС” представлена в двух разделах — “Человек в космосе” и “Космическая биология и биотехнология”. Они будут продолжаться до конца существования МКС с акцентом на перспективные российские программы. Всё, что предлагается для космических миссий, первоначально исследуется на земле в условиях комплексных экспериментов на различных моделях.

Работа по освоению космоса, особенно в области космической медицины, практически с самого начала пилотируемой космонавтики проводилась при широком международном сотрудничестве. Один из примеров — программа “Интеркосмос”, организованная по инициативе и под руководством Академии наук, возглавляемая академиком Б.Н. Петровым, в рамках которой проводились исследования не только по космической физике и другим направлениям, но и по космической биологии и медицине. Следует упомянуть российско-американское сотрудничество в области космической медицины, за которое с российской стороны отвечают Госкорпорация “Роскосмос” и Академия наук, а с американской — NASA. Эту работу координирует Российско-американская совместная рабочая группа по исследованию в области космической биологии и медицины, которой в нынешнем году исполняется 50 лет. В разные годы её возглавляли академики О.Г. Газенко и А.И. Григорьев. Сейчас российская сторона выдвинула концепцию создания международного центра для отработки технологии медицинского обеспечения межпланетных полётов. В рамках этой концепции реализуется программа “SIRIUS”, которая создана ИМБП РАН совместно с NASA при участии других международных партнёров. Программа представляет собой серию изоляционных экспериментов, в рамках которых учёные уже начали отрабатывать методики для будущих межпланетных полётов.

Дальнейшее развитие технологий космической медицины лежит на стыке многих наук, и здесь важно не только развитие традиционного сотрудничества физиологов, медиков, биологов, которое всегда успешно проходит под эгидой Академии наук, но и участие математиков, химиков, специалистов по IT-технологиям, физиков и представителей других дисциплин. И здесь очень важна роль и активная позиция Совета РАН по космосу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.И., Григорьян Н.А. Леон Абгарович Орбели. Становление физиологии военного труда, авиакосмической и подводной физиологии / Научная школа академика Л.А. Орбели. М.: Наука, 2007.
2. Яздовский В.И. На тропах Вселенной. Вклад космической биологии и медицины в освоение космического пространства. М.: Слово, 1996.
3. Сисакян Н.М., Парин В.В., Черниговский В.Н., Яздовский В.И. Некоторые проблемы изучения и освоения космического пространства / Проблемы космической биологии. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
4. Парин В.В., Баевский Р.М., Волков Ю.Н., Газенко О.Г. Космическая кардиология. Л.: Медицина, 1967.
5. Газенко О.Г., Наточин Ю.В., Григорьев А.И. Водно-солевой гомеостаз и космический полёт / Проблемы космической биологии. Т. 54. М.: Наука, 1986.
6. Григорьев А.И., Воложин А.И., Ступаков Г.П. Минеральный обмен у человека в условиях изменённой гравитации / Проблемы космической биологии. Т. 74. М.: Наука, 1994.
7. Моруков Б.В., Орлов О.И., Белаковский М.С. и др. Влияние модельной невесомости на обмен кальция и состояние костной ткани экспериментальных животных // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1990. № 2. С. 31–34.
8. Баранов В.М. Газоэнергообмен и внешнее дыхание человека в космических полётах и модельных исследованиях / Проблемы космической биологии. Т. 75. М.: Наука, 1993.
9. Донина Ж.А., Баранов В.М., Александрова Н.П., Ноздрачев А.Д. Дыхание и гемодинамика при моделировании физиологических эффектов невесомости. СПб.: Наука, 2013.
10. Козловская И.Б., Ярманова Е.Н., Егоров А.Д. и др. Развитие российской системы профилактики неблагоприятных влияний невесомости в длительных полётах на МКС / Международная космическая станция. Российский сегмент. Космическая биология и медицина. Т. 1. М.: ИМБП, 2011.
11. Мясников В.И., Замалетдинов И.С. Психическое состояние и групповое взаимодействие космонавтов в полёте / Человек в космическом полёте. Т. 3. Кн. 2. М.: Наука, 1997. С. 246–269.
12. Смирнов К.В., Уголев А.М. Космическая гастроэнтерология. М.: Наука, 1981.
13. Гительзон И.И., Ковров Б.Г., Лисовский Г.М. и др. Экспериментальные экологические системы, включающие человека / Проблемы космической биологии. Т. 28. М.: Наука, 1975.
14. Мелешко Г.И., Шепелев Е.Я. Биологические системы жизнеобеспечения (замкнутые экологические системы) / Под ред. академика О.Г. Газенко. М.: Синтез, 1994.
15. Лебединский А.В., Нефёдов Ю.Г. Проблемы радиационной безопасности космических полётов / Проблемы космической биологии. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
16. Григорьев А.И., Орлов О.И., Логинов В.А. и др. Клиническая телемедицина. М.: Слово, 2001.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ  
В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

© 2021 г. А. С. Коротеев

Государственный научный центр “Центр Келдыша”, г. Москва, Россия

E-mail: kerc@elnet.msk.ru

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

После доработки 09.06.2021 г.

Принята к публикации 14.07.2021 г.

В статье, подготовленной по материалам доклада на научной сессии Общего собрания членов РАН 21 апреля 2021 г., рассмотрена история и направления дальнейшего развития космической ядерной энергетики. Описаны функциональная схема и принцип действия мощной перспективной ядерной энергодвигательной установки на основе газоохлаждаемого реактора, турбомашинной системы преобразования энергии и электроракетных двигателей. Предложены рациональные варианты создания энергодвигательной установки с учётом ограничений по грузоподъёмности существующих ракет-носителей, рассмотрены перспективные направления применения мощных энергодвигательных систем для межорбитальной транспортировки космических аппаратов и питания энергоёмких полезных грузов.

**Ключевые слова:** космический аппарат, ядерная энергодвигательная установка.

**DOI:** 10.31857/S0869587321110062

Взрыв атомной бомбы в конце Второй мировой войны изменил не только общественно-политическую жизнь человечества, но и научно-технические планы и мысли в большинстве развитых стран мира. Возможности использования ядерной энергии на какой-то период времени стали казаться беспредельными или близкими к тому. И действительно, началось быстрое внедрение ядерной энергии во многие области экономики и военно-промышленного комплекса: появились атомные электростанции, новый класс подводных лодок в Военно-морском флоте, медицинские ядерные технологии. Естественным было внимание ракетной, а впоследствии ракет-

но-космической промышленности к использованию ядерной энергии.

Ракетная промышленность бурно развивалась в послевоенные годы и остро нуждалась в увеличении энергетики ракет. Важнейший показатель их энергетического совершенства — уровень удельной тяги двигателя, величины, определяемой как отношение тяги к секундному массовому расходу топлива:

$$R_{\text{уд}} = R/\dot{G} \sim \sqrt{T/\mu},$$

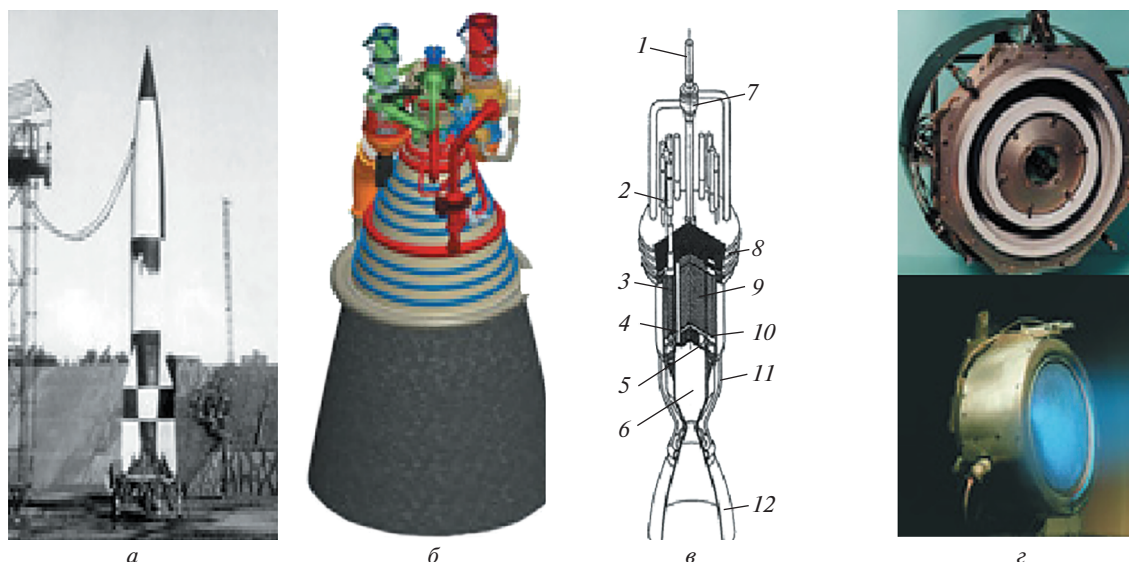
где  $R_{\text{уд}}$  — удельная тяга, м/с;  $R$  — тяга, Н;  $\dot{G}$  — массовый расход топлива, кг/с;  $T$  — температура, К;  $\mu$  — молекулярная масса продуктов сгорания, г/моль.

На рисунке 1 показаны значения  $R_{\text{уд}}$  для жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) ракеты “Фау-2”, послужившей отправной точкой для разработки послевоенных ракет как в СССР, так и в США, наиболее совершенных современных ЖРД и электроплазменных двигателей.

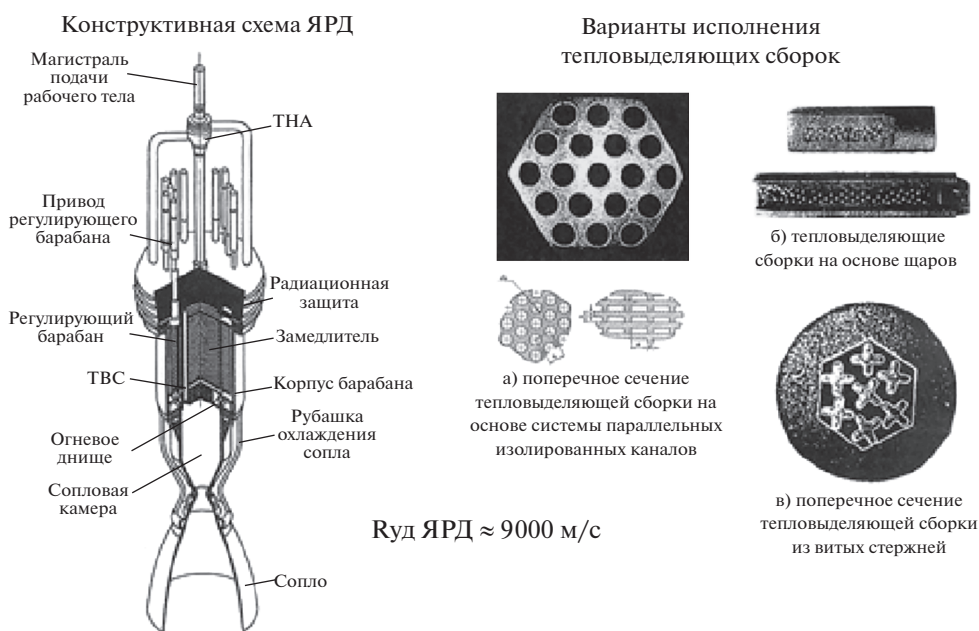
Переход на нагрев водорода в ядерных реакторах и, как следствие, отказ от больших величин  $\mu$  из-за ненужности окислителя сулил достижение величин удельной тяги до  $R_{\text{уд}} \sim 9000$  м/с, то есть фантастический скачок в её росте.



КОРОТЕЕВ Анатолий Сазонович — академик РАН, научный руководитель ГНЦ “Центр Келдыша”.



**Рис. 1.** Жидкостный ракетный двигатель ракеты “Фау-2” с удельной тягой 2000 м/с (а); современный кислородно-водородный жидкостный ракетный двигатель с удельной тягой 4600 м/с (б); ядерный ракетный двигатель с удельной тягой 7500–9500 м/с (в): 1 – магистраль подачи рабочего тела; 2 – привод регулирующего барабана; 3 – регулирующий барабан; 4 – тепловыделяющая сборка; 5 – огневое днище; 6 – сопловая камера; 7 – турбонасосный агрегат; 8 – радиационная защита; 9 – замедлитель; 10 – корпус барабана; 11 – рубашка охлаждения сопла; 12 – сопло; плазменные двигатели с удельной тягой от 20 до 100 тыс. м/с (г)



**Рис. 2.** Базовая конструктивная схема ЯРД

Были развёрнуты интенсивные работы по созданию ядерного двигателя в США и СССР, история которых изложена, в частности, в книге [1].

На рисунке 2 представлена базовая конструктивная схема ядерного ракетного двигателя (ЯРД), позволявшая реализовать нагрев водорода до  $T \sim 2500\text{--}3000\text{ К}$  с различными вариантами исполнения тепловыделяющихборок. Водород

проходит тепловыделяющие сборки активной зоны, составленные из высокотемпературных графитов или карбидов, после чего истекает через сопло, создавая тягу.

В течение двух десятилетий был проведён огромный комплекс научно-исследовательских, проектных и конструкторских работ, полигонные

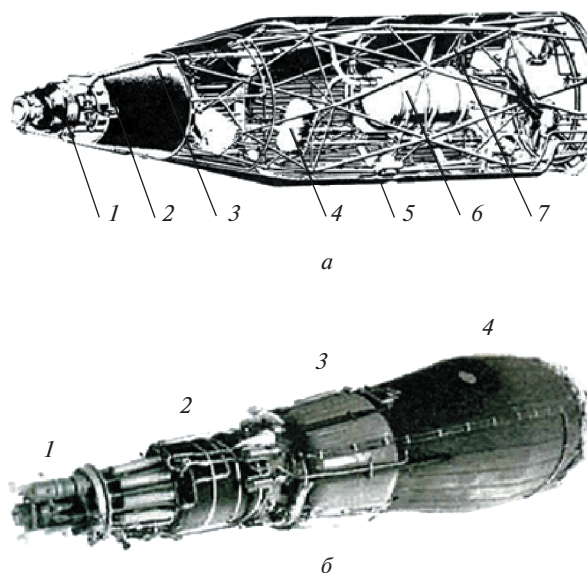
испытания опытных ЯРД, которые позволили сделать следующие выводы:

- высокие значения удельных тяг ( $R_{уд}$ ) действительно возможны; в СССР удалось достичь  $R_{уд} = 9000$  м/с, в США —  $R_{уд} = 7500$  м/с;
- используемые для нагрева рабочего тела комбинации на основе графитов или карбидов с делящимся веществом не обеспечивают длительной устойчивой работы без выноса делящегося вещества вследствие активного взаимодействия с водородом;
- как следствие, ЯРД в качестве маршевого двигателя космических аппаратов в ближайшие десятилетия найти применение не сможет.

Тому немало причин: и перенесение на дальнюю перспективу представлявшихся крайне актуальными в 1960–1970-е годы задач по пилотируемым полётам к планетам Солнечной системы, и существенный прогресс, достигнутый в те же годы в разработке высокоэффективных ЖРД, и трудности с обеспечением радиационной безопасности при отработке и эксплуатации космических ядерных установок.

В середине 1960-х годов началось освоение ещё одного важного направления ядерной космической техники — разработка ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с машинным и безмашинным преобразованием ядерной энергии в электрическую [2, 3]. На рисунке 3 представлены ЯЭУ “Бук” с термоэлектрическим преобразованием и “Тополь” с термоэмиссионным преобразованием, а в таблице 1 — результаты использования преобразования ядерной энергии в электрическую в ходе полётов на космических аппаратах серии “Космос”. Выяснилось, что без *обстоятельной наземной отработки, включающей в том числе контрольно-технологические испытания с реактором, выведенным на расчётную (или близкую к ней) мощность, надеяться на надёжную, безотказную работу системы весьма проблематично*. Более того, необходимо предусмотреть специальные меры по обеспечению радиационной безопасности, иными словами, соблюсти следующие принципы:

- сохранение реактора ЯЭУ в подкритичном состоянии (то есть без протекания реакции деления) до выхода космического аппарата на орбиту, в том числе в аварийных ситуациях;
- включение реактора ЯЭУ только на рабочей орбите космического аппарата;
- обязательное выключение реактора после выполнения спутником заданной программы, а также при возникновении аварийной ситуации;
- изоляция ЯЭУ от населения земли в течение времени, необходимого для снижения радиоактивности выключенного реактора до безопасного уровня;



**Рис. 3.** ЯЭУ “Бук” с термоэлектрическим преобразованием электрической мощностью 2.5 кВт (а): 1 — реактор; 2 — трубопровод жидкометаллического контура; 3 — радиационная защита; 4 — компенсационный бак жидкометаллического контура; 5 — холодильник-излучатель; 6 — термоэлектрический генератор; 7 — силовая рамная конструкция; ЯЭУ “Тополь” с термоэмиссионным преобразованием с электрической мощностью 7 кВт (б): 1 — системы реактора; 2 — реактор; 3 — защита; 4 — излучатель

- при невозможности изоляции — диспергирование (дробление) ЯЭУ до уровней, обеспечивающих безопасность населения на территории выпадения фрагментов установки.

В дальнейшем эти принципы были одобрены Комитетом ООН по космосу и закреплены в ныне действующем документе “Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве” [5], принятом в 1992 г. Генеральной Ассамблеей ООН.

Сильнейший психологический удар, потрясший мир в результате ядерной катастрофы 1986 г. на Чернобыльской АЭС, фактически заморозил работы по ядерным ракетным двигателям. До 2010 г. в основном шли научные исследования в надежде сохранить базовые предпосылки для перехода к возобновлению опытно-конструкторской разработки конкретных объектов в период, когда это станет необходимым [6].

Ядерная “спячка” прекратилась в 2009 г., когда решением Комитета при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России был утверждён проект “Создание транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса” от 28 октября 2009 г. Он ориентирован на решение проблемы создания качественно новых космических средств высокой энерговооружённости на

**Таблица 1.** Результаты использования ЯЭУ в ходе полётов на космических аппаратах серии “Космос” [2–4]

Космический аппарат	ЯЭУ	Дата запуска	Дата окончания функционирования	Срок пребывания на рабочей орбите
“Космос-367”	“Бук”	03.10.1970 г.	03.10.1970 г.	1.5 витка
“Космос-402”	“Бук”	01.04.1971 г.	01.04.1971 г.	2 витка
“Космос-469”	“Бук”	25.12.1971 г.	04.01.1972 г.	9 сут
“Космос-516”	“Бук”	21.08.1972 г.	22.09.1972 г.	32 сут
—	“Бук”	25.04.1973 г.	На орбиту не выведен, упал в Тихий океан	—
“Космос-626”	“Бук”	27.12.1973 г.	11.02.1974 г.	45 сут
“Космос-651”	“Бук”	15.05.1974 г.	25.07.1974 г.	71 сут
“Космос-654”	“Бук”	17.05.1974 г.	30.07.1974 г.	75 сут
“Космос-723”	“Бук”	02.04.1975 г.	15.05.1975 г.	44 сут
“Космос-724”	“Бук”	07.04.1975 г.	11.06.1975 г.	65 сут
“Космос-785”	“Бук”	12.12.1975 г.	12.12.1975 г.	4 витка
“Космос-860”	“Бук”	17.10.1976 г.	10.11.1976 г.	24 сут
“Космос-861”	“Бук”	21.10.1976 г.	20.12.1976 г.	60 сут
“Космос-952”	“Бук”	16.09.1977 г.	07.10.1977 г.	21 сут
“Космос-954”	“Бук”	18.09.1977 г.	Отказ системы увода, падение 28.01.1978 г. фрагментов ЯЭУ на территорию Канады	110 сут
“Космос-1176”	“Бук”	29.04.1980 г.	10.09.1980 г.	134 сут
“Космос-1249”	“Бук”	05.03.1981 г.	19.06.1981 г.	107 сут
“Космос-1266”	“Бук”	21.04.1981 г.	29.04.1981 г.	8 сут
“Космос-1299”	“Бук”	24.08.1981 г.	05.09.1981 г.	13 сут
“Космос-1365”	“Бук”	14.05.1982 г.	27.08.1982 г.	136 сут
“Космос-1372”	“Бук”	01.06.1982 г.	11.08.1982 г.	72 сут
“Космос-1402”	“Бук”	30.08.1982 г.	Отказ системы увода, падение фрагментов ЯЭУ в Атлантический океан	121 сут
“Космос-1412”	“Бук”	02.10.1982 г.	10.11.1982 г.	40 сут
“Космос-1579”	“Бук”	29.06.1984 г.	26.09.1984 г.	90 сут
“Космос-1607”	“Бук”	31.10.1984 г.	01.02.1985 г.	94 сут
“Космос-1670”	“Бук”	01.08.1985 г.	22.10.1985 г.	83 сут
“Космос-1677”	“Бук”	24.08.1985 г.	23.10.1985 г.	60 сут
“Космос-1736”	“Бук”	21.03.1986 г.	21.06.1986 г.	92 сут
“Космос-1771”	“Бук”	20.08.1986 г.	15.10.1986 г.	30 сут
“Космос-1818”	“Топаз”	02.02.1987 г.	24.06.1987 г.	142 сут*

Таблица 1. Окончание

Космический аппарат	ЯЭУ	Дата запуска	Дата окончания функционирования	Срок пребывания на рабочей орбите
“Космос-1860”	“Бук”	19.06.1987 г.	28.07.1987 г.	38 сут
“Космос-1867”	“Топаз”	10.07.1987 г.	17.06.1988 г.	343 сут*
“Космос-1900”	“Бук”	12.12.1987 г.	10.04.1988 г.	74 сут
“Космос-1932”	“Бук”	14.03.1988 г.	20.05.1988 г.	68 сут

\*Срок активного существования.

основе предложений, внесённых ГНЦ “Центр Келдыша”.

Новые принципы использования ядерной энергии в космосе направлены на существенное повышение надёжности силовой ядерной установки и полное соответствие современным международным требованиям обеспечения ядерной безопасности. Они сводились главным образом к четырём положениям:

- уход от высоких температур (3000 К → 1500 К);
- замена  $H_2$  на инертный газ;
- замена схемы двигателя на схему “бортовая электростанция + двигатель”;
- наличие электростанции даёт возможность использования электроплазменных двигателей с существенно более высокой удельной тягой, чем любой тепловой двигатель.

Принципиальная схема ядерной энергодвигательной установки представлена на рисунке 4. Рабочее тело (ксеноно-гелиевая смесь) нагревается в реакторе до температуры 1500 К и направляется на турбину, приводящую в действие электрогенератор для выработки электрической энергии и компрессор, обеспечивающий циркуляцию по замкнутому контуру. Для повышения КПД цикла используется рекуперация.

Сброс тепла осуществляется через холодильник-излучатель. Рассматриваются два его варианта: с твёрдыми поверхностями и бескапельные (капельные). В первом варианте рабочее тело поступает в холодильник-излучатель непосредственно после теплообменника-рекуператора, во втором в холодильник-излучатель поступает высокотемпературная жидкость, нагретая в теплообменнике-теплообменнике. Жидкость циркулирует по контуру теплообменник—холодильник—насос—холодильник—излучатель. Электрическая энергия обеспечивает работу электроплазменных двигателей, создающих тягу.

Реализация проекта потребовала освоения ключевых технологий, позволяющих собирать ЯЭУ по указанной на рисунке 5 схеме и создавать следующие составные части ядерной энергетической установки:

- высокотемпературный реактор;

- турбокомпрессор с температурой ~1500 К перед турбиной;
- высокооборотный генератор на бесконтактных опорах (магнитный или газодинамический подвес);
- компактные теплообменные аппараты;
- электроплазменные двигатели;
- развёртывание крупногабаритных конструкций в космосе;
- система сброса низкопотенциального тепла.

Разработка инновационных технологий по проекту транспортного энергетического модуля с космической ядерной энергодвигательной установкой выполнялась в 2010–2018 гг. благодаря кооперации ведущих предприятий “Роскосмоса”, “Росатома” с привлечением ряда специалистов РАН и вузов.

По всем указанным технологиям были получены результаты, давшие объективную картину возможного продвижения направления. При этом одни технологии были доведены до стадии готовности немедленного внедрения (электроплазменные двигатели), по другим чётко продемонстрирована возможность их реализации и пути дальнейшего развития (реактор, система преобразования тепла в электричество).

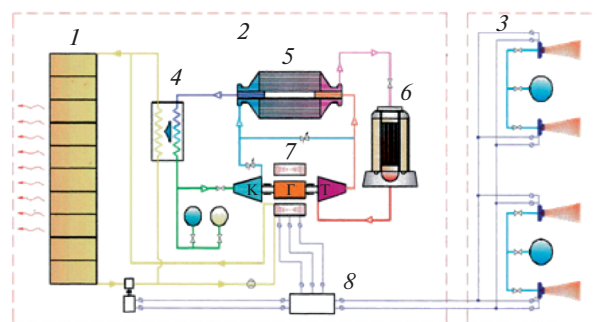
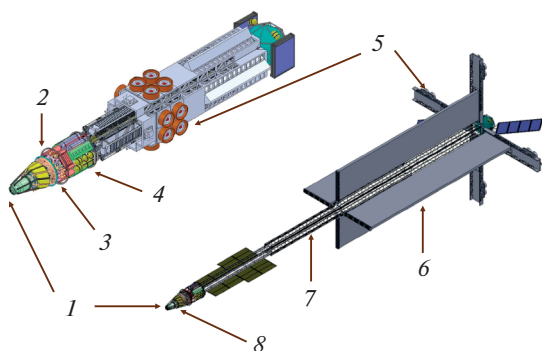


Рис. 4. Принципиальная схема ядерной энергодвигательной установки

1 – холодильник-излучатель; 2 – ЯЭУ; 3 – электроракетная двигательная установка; 4 – теплообменник-холодильник; 5 – теплообменник-рекуператор; 6 – реакторная установка; 7 – турбогенератор-компрессор; 8 – преобразователь AC/DC



**Рис. 5.** Ключевые инновационные технологии, разрабатываемые в рамках реализации проекта создания транспортно-энергетического модуля

1 — реакторная установка; 2 — технология создания высокотемпературных (до 1500 К) турбин; 3 — технология создания высокотемпературных компактных теплообменных аппаратов; 4 — технология создания высокооборотных (30–60 тыс. об/мин) электродвигателей и статических преобразователей большой мощности, средств управляющей техники; 5 — технология создания высокоэффективных электроракетных двигателей большой мощности; 6 — технологии создания бескарасных холодильников-излучателей; 7 — технологии развертывания крупногабаритных конструкций в космосе; 8 — технологии создания высокотемпературных жаропрочных конструкционных материалов

Особое место занимают результаты работ по системе сброса тепла, которая может реализовываться, как указывалось выше, в двух вариантах: в виде элементов твёрдых поверхностей излучателей с безусловным ограничением по мощности, прямым образом определяемым используемыми ракетами-носителями, и в варианте капельных холодильников-излучателей.

Принципиальная схема капельного холодильника-излучателя приведена на рисунке 6. В простейшем случае он состоит из генератора монодисперсного потока капель с модулятором акустических колебаний, гидросборника капель, насоса и теплообменника для нагрева от рабочего тела основного контура. На пути движения капля от генератора к заборнику происходит охлаждение жидкости. Холодная жидкость собирается в гидросборнике и направляется далее в рабочий контур. К преимуществам капельного холодильника-излучателя относятся неуязвимость к метеоритному пробое, минимальное тепловое сопротивление между теплоносителем и излучающей поверхностью, низкая удельная масса.

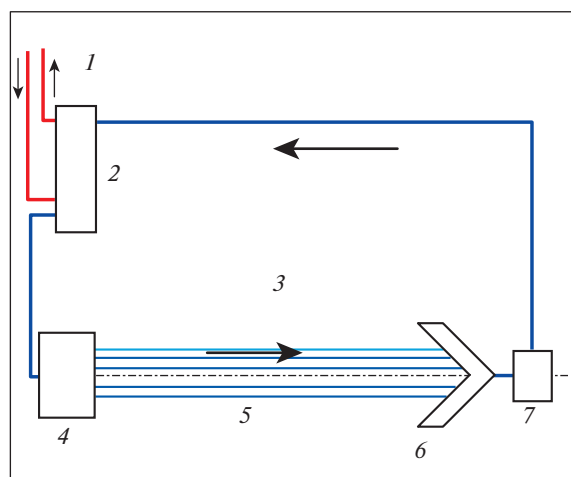
По капельным холодильникам-излучателям проведены фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования, включая эксперименты на космических станциях “Мир” и МКС, для изучения возможности замыкания жидкого контура в условиях невесомости и глубокого вакуума.

В результате космических экспериментов подтверждены:

- работоспособность генераторов капель в условиях микрогравитации и вакуума;
- работоспособность активного заборника капель;
- замыкание контура циркуляции теплоносителя.

Предстоит финальный эксперимент с замыканием контура через открытое космическое пространство.

Учитывая жёсткие требования по надёжности ракетно-космической техники, использующей



а

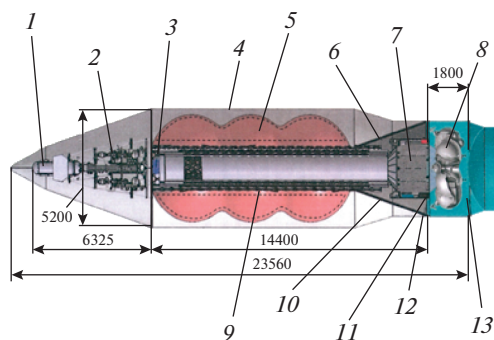


б

**Рис. 6.** Бескарасный холодильник-излучатель — перспективное направление развития космической ядерной энергетики (а)

1 — контур рабочего тела энергоустановки; 2 — теплообменник; 3 — контур рабочего тела капельного холодильника-излучателя; 4 — генератор капель; 5 — поток капель; 6 — заборник капель; 7 — насос

Космонавт С. Залётин во время космического эксперимента на борту орбитальной станции “Мир” (б)



**Рис. 7.** Транспортно-энергетический модуль с изменённой системой отвода тепла

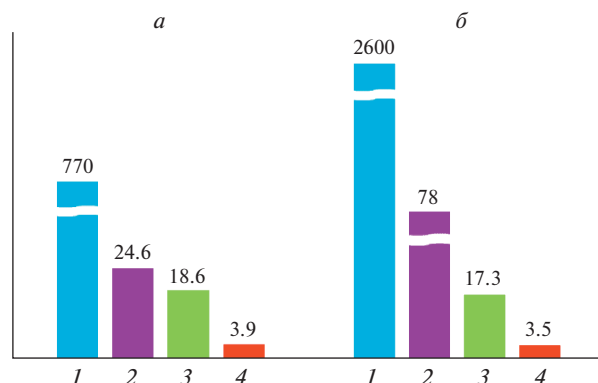
1 – реакторная установка; 2 – система преобразования энергии; 3 – защищённый приборный отсек; 4 – головной обтекатель; 5 – радиатор высокотемпературной системы обеспечения теплового режима; 6 – ферма силовая; 7 – блок служебных систем; 8 – разгонный блок; 9 – центральная ферма отсека несущих ферм; 10 – радиатор низкотемпературной системы обеспечения теплового режима; 11 – плоскость разделения с ракетой-носителем; 12 – плоскость разделения с разгонным блоком; 13 – технологический стык с ракетой-носителем

ядерные источники энергии, предпочтительный вариант сегодняшнего этапа развития работ – создание космического аппарата с упрощённой системой отвода тепла и применение отработанной ракеты-носителя. Был найден оригинальный вариант отвода тепла, позволяющий избежать развёртывания крупногабаритных конструкций в космосе и применения отработанной ракеты-носителя, что делает возможным проведение лётных испытаний в короткие сроки. Проектный облик такого аппарата показан на рисунке 7.

Предлагаемый космический аппарат с электрической мощностью до 200 кВт обеспечивает решение нескольких перспективных и практически важных задач, в частности:

- создание системы многопозиционной локализации для контроля движения малоразмерных объектов на большой площади;
- проведение эффективных транспортных операций в ближнем и дальнем космосе, в том числе вывод тяжёлых полезных грузов на геостационарную орбиту с меньшими финансовыми затратами, чем использование ракеты-носителя сверхтяжёлого класса (рис. 8);
- создание принципиально нового класса космических аппаратов с изменяемыми траекториями, радиолокационными и оптическими портретами;
- транспортно-энергетическое сопровождение программ исследования Луны и планет Солнечной системы.

Применение существующей ракеты-носителя тяжёлого класса “Ангара-А5” с транспортно-



**Рис. 8.** Сравнительная эффективность применения при выведении космических аппаратов на геостационарную орбиту (транспортная задача) ракеты-носителя тяжёлого класса “Ангара-А5” с транспортно-энергетическим модулем (с ядерной энергодвигательной установкой мощностью 200 кВт) (а) и ракеты-носителя сверхтяжёлого класса с кислородно-водородным разгонным блоком (б): 1 – стартовая масса; 2 – масса космического аппарата на низкой околоземной орбите; 3 – масса космического аппарата на геостационарной орбите; 4 – масса полезной нагрузки на геостационарной орбите

энергетическим модулем электрической мощностью 200 кВт позволяет сократить более чем в 3 раза стартовую массу при увеличении массы космического аппарата и его полезной нагрузки на геостационарной орбите по сравнению с вариантом использования создаваемой ракеты-носителя сверхтяжёлого класса с кислородно-водородным разгонным блоком.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Демьянко Ю.Г., Конюхов Г.В., Коротеев А.С. и др. Ядерные ракетные двигатели. М.: Норма-Информ, 2001.
2. Землянов А.Б., Коссов Г.Л., Траube В.А. Система морской космической разведки и целеуказания (история создания). СПб.: Галеев-Принт, 2002.
3. Кухаркин Н.Е., Пономарёв-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – “Ромашка” и “Енисей”). М.: ИздАт, 2012.
4. Гафаров А.А. Проблемы столкновений космических объектов с ядерными источниками энергии на борту с космическим мусором / Космический мусор. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора. М.: Физматлит, 2014.
5. Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН 47/68 от 14 декабря 1992 г. (документ ООН № А/АС.105/572).
6. Коротеев А.С., Акимов В.Н., Архангельский Н.И. и др. Ядерные ракетные двигатели: состояние разработки и перспективы применения // Атомная энергия. 2018. № 4. С. 206–211.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

ОРБИТАЛЬНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ “СПЕКТР-РГ”:  
КАРТЫ НЕБА В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ

© 2021 г. Р. А. Сюняев<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт астрофизики Общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

\*E-mail: sunyaev@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021 г.

После доработки 20.10.2021 г.

Принята к публикации 23.10.2021 г.

13 июля 2019 г. с космодрома “Байконур” Роскосмос осуществил запуск ракетоносителя “Протон-М” с разгонным блоком ДМ-03 и орбитальной обсерваторией “Спектр-РГ” на борту. Обсерватория построена в рамках Федеральной космической программы в Научно-производственном объединении им. С.А. Лавочкина по заказу Российской академии наук и оснащена уникальными рентгеновскими зеркальными телескопами с оптикой косоугольного падения ART-XC им. М.Н. Павлинского (Институт космических исследований РАН, РФЯЦ Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Россия) и eROSITA (Институт внеземной физики Общества им. Макса Планка (МФЕ), Германия). 21 октября 2019 г. обсерватория СРГ вышла на рабочую гало-орбиту вокруг точки Лагранжа L2 системы “Солнце–Земля”, на которой она должна находиться не менее 6.5 лет её работы. В декабре 2019 г. обсерватория приступила к выполнению своей главной научной задачи: построению карт всего неба в рентгеновских лучах с энергией от 0.3 до 8 кэВ (eROSITA) и от 4 до 30 кэВ (ART-XC). В июне 2020 г. было завершено первое сканирование и в результате получена лучшая в мире карта всего неба в рентгеновских лучах в диапазоне 0.3–2.3 кэВ. В декабре 2021 г. благодаря СРГ планируется завершить четвёртый скан, а всего предполагается получить 8 таких последовательных сканов. Их итоговая сумма позволит открыть около 3 млн квазаров и до 100 тыс. массивных скоплений галактик по их рентгеновскому излучению. Наличие восьми карт неба позволит следить за переменностью во времени не только ядер активных галактик и квазаров, но и сотен тысяч звёзд нашей Галактики с коронами намного более яркими, чем у нашего Солнца, сотен аккрецирующих нейтронных звёзд, чёрных дыр и многих тысяч белых карликов в двойных звёздных системах. Планируется, что в декабре 2023 г. обсерватория перейдёт к детальным наблюдениям наиболее интересных космических объектов и полей, открытых с декабря 2019 г.

Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на научной сессии Общего собрания членов РАН 21 апреля 2021 г.

**Ключевые слова:** космические исследования, астрофизика высоких энергий, рентгеновская астрономия, космология, чёрные дыры, квазары, скопления галактик, рентгеновские телескопы.

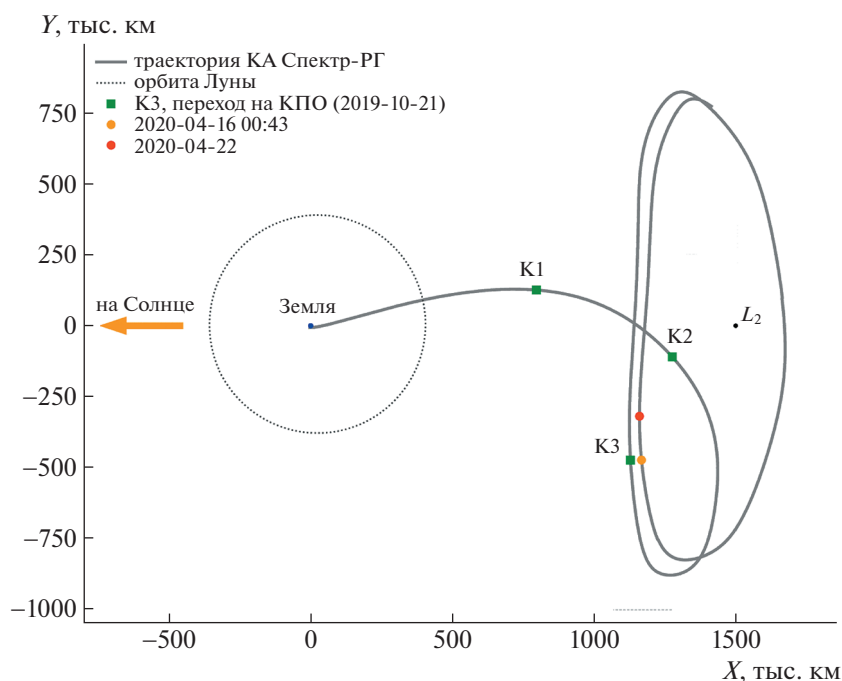
DOI: 10.31857/S0869587321110153



СЮНЯЕВ Рашид Алиевич — академик РАН, зав. лабораторией отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН, почётный директор Института астрофизики Общества им. Макса Планка.

Орбитальная обсерватория “Спектр-Рентген-Гамма” (“Спектр-РГ”, или “СРГ”) [1] была выведена на протяжённую орбиту вокруг второй точки Лагранжа L2 системы “Солнце–Земля” спустя 100 дней после старта 13 июля 2019 г. с космодрома “Байконур” российского ракетоносителя “Протон-М” с разгонным блоком ДМ-03 (рис. 1).

Успешный запуск обсерватории стал знаменательным событием для отечественной науки: впервые российский космический аппарат выведен во вторую точку Лагранжа системы “Солн-



**Рис. 1.** Проекция траектории космического аппарата “Спектр-РГ” на плоскость эклиптики

Пунктиром обозначена орбита Луны. K1, K2, K3 — моменты проведения трёх коррекций траектории на перелёте. Справа от квадрата K3 указан момент “закрытия” рабочей орбиты после полного оборота (орбита незамкнута), а выше — положение обсерватории через полгода после выхода на рабочую орбиту (квазипериодическая орбита, или КПО)

Изображение: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

це—Земля”, находящуюся на расстоянии 1.5 млн км от Земли. В окрестностях этой точки яркие Солнце, Земля и Луна находятся всегда с одной и той же стороны от космического аппарата, что позволяет телескопам вести круглосуточные наблюдения на протяжении многих лет, заметно упрощает работу системы терморегулирования платформы “Навигатор” и установленных на ней телескопов, а ещё — эффективно использовать систему пассивного охлаждения детекторов излучения, использующих радиаторы для отвода избыточного тепла в открытый космос в противоположном от Солнца и Земли направлении. С октября 2019 г. орбитальная обсерватория “Спектр-РГ” успешно работает на гало-орбите вокруг точки L2.

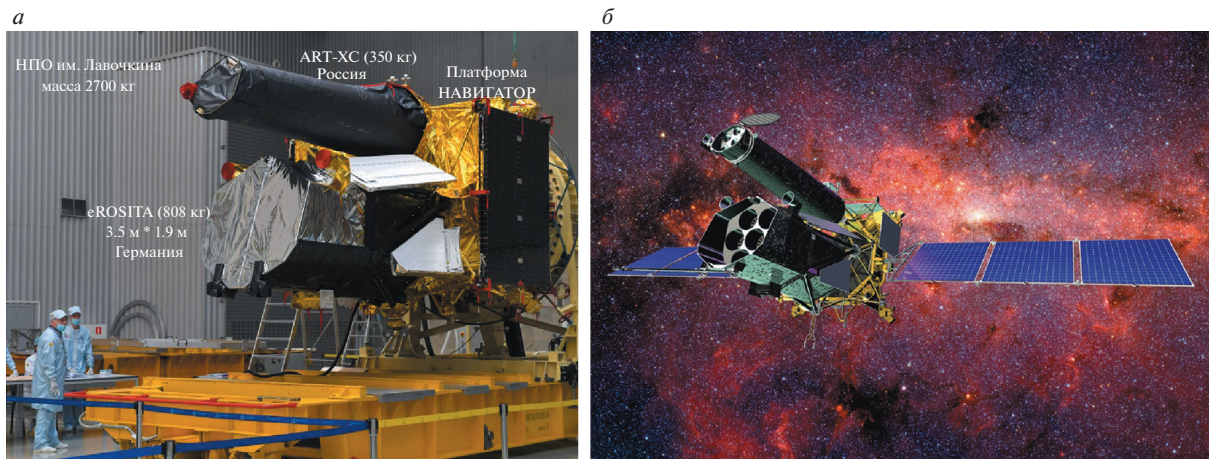
Этот масштабный проект осуществляется в соответствии с Федеральной космической программой по инициативе Российской академии наук и её Института космических исследований (ИКИ). На платформе “Навигатор” (Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Госкорпорация “Роскосмос”) [1], установлены рентгеновские телескопы с оптикой косого падения: extended Roentgen Survey with an Imaging Telescope Array — eROSITA, изготовленный Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (МФЕ), Германия) [2] и российский Астрономический рент-

геновский телескоп им. М.Н. Павлинского — Astronomical Roentgen Telescope — X-ray Concentrator (ART-XC)<sup>1</sup> [3] (рис. 2). Это было сделано в соответствии с меморандумом, подписанным в 2007 г. между Российским космическим агентством (с 2015 г. — ГК “Роскосмос”) и Аэрокосмическим агентством Германии (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt — DLR). Детекторы телескопа eROSITA чувствительны к рентгеновским лучам в диапазоне энергий 300 эВ—8 кэВ, а ART-XC — в диапазоне 4—30 кэВ.

Платформа “Навигатор” позволяет телескопам вести наблюдения в трёх режимах: сканирование всего неба (основной режим), сканирование наиболее интересных протяжённых участков неба размером до 150 град<sup>2</sup> (квадратных градусов), длительные наблюдения наиболее интересных источников при трёхосной стабилизации аппарата.

Обсерватория вращается с периодом 4 часа вокруг оси, направленной к Солнцу. В течение су-

<sup>1</sup> Научный руководитель миссии — академик РАН Р.А. Сюняев; научный руководитель телескопа ART-XC им. М.Н. Павлинского (Россия) — заместитель директора по научной работе ИКИ РАН доктор физико-математических наук, профессор РАН А.А. Лутовинов; научный руководитель по телескопу eROSITA (Германия) — доктор Андреа Мерлони (прим. ред.).



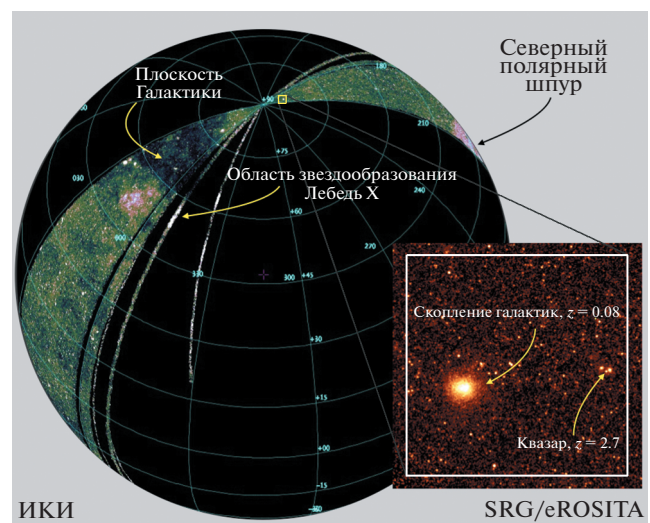
**Рис. 2.** “Спектр-РГ” в чистовых помещениях НПО им. С.А. Лавочкина перед вывозом на космодром — а; “Спектр-РГ” в полёте (НПО им. С.А. Лавочкина) — б  
Каждый из двух телескопов содержит по семь зеркальных систем косого падения

ток плоскость вращения аппарата, следуя за Солнцем, поворачивается на один градус. В режиме сканирования всего неба “Спектр-РГ” осуществляет один оборот вокруг L2 за полгода. За это время в процессе сканирования всего неба обсерватория строит его полную карту. Таким образом, телескопы космического аппарата позволяют исследователям наблюдать каждый источник на небе раз в полгода шесть раз в течение одних суток (eROSITA) или четыре раза (ART-XC, поле зрения которого несколько меньше). На рисунке 3 представлены первые попытки группы управления в НПО им. С.А. Лавочкина наладить непрерывный режим сканирования неба. Видны первые одиночные сканы, приводящие к появлению на карте телескопа eROSITA полосок шириной в один градус дуги. Виден и момент, когда один день наблюдений был пропущен: на карте осталась пустая полоска. Чувствительность обзора неоднородна по небу. Все полосы пересекаются в Северном и Южном полюсах эклиптики, что приводит к более высокой экспозиции и высокой чувствительности вблизи них (детальное обсуждение в статье [1]).

Сейчас осуществляется четвёртое сканирование всего неба, а к декабрю 2023 г. учёные планируют получить восемь таких сканов, в итоге будет создано восемь карт всего неба в рентгеновских лучах. Суммируя их, мы увеличим “чувствительность”, а значит и информативность итоговой карты. Вместе с тем различия между восемью картами позволяют нам следить за переменностью излучений рентгеновских источников во времени, а шесть оборотов аппарата в течение суток — за “быстрой” переменностью излучения достаточно ярких объектов. В декабре 2023 г. по завершении четырёхлетней программы сканирования

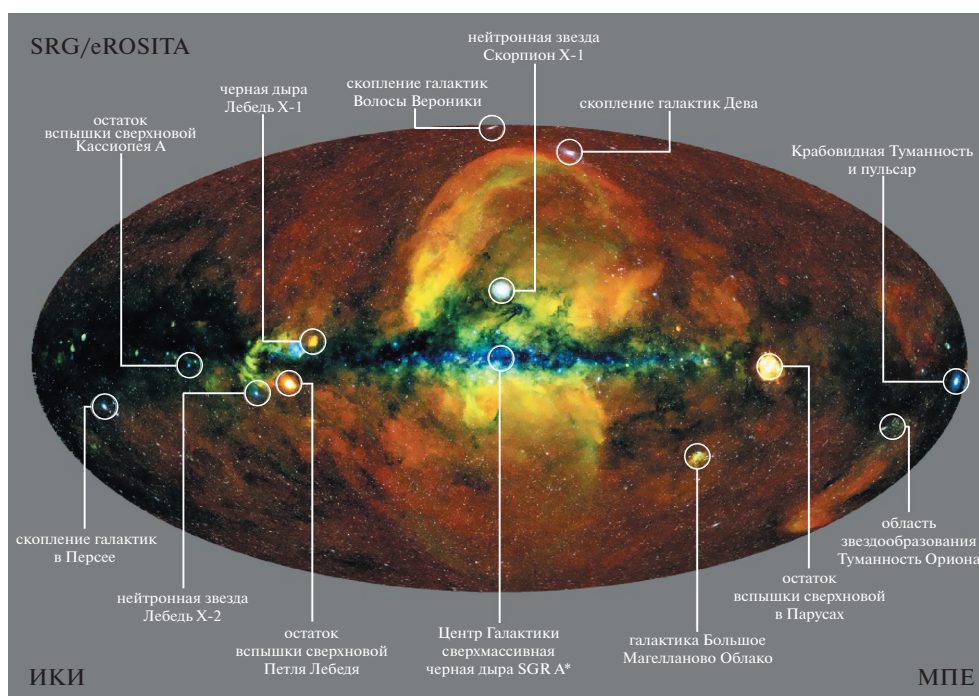
всего неба обсерватория перейдёт к длительным и детальным наблюдениям наиболее интересных объектов и сравнительно небольших небесных полей размером от десятков до нескольких тысяч квадратных градусов.

Следует указать, что в ходе подписания меморандума о включении немецкого рентгеновского телескопа eROSITA в состав приборов обсервато-



**Рис. 3.** Карта половины неба в диапазоне 0.4–2 кэВ, полученная телескопом eROSITA спустя месяц после начала регулярного сканирования неба

Оси телескопов обсерватории описывают большие круги на небе, проходящие через Северный и Южный полюса эклиптики. На карте чётко видна тёмная полоса, связанная с поглощением мягкого рентгеновского излучения газом и пылью в плоскости Галактики. В зоне близкой к Северному полюсу эклиптики легко удаётся отождествить богатое скопление галактик и яркий квазар с красным смещением  $z = 2.7$ .



**Рис. 4.** Рекордная карта всего неба в рентгеновских лучах в диапазоне энергий 0.3–2.3 кэВ, построенная на основе данных телескопа eROSITA в ходе первого сканирования неба

рии СРГ было принято важное решение о разделе данных и прав на них, получаемых этим телескопом. “Роскосмос” и DLR договорились, что за обработку данных и публикацию результатов eROSITA на одной половине неба будут отвечать российские учёные, а на второй половине неба — немецкие. В качестве границы выбран нулевой меридиан в галактических координатах. Разграничение касается и прав на полученные результаты. Все данные телескопа ART-XC принадлежат российским учёным.

Управление спутником ведётся Центром управления НПО им. С.А. Лавочкина в Химках под Москвой, а за подготовку команд управления рентгеновскими телескопами отвечают Институт внеземной физики Общества им. Макса Планка, расположенный в Гархинге вблизи Мюнхена (в случае телескопа eROSITA), и Институт космических исследований РАН в Москве (в случае ART-XC). Приём полученных научных данных и передача команд на телескоп eROSITA осуществляется с помощью гигантских антенн диаметром 64 м Центра дальней космической связи “Медвежий озёра” под Москвой и диаметром 70 м Дальневосточного центра дальней космической связи под Уссурийском. Передача команд на служебные системы платформы “Навигатор” и телескоп ART-XC выполняется с помощью антенн диаметром 12 м центра “Медвежий озёра” и антенн на Байконуре.

**Рентгеновская карта всего неба, полученная телескопом eROSITA в ходе первого сканирования**

**всего неба.** Для построения первой карты всего неба в рентгеновских лучах (она представлена на рисунке 4) были использованы 400 млн рентгеновских фотонов в диапазоне энергий от 300 эВ до 2.3 кэВ, зафиксированных телескопом eROSITA за первые полгода сканирования неба [1, 4]. Отмечу, что к моменту сдачи этой статьи в печать обсерватория “Спектр-РГ” завершила три с половиной скана неба, и полное число зарегистрированных рентгеновских фотонов превысило 1 млрд 400 млн. Но уже первое сканирование позволило построить карту, содержащую более 1 млн внегалактических рентгеновских источников и замечательное изображение нашей галактики Млечный Путь с множеством диффузных источников излучения.

В построении карты участвовали астрофизики двух научных консорциумов, обобщающих данные, получаемые с помощью телескопа eROSITA в России и Германии. Каждый консорциум создал карту для одной половины неба (главную роль в этом сыграли член-корреспондент РАН М.Р. Гильфанов, академик РАН Е.М. Чуразов (ИКИ РАН), доктора Г. Бруннер и Дж. Сандерс (МПЕ). По решению Объединённого научного комитета карты (в проекции Аитова) были совмещены и образовали единую карту всего неба, оказавшуюся лучшей в истории рентгеновской астрономии как по чувствительности, так и по угловому разрешению. Карта выполнена в трёх цветах: фотоны различных энергий представлены крас-

ным (300–600 эВ), зелёным (от 600 эВ до 1.0 кэВ), синим (1–3 кэВ) (см. электронную версию журнала “Вестник РАН” с цветными изображениями в открытом доступе на сайте ИКЦ “Академнига”: <https://sciencejournals.ru/journal/vestnik/>). Таким образом, карта позволяет оценивать температуру излучающего газа в диапазоне от трёх до десятков миллионов градусов.

В самом центре карты расположена сверхмассивная чёрная дыра SGR A\* — около 4 млн масс Солнца, но это очень слабый источник. В центральной плоскости карты лежит диск Млечного Пути — невооружённым глазом мы обычно наблюдаем его в виде яркой диффузной полосы на небе. Однако в рентгеновских лучах Млечный Путь выглядит как тёмная полоса, поскольку атомарный и молекулярный межзвёздный газ и пыль в плоскости нашей Галактики поглощают мягкие рентгеновские лучи. Голубые яркие точки вблизи плоскости Галактики демонстрируют наличие сотен ярких и мощных рентгеновских источников в Млечном Пути — рентгеновских пульсаров, аккрецирующих чёрных дыр, нейтронных звёзд и белых карликов в двойных звёздных системах, а также остатков вспышек сверхновых.

Обращает на себя внимание ряд хорошо известных рентгеновских источников. Среди них скопления галактик в созвездиях Волосы Вероники, Дева, Персей, протяжённые галактические источники, такие как остатки вспышек сверхновых, область звездообразования в созвездии Орион и первый из зарегистрированных ярчайший (после Солнца) источник рентгеновских лучей Скорпион X-1.

Хорошее угловое разрешение (около 25 секунд дуги) и высокая чувствительность телескопа eROSITA позволили уже по данным первого скана неба обнаружить и нанести на карту свыше 1 млн компактных и около 20 тыс. протяжённых источников рентгеновского излучения. Столь большое количество объектов невозможно отобразить на журнальном рисунке. Лишь самые яркие из них видны как белые точки, разбросанные по всему небу.

Первый обзор неба, произведённый обсерваторией “Спектр-РГ” телескопами ART-XC и eROSITA, показал следующее.

- Три четверти точечных объектов на карте — это квазары и ядра активных галактик, то есть сверхмассивные чёрные дыры, излучающие за счёт аккреции (падения) на них вещества. Они находятся в сотнях миллионов и миллиардах световых лет от нас (о дисковой аккреции на чёрные дыры см. статью [5]).

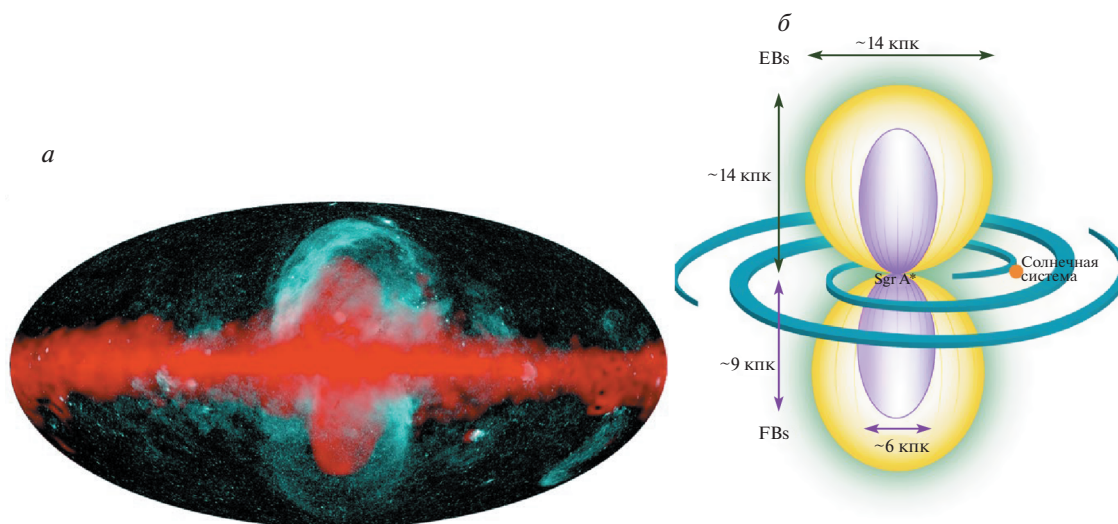
- Кроме этого мы видим более 200 тыс. звёзд нашей Галактики с коронами более активными, чем у Солнца. Оптические каталоги звёзд астрометрического спутника GAIA (Европейское кос-

мическое агентство), измеряющего параллаксы звёзд и их собственное движение на небе с высочайшей точностью, позволяют отделять звёзды от квазаров и ядер активных галактик. У далёких внегалактических объектов зафиксировать их перемещение на небе невозможно.

- Среди протяжённых объектов доминируют скопления галактик. Это самые массивные гравитационно связанные объекты во Вселенной: 80% их массы в  $10^{14}$ – $10^{15}$  масс Солнца составляет невидимое “тёмное вещество”, определяющее параметры потенциальной “ямы” скопления. Астрономы исследуют сотни и тысячи галактик, входящих в их скопления и движущихся в потенциальной “яме” со среднеквадратичной скоростью около 1000 км/сек. Суммарная масса звёзд в этих галактиках составляет лишь 3–4% массы всего скопления. Рентгеновские лучи испускает горячий межгалактический газ, заполняющий скопление (его температура от десятков до сотен млн градусов, а масса ~15% массы всего скопления).

Наблюдение распределения газа в гравитационной “яме” позволяет детально исследовать её свойства и затем рассчитать распределение тёмного вещества в скоплении галактик, наблюдения же изменения количества таких скоплений с увеличением красных смещений линий в спектрах галактик, входящих в скопления, — зафиксировать темп формирования скоплений галактик и роста крупномасштабной структуры Вселенной вплоть до  $z = 2$ . Уже первый обзор всего неба позволил нанести на карту более 15 тыс. скоплений галактик на различных красных смещениях. Обнаружение около 100 тыс. скоплений, а это, по оценкам теоретиков, практически все скопления в наблюдаемой части Вселенной, — одна из главных целей проекта “Спектр-РГ”.

**Гигантские “пузыри” горячего газа, выброшенного из центральной области Галактики около 50 млн лет назад.** Первая карта, опубликованная командой учёных, обрабатывающих данные телескопа eROSITA, открывает возможность увидеть во всей красе гигантские “пузыри” горячего газа с температурой до 10 млн градусов над и под диском Млечного Пути (см. рис. 4). С помощью этого телескопа учёные обнаружили рентгеновские линии высокозарядных ионов, ударные волны, измерили температуру газа. Скорее всего, этот выброс газа был результатом взрывов около 50 млн лет назад сотен тысяч сверхновых или активности на протяжении нескольких миллионов лет аккрецирующей сверхмассивной чёрной дыры в центре нашей Галактики. По-видимому, выброс газа привёл к образованию ярких “пузырей”, окружающих уже хорошо известные “пузыри”, открытые телескопом “Ферми” (НАСА) в гамма-



**Рис. 5.** Наложение карт нашей Галактики, полученных телескопами SRG/eROSITA и “Ферми” (НАСА) [4]. Диффузное рентгеновское излучение, регистрируемое телескопом eROSITA (0.6–1 кэВ), обозначено голубым цветом, окружает область более жёсткого излучения (гигаэлектронвольты, обозначено красным), получившую название “пузыри Ферми” — *а*; поясняющая схема — *б*, кпк — килопарсек (1 кпк = 3 тыс. световых лет)

лучах, возникающих при взаимодействии космических лучей с окружающим газом (рис. 5) [4].

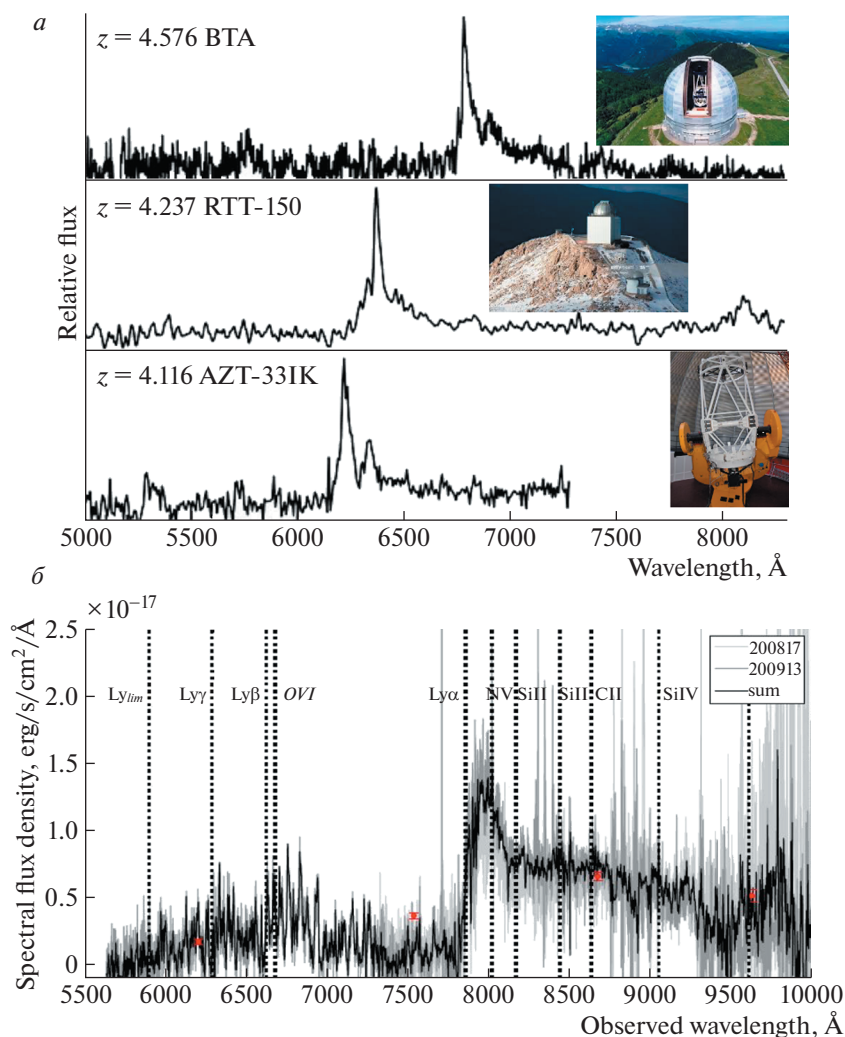
**Открытие квазаров на больших красных смещениях.** Среди двух миллионов квазаров, обнаруженных телескопом eROSITA и нанесённых к настоящему времени на рентгеновскую карту неба, особый интерес представляют объекты с большим красным смещением  $z > 4$ , свет от которых идёт к нам более 10 млрд лет (рис. 6 *а, б*). Современные математические методы машинного обучения и использование нейронных сетей позволяют, используя данные глубоких фотометрических обзоров неба в оптическом и инфракрасном диапазонах, получаемых с помощью систем телескопов Pan-STARRS, SDSS, DESI Legacy Imaging Surveys, WISE (США), выбирать рекордно далёкие от нас объекты среди миллионов рентгеновских источников, наблюдаемых телескопом eROSITA. При таком анализе из миллиардов оптических объектов отбираются лишь те, которые находятся в пределах 10 угловых секунд от рентгеновских источников, а уже из них по отношениям яркости в различных фотометрических фильтрах выбираются кандидаты в квазары на больших красных смещениях. После этого в игру вступают наземные оптические телескопы, получающие детальные спектры излучения отобранных объектов [6–10]. В 85–90% случаев оптические спектры подтверждают выбор, сделанный при расчётах с помощью программ машинного обучения, но с гораздо более высокой точностью.

Комплекс программ SRGz для решения этой задачи был разработан в ИКИ РАН кандидатом физико-математических наук А.В. Мешеряковым, его аспирантами и студентами с целью опре-

деления красных смещений всех 3 млн квазаров из каталога телескопа eROSITA, открываемых в ходе восьми сканов неба, причём с точностью, достаточной для использования в космологических тестах. Для наземной спектроскопии эта задача в настоящее время непосильна.

**Телескопы обсерватории “Спектр-РГ”.** Российский телескоп ART-XC (рис. 7) был задуман и реализован под руководством доктора физико-математических наук Михаила Николаевича Павлинского (1959–2020), вся научная биография которого связана с ИКИ РАН, последняя его должность — заместитель директора института по проекту “Спектр-РГ”, заведующий отделом астрофизики высоких энергий. Теперь телескоп ART-XC носит имя своего создателя [2].

Рентгеновские лучи поглощаются поверхностью зеркал ART-XC и отражаются ими лишь под очень малыми углами к их поверхности (в диапазоне чувствительности телескопа eROSITA эти углы близки к одному градусу дуги, а у ART-XC они ещё меньше). Необходимо отметить, что в 1952 г. немецкий учёный Г. Вольтер опубликовал схему телескопа на основе оптики косоугольного падения, позволяющего фокусировать рентгеновские лучи. Эта схема требует два рассеяния каждого рентгеновского фотона — сначала на тщательно отполированном параболоиде, а затем на гиперболоиде с таким же высоким качеством поверхности. ART-XC и eROSITA имеют по семь зеркальных модулей. В каждом зеркальном модуле ART-XC по 28 соосных оболочек. Зеркальные модули телескопа eROSITA оснащены 54 оболочками (рис. 8). В фокусе каждого модуля установлен позиционно чувствительный детектор рентге-



**Рис. 6.** Оптические спектры трёх ранее неизвестных квазаров на красном смещении  $z > 4$ .

Детальная спектроскопия на крупнейшем российском оптическом телескопе в CAO РАН (верхняя треть рисунка), российско-турецком телескопе вблизи Анталии (средняя часть) и телескопе Иркутского научного центра РАН в Саянах (нижняя треть) [6–9] — *a*

Оптический спектр квазара SRGEJ170245/2+130107, открытого с помощью телескопа eROSITA, полученный на шестиметровом оптическом телескопе БТА CAO РАН на Кавказе. Вертикальные пунктирные линии демонстрируют позиции пиков эмиссионных линий квазара с красным смещением  $z = 5.466$  [10]. Длины волн всех линий сдвинуты в красную сторону в 6.5 раза. Кандидат физико-математических наук П. Медведев (ИКИ РАН) открыл по данным телескопа eROSITA в рентгене квазар на  $z = 6.18$ , светивший ещё тогда, когда Вселенная была почти в 20 раз моложе её нынешнего возраста, но масса этого квазара уже была близка к 1 млрд солнечных масс [11] — *b*

новских фотонов. Это ПЗС-матрица в случае eROSITA и детектор на базе кристаллов CdTe в случае ART-XC. Детекторы ART-XC и их электроника созданы в ИКИ РАН в группе В.В. Левина и прекрасно показали себя в ходе двух лет непрерывной работы в космосе, так же как и все остальные системы этого телескопа.

В России освоено и производство зеркальных модулей для рентгеновских телескопов. Однако к моменту начала испытаний всей обсерватории в сборе российские зеркала ещё не были доведены до желательных параметров, поэтому на лётном

телескопе ART-XC установлены рентгеновские зеркала производства Центра космических полётов им. Дж. Маршалла (НАСА). Взамен американские учёные получили право на совместную с российскими обработку и анализ данных небольшой области неба вблизи северного полюса эклиптики. РФЯЦ ВНИИ экспериментальной физики в Сарове был ответственным за конструкцию, интеграцию и значительную часть испытаний телескопа ART-XC.

За год сканирования неба команда телескопа ART-XC получила отличный результат — благода-

Телескоп АРТ-ХС имени Михаила Павлинского



Первый рентгеновский телескоп с оптикой косого падения, созданный в России



ИКИ РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров; Космический центр имени Маршалла, НАСА

**Рис. 7.** Телескоп косого падения ART-XC им. М.Н. Павлинского. Доктор физико-математических наук М.Н. Павлинский — ключевая фигура в создании первого в России рентгеновского телескопа с оптикой косого падения

ря первым двум сканам обнаружено около 800 жёстких рентгеновских источников [12] (рис. 9). Подобные результаты другие спутники, работающие в том же диапазоне энергий, демонстрировали лишь после нескольких лет работы в космосе (рис. 10). Сегодня, после двух лет успешного функционирования обсерватории “Спектр-РГ”, команда ART-XC полагает: в результате восьмикратного сканирования неба она сможет нанести на карту до 3000 источников, что станет рекордным результатом в диапазоне 4–12 кэВ.

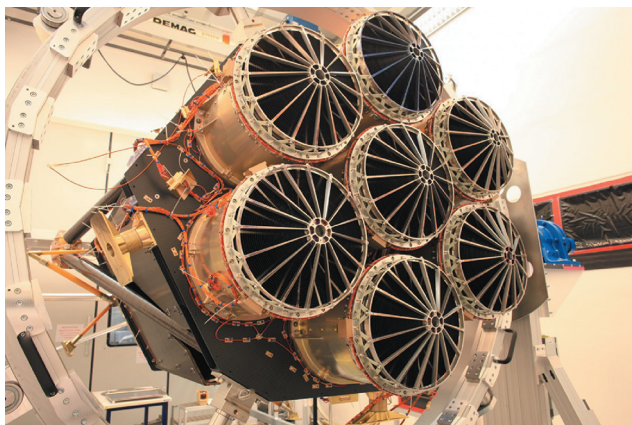
Телескоп ART-XC имеет отличное временное разрешение (23 мкс), что делает его очень эффективным прибором для наблюдений рентгеновских пульсаров. Отметим, что время считывания ПЗС-матриц eROSITA близко к 50 мс, то есть в 2 тыс. раз хуже. За два года работы на орбите ART-XC позволил открыть свыше десяти транзитных рентгеновских источников, вспыхнувших

на “рентгеновском небе”. Эти результаты опубликованы в лучших астрономических журналах мира.

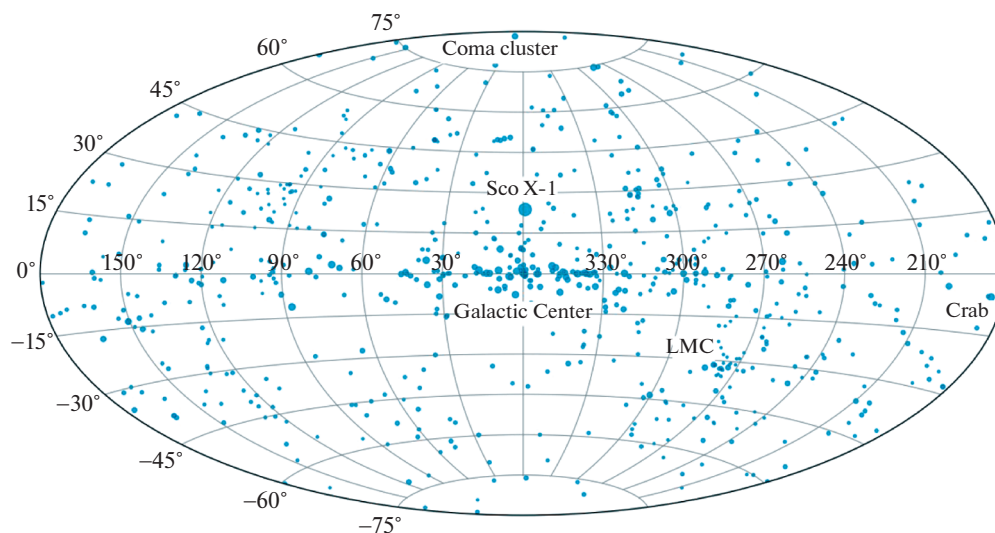
**Зачем потребовались восемь последовательных сканов всего неба в рентгеновских лучах?** Ещё до запуска научные комитеты орбитальной обсерватории “Спектр-РГ” договорились провести восемь последовательных сканов всего неба, отведя на их выполнение четыре года. Естественно, возникает вопрос, а для чего это нужно астрономам?

1. Если сложить результаты восьми сканов с учётом “чувствительности” карты, количество зафиксированных рентгеновских фотонов и нанесённых на карту рентгеновских источников существенно возрастёт. Появится намного больше деталей, удастся построить подробные спектры излучения для громадного числа точечных и протяжённых источников излучения.

Мы рассчитываем приблизиться к поставленной цели миссии: обнаружить около 100 тыс. массивных скоплений галактик, то есть практически все, присутствующие в доступной для наблюдений Вселенной. Подобные оценки числа массивных скоплений в пределах горизонта ст, где  $t$  — время, прошедшее с начала её расширения, дают результаты компьютерного моделирования роста крупномасштабной структуры Вселенной. Зная распределение этих скоплений галактик по красному смещению, мы надеемся детально исследовать рост первичных возмущений плотности в расширяющейся Вселенной, который зависит, в частности, от свойств тёмной энергии и тёмного вещества. Такое количество скоплений галактик позволит исследовать барионные акустические осцилляции в их пространственном распределении.

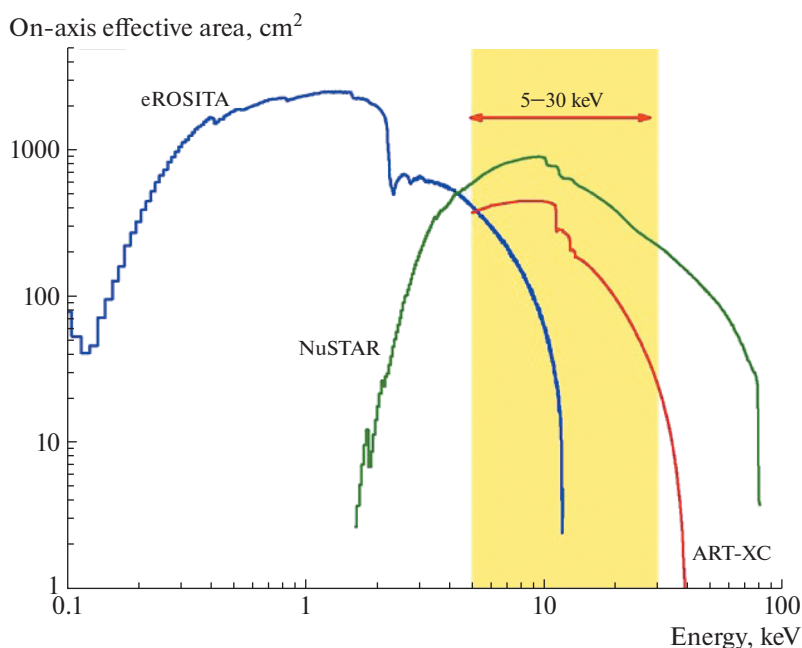


**Рис. 8.** Зеркала телескопа eROSITA



**Рис. 9.** Позиции (в галактических координатах) рентгеновских источников, зафиксированных ART-XC в полосе 4–12 кэВ в ходе первого сканирования неба [1, 12]

60% этих источников — галактические (чёрные дыры, нейтронные звёзды, белые карлики, коронально активные звёзды, остатки вспышек сверхновых и т.д.), а 40% — внегалактические (ядра галактик и несколько десятков массивных скоплений галактик). Уже открыто несколько десятков транзитных источников (это объекты, появляющиеся и исчезающие на рентгеновском небе)



**Рис. 10.** Эффективная площадь телескопов ( $\text{cm}^2$ ) eROSITA и ART-XC как функция энергии рентгеновских фотонов. Для сравнения приведена эффективная площадь американского телескопа с оптикой косого падения NuSTAR, созданного в Калифорнийском технологическом институте, Колумбийском университете и Лаборатории реактивного движения. ART-XC и NuSTAR чувствительны к более жёстким рентгеновским лучам, чем eROSITA. Преимуществом ART-XC по сравнению с NuSTAR является заметно большее поле зрения телескопа, что очень важно при сканировании неба

Не менее важную роль при исследовании космологических параметров Вселенной должен сыграть и каталог из примерно трёх миллионов

квазаров, которые команда eROSITA надеется открыть в ходе восьми сканов всего неба в рентгеновских лучах.

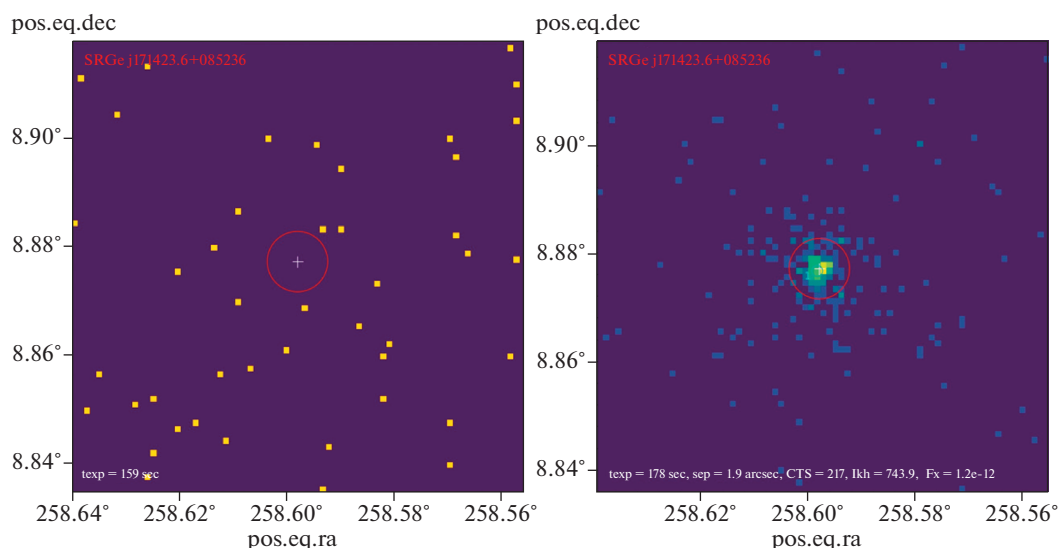


Рис. 11. Переменность внегалактических источников

2. Наличие ряда последовательных сканов неба позволяет исследовать переменность рентгеновских источников, следить за явлениями приливного разрушения звёзд вблизи чёрных дыр.

“Спектр-РГ” уже завершил три полных скана всего неба и около 60% четвёртого скана. В декабре 2021 г. планируется завершить и его, то есть будет выполнена половина намеченной программы. Команды учёных, работающих с данными телескопа eROSITA, надеются, что созданная в результате восьми сканов рентгеновская карта неба будет служить учёным всего мира как минимум два или три десятилетия, до тех пор, пока не будут созданы и запущены в космос ещё более чувствительные обзорные рентгеновские телескопы.

После завершения этой части программы обсерватория должна приступить к длительным (десятки и более килосекунд) наблюдениям наиболее интересных источников, открытых в ходе сканирования всего неба. Планируется также провести детальное сканирование избранных участков неба площадью от сотен до нескольких тысяч квадратных градусов в интересах космологии, внегалактической астрономии и астрофизики.

**Переменность рентгеновского неба.** Каждая полоска на небе (см. рис. 4) шириной в 1 градус дуги просматривается телескопами “Спектра-РГ” раз в полгода. Уже сравнение результатов первого и второго сканов всего неба продемонстрировало сильную переменность многих рентгеновских источников.

На рисунке 11 показан один из таких объектов, продемонстрировавших сильнейшую переменность за полгода. На изображении слева в пределах кружка диаметром 20 угловых секунд в первом

скане не было зарегистрировано ни одного рентгеновского фотона. Изображение справа демонстрирует, что в том же самом кружке в ходе второго скана зафиксировано более сотни фотонов, то есть спустя шесть месяцев появился яркий рентгеновский источник. Ясно, что источников, изменивших свою яркость в 5 или 3 раза, намного больше.

Обычно мы детектируем  $\sim 3\text{--}5$  объектов в день, которые изменили свой поток более чем в 10 раз за полгода, прошедшие с предыдущего скана (это звёзды, квазары, рентгеновские двойные в Млечном Пути). В среднем мы фиксируем одного потенциального кандидата в приливное разрушение звезды массивной чёрной дырой раз в 10 дней [13]. К их наблюдениям немедленно подключаются оптические телескопы в России, а также в США — пятиметровый Palomar под Сан-Диего, два десятиметровых в обсерватории Кекка на Гавайях и калифорнийский ZTF.

К настоящему времени с помощью телескопа eROSITA открыто более 40 явлений приливного разрушения звёзд сверхмассивными чёрными дырами в ядрах далёких галактик. На рисунке 12 показано, как нормальная звезда пролетает слишком близко от сверхмассивной чёрной дыры с массой в миллионы солнечных масс. В этой ситуации приливные силы способны разорвать звезду. Часть её вещества в виде газа улетает далеко от чёрной дыры, а другая захватывается гравитационным полем чёрной дыры, образует аккреционный диск вокруг неё и медленно (месяцы) продвигается к чёрной дыре и поглощается ею. Из-за колоссального выделения энергии в аккреционном диске центральная часть галактики, содержащей чёрную дыру, превращается в ярчай-

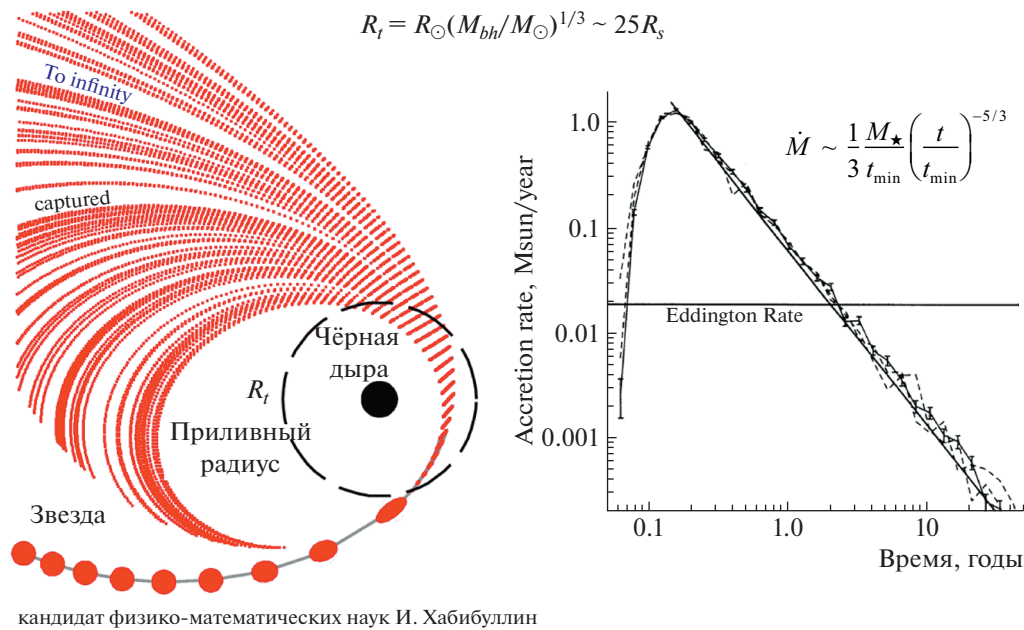


Рис. 12. Приливное разрушение звезды сверхмассивной чёрной дырой с массой в миллионы масс Солнца

ший источник рентгеновского излучения, который и фиксирует eROSITA. Команда “Спектра-РГ” немедленно сообщает точные координаты объекта оптическим астрономам, и в игру вступают российские оптические телескопы в Саянах, российско-турецкий РТТ-150 вблизи Анталы, телескоп МГУ, расположенный вблизи Кисловодска, либо шестиметровый телескоп на Кавказе (где в это время есть возможность прервать другие программы, зафиксировать следы оптической вспышки и измерить красное смещение галактики, в которой произошло приливное разрушение звезды (см. рис. 12).

Такие события происходят в галактике типа нашей чрезвычайно редко, раз в сотни тысяч лет, но галактик в окружающей нас Вселенной очень много. В результате eROSITA позволяет уверенно фиксировать такие события каждые две недели.

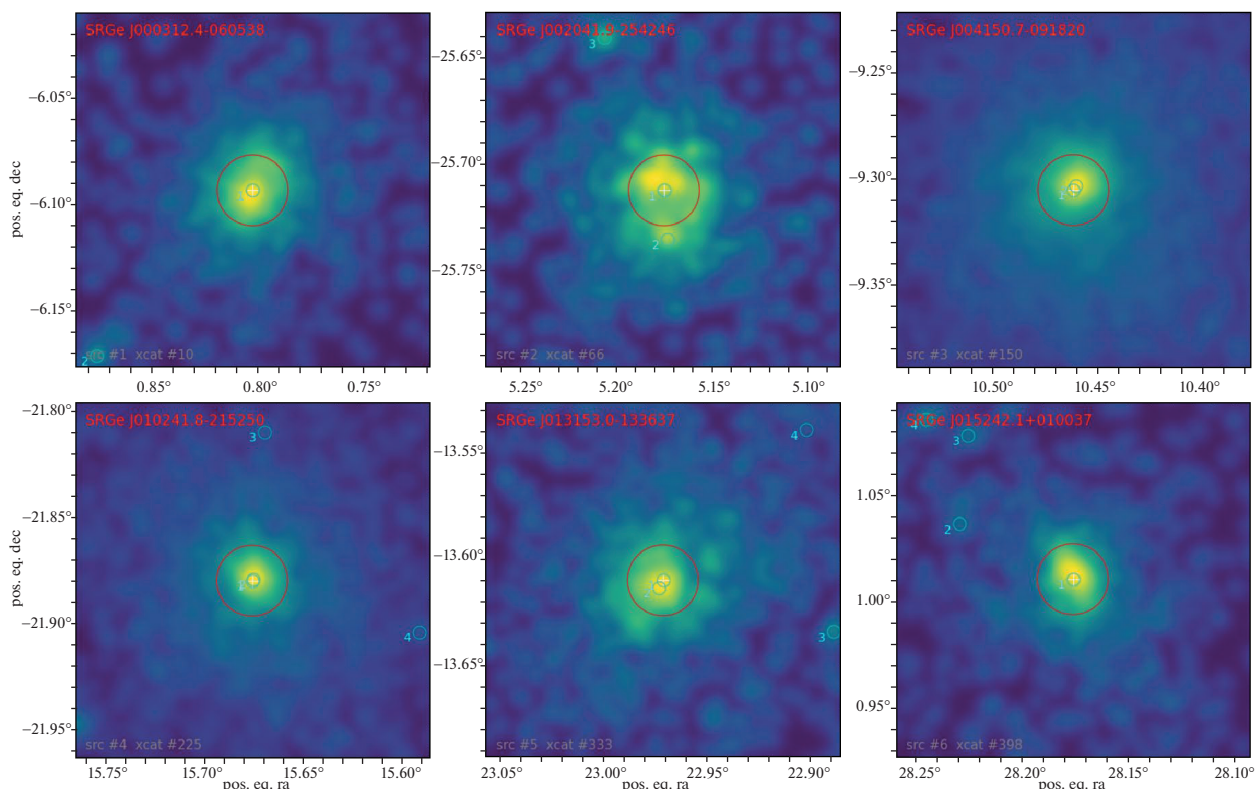
**Наблюдения скоплений галактик и других протяжённых источников рентгеновского излучения.** В качестве примера наблюдения протяжённого источника рентгеновского излучения с помощью телескопа eROSITA можно привести открытие остатка взрыва термоядерной сверхновой (термоядерного взрыва белого карлика с массой, превышающей критическую массу Чандрасекара<sup>2</sup>) в гало нашей галактики на расстоянии в 3 килопарсека от Солнца более чем в килопарсеке над

плоскостью галактики. Этот взрыв произошёл примерно 50 тыс. лет назад в области с очень низкой плотностью горячего газа. Тем не менее мы видим ударную волну, излучающую в основном в рентгеновских линиях гелиепоподобного и водородоподобного кислорода (ионы кислорода лишь с двумя или одним электроном). Угловой размер этого остатка сверхновой близок к четырём градусам дуги, он не виден ни в радио, ни в оптических, ни в гамма-лучах, а вот благодаря телескопу eROSITA его удалось обнаружить [14].

Одной из важнейших целей орбитальной обсерватории является поиск скоплений галактик, наиболее массивных гравитационно-связанных объектов во Вселенной, масса которых на 80% состоит из невидимого тёмного вещества. Звёзды в сотнях галактик, входящих в их скопления, вносят лишь несколько процентов в общую массу. Около 15% даёт горячий межгалактический газ, заполняющий потенциальную “яму”, созданную тёмным веществом. Именно излучение этого горячего газа с температурой в десятки миллионов градусов наблюдает “Спектр-РГ” в рентгеновских лучах. В настоящее время с использованием телескопа eROSITA открыто уже более 30 тыс. скоплений галактик на всём небе (рис. 13).

На рисунке 14 приведён результат длительного наблюдения скопления галактик Кома в созвездии Волосы Вероники телескопом eROSITA — видно богатейшее скопление с массой около  $10^{15}$  масс Солнца и близкая к нему группа галактик NGC 4839 с заметно меньшей массой [15]. Отметим, что в зоне размером  $6 \times 6$  кв. градусов на

<sup>2</sup> Критическая масса Чандрасекара — верхний предел массы, при котором звезда может существовать как белый карлик. Существование предела было доказано индийским астрофизиком Субраманияном Чандрасекаром (прим. ред.).

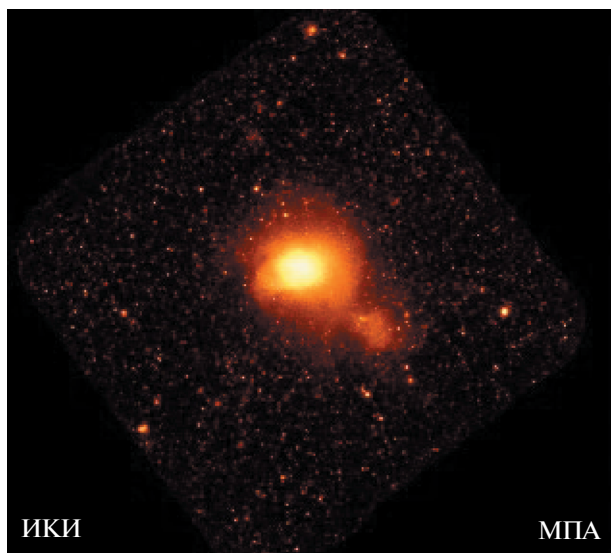


**Рис. 13.** Скопления галактик открытые телескопом eROSITA в ходе первых двух сканирований неба. Судя по полученным изображениям, это протяжённые объекты

этом изображении видны более полутора десятков скоплений, находящихся далеко, на космологических расстояниях за скоплением Кома. А на

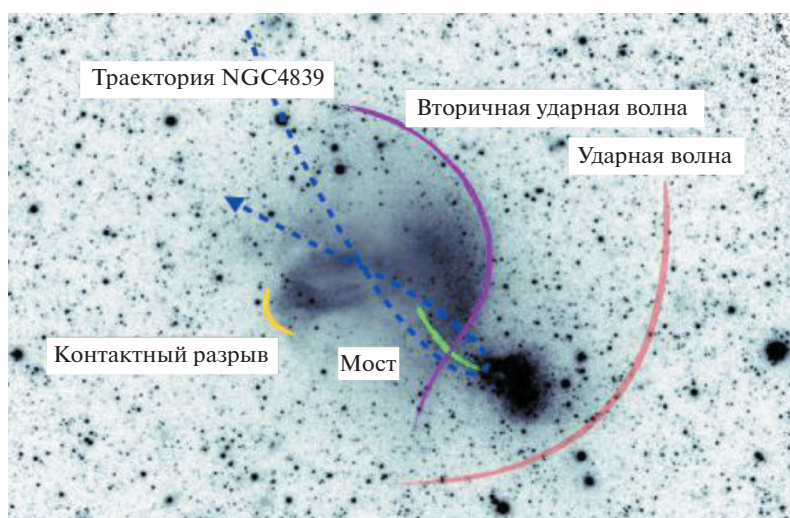
рисунке 15 яркость центрального источника в скоплении галактик Кома специально сильно притушена для того, чтобы стали видны детали изображения. В результате удалось выявить положение двух ударных волн и контактного разрыва, возникшего в ходе пролёта NGC 4839 через скопление галактик Кома (траектория пролёта показана штриховой кривой). Характерное время пролёта близко к миллиарду лет [16].

\* \* \*



**Рис. 14.** Результат длительного наблюдения скопления галактик Кома в созвездии Волосы Вероники телескопом eROSITA

Орбитальная обсерватория “Спектр-РГ” продолжает круглосуточную работу в космосе. За прошедшие два года построены замечательные карты всего неба с нанесёнными на них миллионами ранее неизвестных галактических и внегалактических рентгеновских источников различной природы. Учёные, уже получившие громадный объём данных с важнейшей информацией о крупномасштабной структуре Вселенной, её эволюции во времени, надеются исследовать дипольную анизотропию и барионные акустические осцилляции в распределении квазаров и скоплений галактик по небу, получить новые ограничения на массу нейтрино, а также продвинуться в понимании природы тёмной материи и



**Рис. 15.** Следы прохождения группы галактик через скопление галактик Кома  
Аэродинамика с характерным временем в 1 млрд лет [16]

тёмной энергии. Параллельно широким фронтом ведутся исследования переменности рентгеновских источников, дающие уникальную информацию о свойствах аккреционных дисков и физических процессах вблизи чёрных дыр с массами до миллиардов солнечных, нейтронных звёзд с магнитными полями от  $10^6$  до  $10^{14}$  Гс, об ускорении космических лучей. Все эти работы чрезвычайно важны для астрофизики высоких энергий и релятивистской астрофизики.

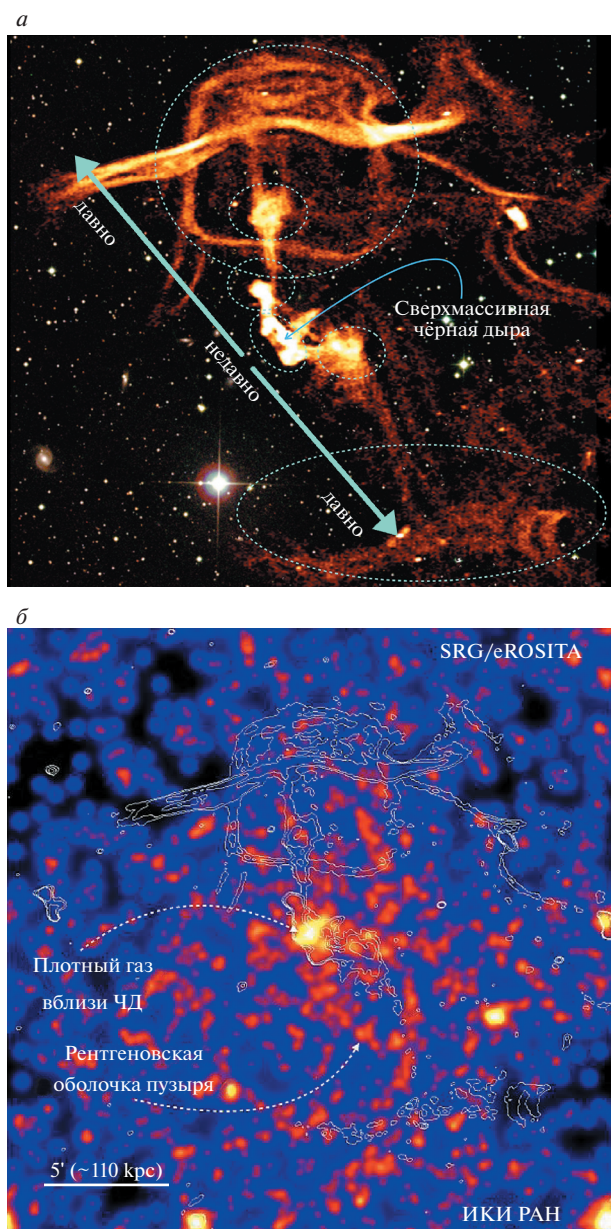
Серьёзную роль в успехе миссии играет её поддержка наземными российскими и зарубежными оптическими и радиотелескопами. Следует отметить отличную оперативную работу коллективов, обеспечивающих успешное функционирование обсерватории: крупнейшего в России шестиметрового телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН на Северном Кавказе, российско-турецкого полутораметрового телескопа на юге Турции, телескопа Иркутского научного центра РАН с диаметром зеркала 1.6 м в Саянах, нового телескопа вблизи Кисловодска (диаметр зеркала 2.5 м) Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ. Все они вовлечены в изучение наиболее интересных объектов, открываемых рентгеновскими телескопами “Спектра-РГ”.

Следует отметить, что для изучения самых далёких объектов привлекаются и крупнейшие в мире инструменты, такие как два десятиметровых телескопа Кекка на Гавайях, четыре восьмиметровых оптических телескопа VLT Европейской южной обсерватории в Чили, десятиметровый телескоп в Южной Африке. Параллельно со “Спектром-РГ” успешный поиск скоплений галактик в

миллиметровом диапазоне волн по SZ-эффекту<sup>3</sup> ведут исследователи с использованием американских десятиметрового телескопа на Южном полюсе Земли и шестиметрового Атакамского космологического телескопа, располагающегося на высоте 5 км в Чили. Сравнение рентгеновских данных и проявлений SZ-эффекта открывает немало возможностей при их детальном анализе из-за различных зависимостей потока в рентгене и “тени” в микроволновом диапазоне от плотности и температуры горячего газа в скоплениях и радикального отличия в зависимости от красного смещения, на котором находится скопление. Разумеется, между научными коллективами идёт серьёзное соревнование за приоритет в открытиях, но они сотрудничают при интерпретации данных наблюдений в столь разных диапазонах длин волн фотонов, как радио и рентген.

Успешное сотрудничество коллектива учёных, занятых обработкой данных с телескопа eROSITA, с коллегами, анализирующими данные с низкочастотного радиоинтерферометра LOFAR в Нидерландах, оказалось чрезвычайно полезным при исследовании свойств радиоизлучения группы галактик с горячим межгалактическим газом и сверхмассивной чёрной дырой в её центре (рис. 16). Наблюдения подтверждают, что группа галактик

<sup>3</sup> SZ-эффект — эффект Сюняева—Зельдовича (назван в честь Р.А. Сюняева и Я.Б. Зельдовича) — спектральное искажение реликтового излучения Вселенной за счёт томсоновского рассеяния фотонов на электронах горячего газа в скоплениях галактик. При этом низкоэнергетические реликтовые фотоны получают средний прирост энергии, и яркость реликтового излучения в миллиметровом диапазоне уменьшается в направлениях на скопления галактик с горячим газом (прим. ред.).



**Рис. 16.** Изображения группы галактик NEST200047 в радио- (а) и рентгеновском (б) диапазонах, полученные соответственно радиоинтерферометром LOFAR на частоте 144 МГц и телескопом SRG/eROSITA в диапазоне 0.5–2.3 кэВ

Размер сложных структур, видимых в радиодиапазоне, составляет более 1.5 млн световых лет. В центре группы расположена сверхмассивная чёрная дыра, окружённая атмосферой горячего газа, излучающего в рентгеновском диапазоне. Охлаждение газа приводит к аккреции вещества на чёрную дыру, которая, в свою очередь, надувает “пузыри” релятивистской плазмы, видимые в радиодиапазоне, и нагревает газ. В самом центре группы газ образует яркую полосу, перпендикулярную оттокам релятивистской плазмы, видимым в радиодиапазоне. На чуть больших масштабах пузыри релятивистской плазмы окружены газовыми оболочками

Изображения из статьи [17]

NEST200047 обладает горячей газовой атмосферой, излучающей рентгеновские лучи. В её центре находится гигантская эллиптическая галактика, ядро которой является ярким радиоисточником. Это типичные компоненты для группы галактик, в которой центральная чёрная дыра играет важную роль. Но NEST200047 оказалась совершенно особенной — радиоизлучение исходит не только от центра, но и от богатой и сложной системы волокон, покрывающих область протяжённостью более 200 килопарсеков. В ней видны структуры, напоминающие вихревые кольца. Они похожи на те, что были ранее обнаружены в знаменитой галактике M87, но в десять раз больше по своим размерам. Радио- и рентгеновские изображения демонстрируют, что плазма, выброшенная сверхмассивной чёрной дырой, была деформирована сложными движениями, длившимися более 100 млн лет, но за всё это время она не полностью перемешалась с окружающей тепловой плазмой, скорее всего, из-за присутствия динамически важного магнитного поля. Рентгеновские данные, полученные в ходе первых двух сканов неба телескопом eROSITA, продемонстрировали влияние “пузырей” в газе на структуру впечатляющего изображения в радиолучах, полученного LOFAR. Характерные длины волн этих телескопов различаются примерно в 5 млрд раз, и данные двух обсерваторий прекрасно дополняют друг друга.

Об этих исследованиях подробно рассказывается в статье, публикуемой в журнале “Nature Astronomy” [17], а всего за два года работы обсерватории “Спектр-РГ” опубликовано более 100 статей в ведущих астрофизических журналах мира и России<sup>4</sup>.

5 июля 2021 г., в первый день работы XVI Международной конференции имени Марселя Гроссмана, проходившей в Италии в режиме онлайн и собравшей более 1200 участников, Научно-производственному объединению им. С.А. Лавочкина, Институту внеземной физики Общества им. Макса Планка и Институту космических исследований РАН была вручена престижная международная награда в области релятивистской астрофизики. Премии имени Марселя Гроссмана, математика и соавтора Альберта Эйнштейна, эти организации удостоены “за создание лучшей в мире карты всего неба в рентгеновских лучах, за открытие миллионов неизвестных ранее сверхмассивных чёрных дыр на космологических расстояниях, за регистрацию рентгеновского излучения от десятков тысяч скоплений галактик, заполненных в основном тёмным веществом, и за возможность детального

<sup>4</sup> Данный доклад в значительной мере основан на материале статьи Р.А. Сюняева и др. “Орбитальная рентгеновская обсерватория СРГ, её телескопы и первые научные результаты”, принятой к печати в журнале “Astronomy & Astrophysics” [1].

исследования роста крупномасштабной структуры Вселенной в эпоху доминирования тёмной энергии”.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Команда учёных ИКИ РАН и ряда других институтов РАН, а также ведущих астрономических групп в российских университетах выражает признательность сотрудникам НПО им. С.А. Лавочкина и других предприятий ГК “Роскосмос” за создание замечательной обсерватории “Спектр-РГ”, вывод её на орбиту вокруг второй точки Лагранжа системы “Солнце–Земля”, управление космическим аппаратом на протяжении более двух лет и ежедневный приём научных данных крупнейшими антеннами Центров дальней космической связи. Мы благодарны также создателям уникальных рентгеновских телескопов с оптикой косого падения ART-XC (ИКИ РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, Центр космических полётов им. Дж. Маршалла НАСА) и eROSITA (ИВФ Общества им. Макса Планка при поддержке Германского аэрокосмического агентства).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Sunyaev R., Arefiev V., Babyshkin V. et al.* The SRG X-ray orbital observatory, its telescopes and first scientific results/ 2021arXiv210413267S // *Astronomy & Astrophysics*. April 2021. accepted for publication.
2. *Predehl P., Andritschke R., Arefiev V. et al.* The eROSITA X-ray telescope on SRG // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 647. id.A1. 16 pp. arXiv:2010.03477
3. *Pavlinsky M., Tkachenko A., Levin V. et al.* The ART-XC telescope on board the SRG observatory // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 650. id.A42. 18 pp. arXiv:2103.12479.
4. *Predehl P., Sunyaev R.A., Becker W. et al.* Detection of large-scale X-ray bubbles in the Milky Way hal // *Nature*. 2020. V. 588. Issue 7837. P. 227–231. arXiv:2012.05840
5. *Shakura N.I., Sunyaev R.A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astronomy and Astrophysics*. 1973. V. 24. P. 337–355.
6. *Khorunzhev G.A., Meshcheryakov A.V., Burenin R.A.* The First Distant X-ray Quasars ( $z \sim 4$ ) among the Sources Discovered by the eROSITA Telescope of the SRG Orbital Observatory during a Deep Lockman Hole Survey // *Astronomy Letters*. 2020. № 3. P. 149–155; *Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Буренин Р.А. и др.* Первые далекие рентгеновские квазары ( $z \sim 4$ ) среди источников, открытых телескопом eROSITA орбитальной обсерватории СРГ в ходе глубокого обзора области Дыры Локмана // *Письма в Астрономический журнал*. 2020. № 3. С. 155–162.
7. *Dodin A.V., Potanin S.A., Shatsky N.I. et al.* Optical Spectroscopy of SRG/eROSITA Objects with 2.5-m Telescope at the Caucasus Mountain Observatory of the SAI MSU // *Astronomy Letters*. 2020. № 7. P. 429–438; *Додин А.В., Потанин С.А., Шатский Н.И. и др.* Оптическая спектроскопия объектов СРГ/eROSITA на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ // *Письма в Астрономический журнал*. 2020. № 7. С. 459–469.
8. *Bikmaev I.F., Irtuganov E.N., Nikolaeva E.A. et al.* Spectroscopic Redshift Determination for a Sample of Distant Quasars Detected by the SRG Observatory Based on RTT-150 Observations // *Astronomy Letters*. 2020. № 10. P. 645–657; *Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А. и др.* Спектроскопическое определение красных смещений выборки далеких квазаров обсерватории СРГ по наблюдениям на РТТ-150 // *Письма в Астрономический журнал*. 2020. № 10. С. 689–701.
9. *Zaznobin I.A., Uskov G.S., Sazonov S.Yu. et al.* Optical Identification of Candidates for Active Galactic Nuclei Detected by the Mikhail Pavlinsky ART-XC Telescope Onboard the SRG Observatory during an All-Sky X-ray Survey // *Astronomy Letters*. 2021. № 2. P. 71–87; *Зазнобин И.А., Усков Г.С., Сазонов С.Ю. и др.* Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора неба // *Письма в астрономический журнал*. 2021. № 2. С. 89–106.
10. *Khorunzhev G.A., Meshcheryakov A.V., Medvedev P.S. et al.* Discovery of the Most X-ray Luminous Quasar SRGE J170245.3+130104 at Redshift  $z \approx 5.5$  // *Astronomy Letters*. 2021. № 3. P. 123–140; *Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Медведев П.С. и др.* Открытие самого мощного в рентгене квазара SRGE J170245.3+130104 на красном смещении  $z = 5.5$  // *Письма в Астрономический журнал*. 2021. № 3. С. 155–173.
11. *Medvedev P., Sazonov S., Gilfanov M. et al.* SRG/eROSITA uncovers the most X-ray luminous quasar at  $z > 6$  // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. V. 497. № 2. P. 1842–1850. arXiv:2007.04735
12. *Pavlinsky S., Sazonov R., Burenin P.A. et al.* SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first year // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. accepted for publication. arXiv:2107.05879
13. *Sazonov S., Gilfanov M., Medvedev P. et al.* First tidal disruption events discovered by SRG/eROSITA: X-ray/optical properties and X-ray luminosity function at  $z < 0.6$  // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. accepted for publication. arXiv:2108.02449
14. *Churazov E.M., Khabibullin I.I., Bykov A.M. et al.* SRG/eROSITA discovery of a large circular SNR candidate G116.6–26.1: SN Ia explosion probing the gas of the Milky Way halo? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. V. 507. № 1. P. 971–982. arXiv:2106.09454
15. *Burenin R.A., Bikmaev I.F., Gilfanov M.R. et al.* Observation of a very massive galaxy cluster at  $z = 0.76$  in SRG/eROSITA all-sky survey // *Astronomy Letters*. 2021. Accepted. arXiv:2108.09252; *Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р. и др.* Наблюдения скопления галактик очень большой массы на  $z = 0.76$  в обзоре всего неба СРГ/eROSITA // *Письма в Астрономический журнал*. 2021. № 7. С. 461–471.
16. *Churazov E., Khabibullin I., Lyskova N. et al.* Tempestuous life beyond R500: X-ray view on the Coma cluster with SRG/eROSITA. I. X-ray morphology, recent merger, and radio halo connection // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 651. id.A41.16 pp. arXiv:2012.11627
17. *Brienza M., Shimwell T.W., de Gasperin F. et al.* A snapshot of the oldest AGN feedback phases // *Nature Astronomy*. 2021. October, 18. arXiv:2110.09189

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

ЛУННАЯ ПЫЛЬ КАК ФАКТОР РИСКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЛУНЫ

© 2021 г. Л. М. Зелёный<sup>a,\*</sup>, А. В. Захаров<sup>a,\*\*</sup>,  
И. А. Кузнецов<sup>a,\*\*\*</sup>, А. В. Шеховцова<sup>a,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*E-mail: lzelenyi@iki.rssi.ru

\*\*E-mail: zakharov@iki.rssi.ru

\*\*\*E-mail: kia@iki.rssi.ru

\*\*\*\*E-mail: anastasi@itforb.ru

Поступила в редакцию 10.07.2021 г.

После доработки 16.07.2021 г.

Принята к публикации 25.07.2021 г.

В 2022 г. наша страна возвращается на Луну. Это непростая задача, связанная с различными трудностями и опасностями. Одной из них, пока наименее изученной и наиболее малопонятной, посвящена настоящая статья, подготовленная с использованием материалов доклада “Исследование Луны и планет с помощью автоматических космических аппаратов – прелюдия к освоению Луны человеком” (он был заслушан на научной сессии Общего собрания членов РАН 21 апреля 2021 г.). Поверхность Луны, как и большинства безатмосферных тел, покрыта слоем пыли – мелкой фракцией реголита, измельчённого за сотни миллионов лет пребывания на её поверхности планеты. Под воздействием внешних факторов – как естественных, так и антропогенных – частицы пыли могут подниматься с поверхности, левитировать под воздействием электростатических сил, осаждаться на космических аппаратах. Опыт шести американских пилотируемых экспедиций “Аполлон” показал, что микрочастицы лунной пыли воздействовали на служебные системы посадочных аппаратов, оседали на скафандры астронавтов, попадали в системы рециркуляции воздуха герметичных посадочных модулей и, как следствие, влияли на состояние здоровья астронавтов. Учитывая размеры таких частиц, а это могут быть десятки и сотни нанометров, становится понятным, что токсичность лунной пыли – одна из самых серьёзных проблем при исследовании Луны с участием человека. Такой вывод был сделан по завершении программы “Аполлон”. Авторами статьи обсуждается фактор лунной пыли при выполнении пилотируемых экспедиций на Луну, намечаются методы решения этой проблемы.

**Ключевые слова:** пылевые частицы, реголит, пылевая плазма, экзосфера луны, токсичность лунной пыли.

DOI: 10.31857/S0869587321110141

На научной сессии Общего собрания членов РАН, посвящённой 60-летию первого полёта человека в космос, много говорилось о космических планах России, в том числе и о новой лунной программе. Россия возвращается на Луну: после

запуска автоматического космического аппарата “Луна-25” последуют запуски “Луны-26”, “Луны-27”, “Луны-28”. Но в данной статье мы сосредоточим внимание не на аспектах этой программы, а на одном из наименее исследованных препятствий на пути освоения Луны человеком – лунной пыли.

ЗЕЛЁНЫЙ Лев Матвеевич – академик РАН, научный руководитель ИКИ РАН. ЗАХАРОВ Александр Валентинович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИКИ РАН. КУЗНЕЦОВ Илья Александрович – младший научный сотрудник ИКИ РАН. ШЕХОВЦОВА Анастасия Валерьевна – инженер ИКИ РАН, студентка Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Интересно, что эта тема обсуждалась ещё за несколько лет до полётов к Луне в повести замечательного английского фантаста Артура Кларка “Лунная пыль” [1]. По её сюжету космический корабль с туристами, как в болоте, тонет в пылевом океане, но в итоге его героически спасают.

Можно предположить, что именно с гипотетической лунной пылью связаны опасения проектантов первых советских лунных посадочных аппаратов: не нужно ли оснащать их подобием поплавков для плавучести в пылевых морях? Дискуссии по этому поводу прекратились благодаря Сергею Павловичу Королёву, взявшему на себя всю полноту ответственности за конструкторское решение. Судя по воспоминаниям очевидцев, Генеральный конструктор, взяв лист бумаги, написал на нём всего два слова — “Луна твёрдая”, расписался и отдал инженерам, проектировавшим посадочные аппараты. 3 февраля 1966 г. впервые в истории была осуществлена мягкая посадка космического аппарата на Луну. Советская автоматическая станция “Луна-9” прилунилась в Океане бурь и в течение трёх дней передавала на Землю телевизионные изображения окружающего ландшафта. К большому сожалению, Королёв не дожил всего трёх недель до этого знаменательного дня.

В 1969–1972 гг. к Луне были отправлены шесть американских экспедиций в рамках пилотируемой программы “Аполлон”. Казалось бы, уже тогда можно было понять особенности воздействия лунной пыли на технику и человека, тем не менее главные проблемы остались нерешёнными.

Учитывая перспективные планы отечественных пилотируемых полётов на Луну, попытаемся обсудить роль одного из негативных факторов, воздействующих на человека на её поверхности. Основные из них хорошо известны, в определённой степени уже исследованы, в том числе вакуум, радиационное облучение, пониженная гравитация, отсутствие магнитного поля, большие градиенты температур и ряд других. Однако довольно обширный опыт работы астронавтов на поверхности Луны по программе “Аполлон” показал, что ещё одной серьёзной опасностью, с которой они неожиданно столкнулись, оказалась лунная пыль. Степень её воздействия на человека, системы жизнеобеспечения и служебные системы посадочных аппаратов привела командира миссии “Аполлона-17” Юджина Сернана к выводу: “Я думаю, что пыль, вероятно, является одним из наших главных препятствий для нормальной работы на Луне. Я думаю, что мы можем преодолеть все остальные физиологические, физические или механические проблемы, кроме пыли” [2]. А участник той же экспедиции Харрисон Шмитт в отчёте написал: “Одним из наиболее надоедливых и препятствующих исследованию лунной поверхности аспектов является пыль: её липкость ко всему, независимо от материала, будь то кожа, костюм, металл, неважно, какой он, и эффект, похожий на трение, который ограничивает действие всего, на что она попадает” [3].

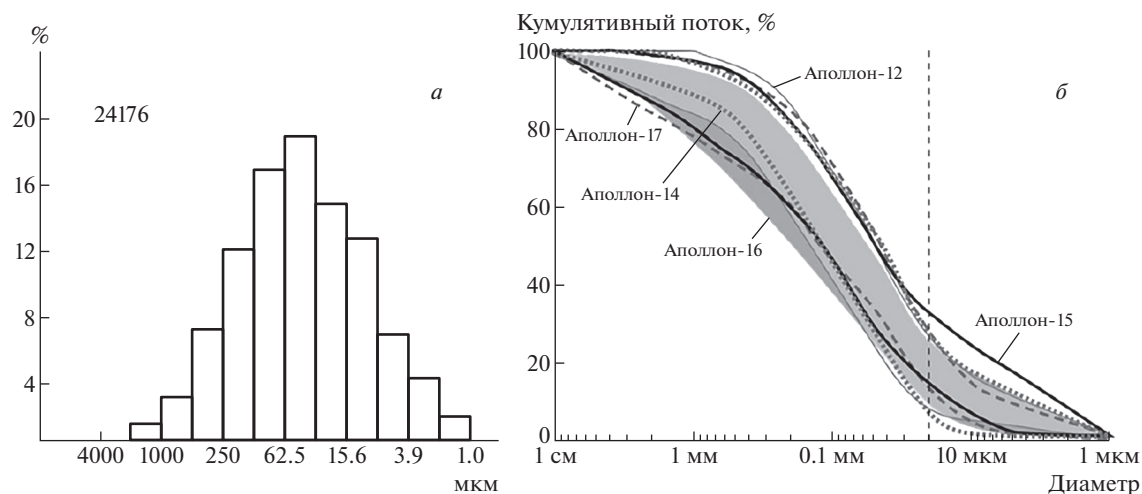
Впервые столкнулись с этой проблемой участники первых лунных экспедиций — “Аполлон-11”, “Аполлон-12”. При подготовке следующих миссий предпринимались попытки учесть приобретённый опыт, но большинство трудностей, связанных с влиянием лунной пыли, несмотря на внимание специалистов, так и остались непреодоленными [2]. В числе приоритетных направлений исследований в этой области были и остаются следующие: изучение лунной пыли, её динамики в приповерхностной лунной экзосфере; степень влияния на здоровье человека и инженерные системы космических аппаратов; развитие методов минимизации такого влияния.

Имеющиеся данные о лунной пыли основаны на анализе образцов реголита, доставленных на Землю американскими астронавтами в рамках программы “Аполлон” и автоматическими станциями “Луна-16”, “Луна-20” и “Луна-24”, на результатах эксперимента Lunar Ejecta and Meteorite (LEAM) [4], а также многочисленных лабораторных экспериментах, теоретических и численных исследованиях, выполненных за последние десятилетия [см. например, 5–11]. Обзор этих исследований содержится в работе [12]. Возможные методы минимизации влияния лунной пыли на человека и технические системы представлены в обзоре [13]. В нашей статье мы попытаемся проанализировать проблемы, связанные с токсичностью лунной пыли (термин “токсичность” используется в данном случае не только как свойство лунной пыли в биомедицинском применении, но и в более широком значении её негативного воздействия на деятельность астронавтов и инженерные системы посадочных аппаратов).

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУННОЙ ПЫЛИ

Реголит (поверхностный слой лунного грунта) сформировался в результате ударного метаморфизма, большая его часть представляет собой мелкие и неконсолидированные обломки подстилающих кристаллических горных пород, покрывающих всю лунную поверхность. Толщина слоя составляет обычно от 4 до 5 м в области лунных морей и от 10 до 15 м в гористых районах [14, 15]. Частицы размера менее 1 мм составляют более 95% массы реголита. Наиболее мелкий его компонент (менее 100 мкм) определяется как лунная пыль. Средний размер частиц варьирует от 40 до 100 мкм. Такие частицы составляют порядка половины веса лунного реголита, при этом большая его часть имеет размеры от 45 до 80 мкм [14, 16].

Данные о распределении микрочастиц по размерам имеют важное значение для исследований условий отрыва частиц от поверхности и их даль-



**Рис. 1.** Примеры распределения пылевых частиц по размерам для разных образцов, доставленных на Землю и полученных различными методами

*a* — гистограмма распределения по размерам частиц реголита для образца 24176, доставленного “Луной-24” (по оси ординат — процент массы исследуемых частиц, по оси абсцисс — размер гранул в мкм [18]); *б* — распределение частиц реголита по размерам (по данным исследований образцов реголита, доставленных на Землю экспедицией “Аполлон” [19])

нейшей динамики, токсикологических эффектов влияния пыли на функции дыхания человека, проектирования эффективных систем фильтрации воздушной среды обитания человека [17]. Примеры распределения размеров пылевых частиц представлены на рисунке 1 [18, 19].

Верхний слой реголита (несколько миллиметров) представляет собой чрезвычайно пористую (>80%) структуру [20]. С глубиной плотность его увеличивается, и инфракрасные измерения показывают, что характеристики верхних примерно 10 см реголита приблизительно одинаковые по всей поверхности Луны, за исключением недавно сформированных ударных кратеров [21]. Объёмная плотность реголита по данным “Луны-20” составляет около от  $1.04$  до  $1.80 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  для различных образцов [22, 23]. Образцы, полученные по программе “Аполлон”, указывают на различную плотность реголита, вплоть до  $1.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  [24, 25].

Форма пылевых частиц, как правило, крайне нерегулярная, с ярко выраженными заострёнными краями, что очень отличает их от земных аналогов. Плотность отдельных частиц составляет  $2.7\text{--}3.0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  [25]. Все пылевые частицы могут быть морфологически классифицированы на четыре типа: сферические, блоки неправильной формы с острыми углами, осколки (чешуйки) стекла, нерегулярные (пористые, “швейцарский сыр”), причём исследователями подчёркивается, что частицы нерегулярной формы, как правило, имеют заострённые углы [17]. Форма частиц в основном продолговатая, что приводит к преимущественному слипанию отдельных из них вдоль их продольных осей. Следствием такой особен-

ности тонкой фракции реголита становится анизотропия физических свойств [26]. На рисунке 2 представлен типичный образец агглютината — пористое стекло с вплавленными частицами породы и железа и частица с порами, образованными в результате выхода летучих компонентов при формировании в результате плавления [27].

Лунная порода обычно состоит из пироксена, плагиоклаза, ильменита, оливина с небольшим содержанием множества других минералов [28]. Химический анализ лунной пыли показывает, что с уменьшением размера частиц уменьшается доля чётко определённых минералов, но увеличивается доля стеклообразного материала. Общий химический состав лунной пыли изменяется по всей лунной поверхности, но составляет около 50%  $\text{SiO}_2$ , 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10%  $\text{CaO}$ , 10%  $\text{MgO}$ , 5%  $\text{TiO}_2$  и 5–15%  $\text{Fe}$  [29]. Ключевая особенность лунного реголита и лунной пыли состоит в присутствии большего, чем ожидалось, количества нанофазного металлического железа ( $\text{npFe}^0$ ). Именно по этой особенности легко отличить лунные породы от их земных аналогов. Появление нанофазного металлического железа — следствие постоянного воздействия солнечного ветра и высокоэнергичных частиц солнечного и космического происхождения [30]. Размеры частиц нанофазного железа в агглютинатах колеблются в широком диапазоне — от нескольких нанометров до нескольких сотен нанометров. Число нанофазных частиц в образце лунного грунта измеряется методом ферромагнитного резонанса и обозначается как  $I_s$ . Отношение нанофазного железа к общему содержанию железа  $\text{FeO}$ , то есть  $I_s/\text{FeO}$ ,

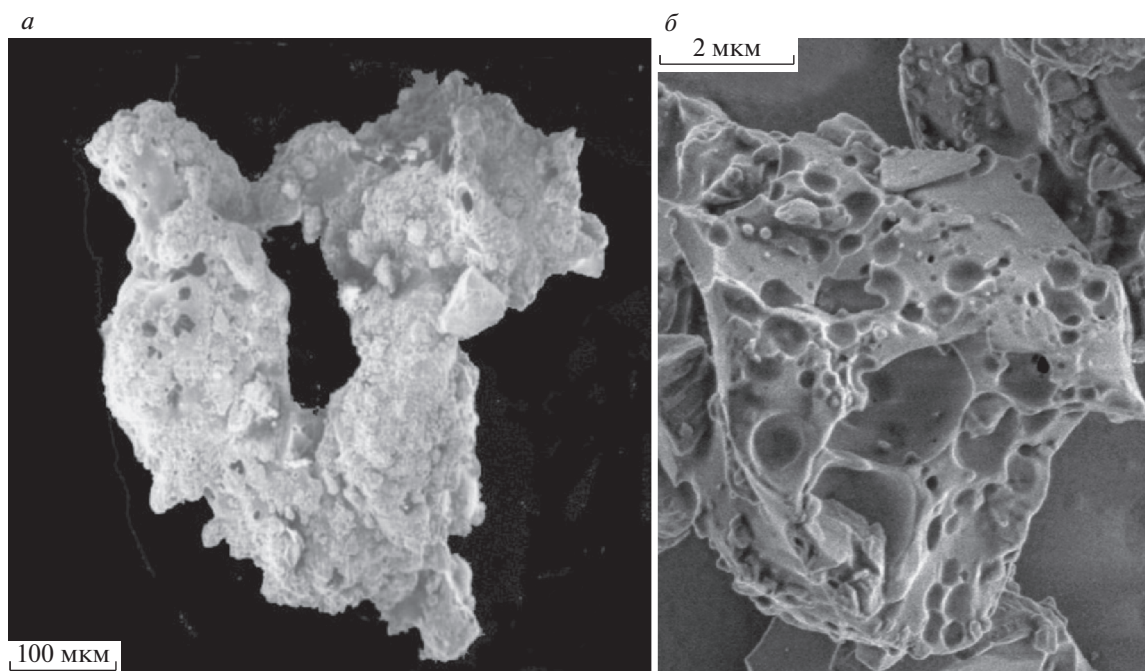


Рис. 2. Фотографии двух частиц лунного реголита

*a* — пористое стекло с вкраплениями частиц реголита и железа; *б* — частица с порами, образованными в результате выхода летучих компонентов при формировании в результате плавления [27]

служит индексом зрелости лунной почвы [31], он используется при оценке рисков для здоровья от воздействия лунной пыли: чем выше  $Is/FeO$ , тем выше риск [32]. Значение  $Is/FeO$  заметно увеличивается с уменьшением размеров пылевых частиц, что характерно для зрелых почв [32, 33].

Электрические свойства пылевых частиц и основной части силикатов лунного реголита характеризуются чрезвычайно низкой электрической проводимостью — порядка  $10^{-14}$  См/м (для реголита) и  $10^{-9}$  См/м (для лунной породы) при нулевой освещённости [25, 34]. С повышением температуры электропроводность реголита и породы возрастает и при солнечном ультрафиолете увеличивается приблизительно в  $10^6$  раз.

Относительная диэлектрическая проницаемость определяется плотностью реголита  $\rho$ , составляет приблизительно  $1.9\rho$ , где  $\rho$  в г/см<sup>3</sup> [25] и зависит от минералогического состава реголита. Чрезвычайно низкая электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость реголита указывают на то, что он слабо поглощает электромагнитную энергию и характеризуется достаточно эффективной фотоэмиссией.

В некоторых полярных областях Луны под её поверхностью регистрируется водород с концентрацией, соответствующей расчётному содержанию водяного льда от 0.5 до 4.0% по массе в зависимости от глубины. Эти данные были получены по результатам измерений потоков нейтронов от поверхности Луны российским прибором LEND

на борту американской автоматической станции “Lunar Reconnaissance Orbiter” [35].

#### ОПЫТ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ “АПОЛЛОН” (1969–1972)

Воздействие лунной пыли оказалось наиболее неожиданным и наиболее неприятным эффектом, с которым столкнулись американские астронавты. Это было отмечено в их отчётах и многочисленных научных публикациях, в которых обсуждалось влияние лунной пыли на системы и оборудование посадочных аппаратов, на условия пребывания и деятельность человека на поверхности Луны [2, 36–41].

Токсичность лунной пыли следует рассматривать не только как следствие природных эффектов подъёма и левитации пылевых частиц под воздействием внешних природных факторов на реголит, но и антропогенного воздействия на приповерхностную среду, что показал опыт выполнения программы “Аполлон” (ещё раз подчеркнём, что термин “токсичность” здесь используется не только в биомедицинском смысле, но и в более широком значении — он подразумевает также негативное воздействие лунной пыли на деятельность астронавтов и инженерные системы посадочных аппаратов).

**Антропогенные факторы.** Подъём пыли с поверхности происходит вследствие работы реактивных двигателей при посадке и взлёте посадоч-

ных аппаратов, действии механических систем, например бурильной установки, на поверхности Луны, активности астронавтов, передвижении их по поверхности [2]. Кроме того, посадочный аппарат и астронавт на лунной поверхности вызывают возмущение в системе естественно сформировавшихся электростатических полей, которым подчиняется динамика заряженных пылевых частиц, что также меняет картину [40]. Изменение естественной динамики частиц, левитирующих над поверхностью реголита, усиливает их влияние на системы посадочного аппарата, деятельность человека и его здоровье.

**Систематизация эффектов лунной пыли.** Обнаруженные при реализации программы “Аполлон” эффекты влияния лунной пыли были систематизированы по девяти категориям:

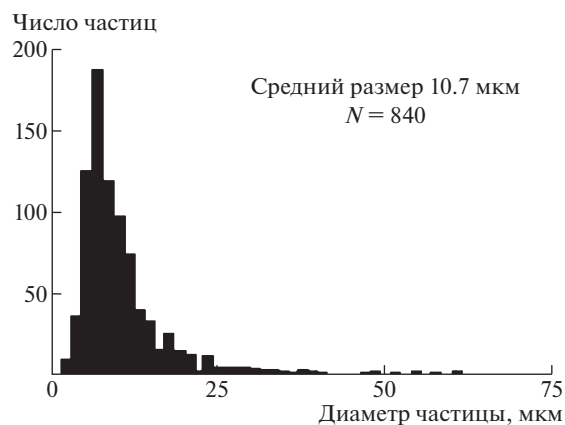
- ухудшение видимости при поднятии пыли,
- ложные показания приборов,
- осаждение пыли и загрязнение поверхностей,
- потеря сцепления с грунтом при движении по поверхности,
- заклинивание вращающихся узлов механизмов,
- активная эрозия поверхностей,
- проблемы с системой терморегулирования,
- нарушение уплотнений и герметичности систем,
- проблемы с дыханием и другие факторы, связанные со здоровьем человека [2].

*Влияние пыли на оптические поверхности* исследовалось на протяжении нескольких последних десятилетий. Такая длительность стала возможной благодаря тому, что на поверхности Луны были развернуты отражательные системы лазерной локации (лазерные отражатели имелись на “Луноходе-2” [42], при выполнении программы “Аполлон” астронавты развернули системы аналогичного назначения [38]). После взлёта посадочного аппарата с поверхности Луны и в первые несколько месяцев наблюдений сигнал от лазерных отражателей, установленных участниками экспедиции “Аполлон-14”, не испытывал существенной деградации. Однако спустя почти 40 лет работы отражателей он стал слабее в 10 раз [38]. Сигнал от лазерных отражателей “Лунохода-2” в начале их работы был на порядок выше, чем от отражателей “Аполлона-14”, но через 40 лет его величина оказалась на порядок ниже, чем от тех, которые были установлены астронавтами “Аполлона-14”. Такой эффект может быть связан с конструктивными особенностями уголкового отражателей и с осаждением пыли, понижающей отражательную способность. Кроме того, открытая оптика незащищена перед частицами, участвующими в микрометеоритной бомбардировке. Во

всяком случае анализ работы этих систем показал, что они достаточно успешно выполняли свои функции, однако на временном масштабе порядка десятилетия фиксировалась постепенная деградация оптики [38].

*Лунная пыль оказалась крайне абразивной.* Астронавты отмечали, что после работы вне посадочного модуля циферблаты приборов и солнцезащитные козырьки их шлемов были настолько исцарапаны, что не удавалось прочесть показания. После 8 часов работы, особенно при бурении грунта, на скафандрах и перчатках фиксировались значительные потёртости и, если бы возникла необходимость выполнить один или два дополнительных выхода из посадочного модуля, они могли бы потерять герметичность [2]. Например, проверенный на герметичность скафандр Пита Конрада, командира миссии “Аполлон-12”, уже после первого выхода из посадочного модуля начал терять давление со скоростью  $\sim 0.01$  атм/мин после первого, а после второго выхода  $\sim 0.017$  атм/мин. Так как безопасная утечка составляла 0.02 атм/мин, сомнительной оказалась бы безопасность третьего выхода, если бы он был запланирован. К тому же пыль, проникшая в подвижные узлы скафандра, в такой степени затруднила движения астронавта, что ещё один выход из посадочного модуля ему уже был не под силу. Застёжками-молниями на скафандрах после работы вне посадочного модуля было невозможно пользоваться. Из-за воздействия пыли герметичность всех запечатанных образцов лунной атмосферы, доставленных на Землю, была нарушена и они оказались бесполезными для анализа. Отмечалось, что при длительном пребывании на Луне для поддержания безопасных условий среды обитания следует уделять больше внимания способам обеспечения герметичности аппарата, скафандров, созданию пыленепроницаемых уплотнений.

*Осаждение пыли на поверхности.* В ходе лунных экспедиций было обнаружено, что пыль быстро покрывает все поверхности, с которыми контактирует, включая скафандры, обувь, ручной инструмент, оборудование и системы спускаемого аппарата. Очистка от неё потребовала от астронавтов дополнительных усилий, но они оказались неэффективными [2]. Следует, однако, отметить, что миссией “Аполлон-14” был поставлен эксперимент TDS (Thermal Degradation Sample) для изучения поглощающей и излучающей способности различных поверхностей при осаждении на них пыли. Две идентичные панели, содержавшие по 12 образцов поверхности с различными свойствами, астронавты покрыли пылью в лунной среде, а затем возвратили на Землю. Адгезия пыли к образцам оказалась ниже, чем ожидалось [43]. Вместе с тем по результатам обследования скафандров было выявлено значительное загрязнение их внешней поверхности —



**Рис. 3.** Распределение частиц пыли, собранных со скафандра астронавта после возвращения на Землю, по размерам [37]

$N$  — количество исследованных частиц

до  $2.5 \cdot 10^5$  частиц пыли на квадратный сантиметр [37]. Распределение частиц по размерам по результатам обследования скафандра представлено на рисунке 3.

*Заклинивание движущихся узлов.* Осаждение пыли приводило к таким неприятным эффектам, как заклинивание движущихся узлов. Такие сообщения от астронавтов поступали в ходе каждой экспедиции посещения поверхности Луны.

*Проблемы с системами терморегулирования.* Серьёзные проблемы вызывал слой пыли на поверхности радиатора системы терморегулирования. Попытки удалить эту пыль в лунных условиях эффекта не дали, что противоречило результатам наземных испытаний и эксперимента TDS. Из-за слоя пыли рабочая температура некоторых систем аппаратов “Аполлон-16” и “Аполлон-17” превысила ожидаемую на  $20^\circ\text{C}$ , в связи с чем ухудшились характеристики отдельных приборов. Именно из-за этого факта Джон Янг, командир экспедиции “Аполлон-16”, заметил, что “пыль — проблема номер один при возвращении на Луну” [2].

*Влияние на здоровье человека.* Опыт программы “Аполлон” показал, что самый неприятный фактор лунной пыли — её влияние на здоровье человека, прежде всего при попадании на кожу, в глаза, при её вдыхании. Экипажи сообщали, что лунная пыль характеризуется резким запахом, напоминающим порох, что, видимо, является следствием присутствия летучих веществ на поверхности пылевых частиц. Пыль проникала сквозь одежду, сняв её, астронавты обнаруживали, что покрыты пылью. Попад в лунный модуль, в условиях отсутствия гравитации во время полёта к Земле пыль распространялась по объёму космического аппарата. Экипаж дышал этим загрязнённым воздухом, пыль раздражала глаза [2].

Имевшиеся на борту средства очистки от пыли не справлялись с задачей. При подготовке более поздних миссий “Аполлон” это свойство лунной пыли было учтено, приняты меры, несколько уменьшившие её влияние. Тем не менее токсичность микронных и субмикронных частиц, обнаруженных на скафандрах, указывает на необходимость постоянного контроля концентрации частиц внутри посадочного модуля, а в будущем — в долгосрочной среде обитания [37].

При рассмотрении влияния пыли на человеческий организм исследователями отмечается, что её микрочастицы, особенно размера менее 100 нм, могут нанести вред в первую очередь лёгким, сердечно-сосудистой системе, зрению, повредить кожный покров [37]. Если принять в расчёт абразивность субмикронных частиц пыли (их размеры могут быть на порядки меньше размера клеток), становится очевидным вероятный вред такой пыли при попадании в организм человека.

Опыт реализации программы “Аполлон” показал, что при её подготовке серьёзность проблемы влияния пыли недооценивалась [2]. Был сделан вывод, что динамика пыли, связанная с деятельностью человека на поверхности, оказалась значительна и может быть на порядки выше, чем динамика пылевых частиц в результате естественных природных процессов [36].

Свойство лунной пыли проникать сквозь уплотнения герметичных систем и прилипать к различным поверхностям можно рассматривать с точки зрения динамических свойств левитирующих над поверхностью субмикронных и микронных частиц этой пыли. При взаимодействии с поверхностью они проявляют себя не просто как “ударники”. Левитируя, микрочастицы могут быстро вращаться, при этом скорость их собственного вращения на освещённой стороне Луны может составлять от нескольких тысяч до миллионов оборотов в секунду [44]. Учитывая ударное происхождение таких частиц, необходимо иметь в виду, что их формы крайне нерегулярны и часто заострены [45]. Подобные быстро вращающиеся частицы могут обладать большой поражающей силой (что напоминает восточные метательные звёздочки “сюрикэн”). Видимо, именно эта особенность лунной пыли в сочетании с электростатическим зарядом объясняет её удивительную способность агрессивно воздействовать на поверхности чувствительных систем приборов и посадочных аппаратов, проникать сквозь герметические уплотнители.

#### ПРОГРАММА ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ЛУННОЙ ПЫЛЬЮ

Опыт выполнения и анализ результатов программы “Аполлон” показал, что новый этап осво-

ения Луны с участием человека потребует дополнительных исследований с целью более глубокого понимания плазменно-пылевых процессов в её приповерхностной экзосфере, детального изучения характеристик реголита, свойств пылевых частиц с учётом их размерности. Это знание чрезвычайно важно для выработки рекомендаций по снижению влияния лунной пыли на инженерные системы и человека.

Исследования физических процессов, связанных с динамикой лунной пыли, предполагается проводить по меньшей мере в трёх направлениях. Первое из них — изучение динамики лунной пыли *in situ* с помощью приборов, установленных на лунных посадочных аппаратах. Второе направление — лабораторные исследования. Третье — теоретические исследования и численное моделирование. Получаемые результаты необходимо использовать при разработке методов минимизации воздействия лунной пыли. Предложения по каждому из упомянутых направлений исследований изложены ниже.

*Исследования динамики лунной пыли in situ.* К настоящему времени сформирована программа исследований Луны, вошедшая в Федеральную космическую программу на ближайшие годы и предусматривающая посадочные и орбитальные экспедиции с использованием автоматических аппаратов [46]. Предполагается, что каждый из них будет иметь на своём борту научный прибор для изучения динамики пыли и приповерхностной плазменно-пылевой экзосферы. Заметим, что планируемые исследования плазменно-пылевых процессов у поверхности Луны станут первыми после единственного пылевого эксперимента, проведённого экипажем экспедиции “Аполлон-17” в 1972 г.

Комплекс научной аппаратуры посадочного аппарата “Луна-25” включает прибор пылевого мониторинга Луны (ПмЛ). Он способен регистрировать левитирующие у посадочного аппарата пылевые частицы, определять их основные характеристики (скорость, заряд, механический импульс, массу регистрируемой частицы), а также основные параметры плазменного окружения (плотность плазмы, температуру, потенциал) и приповерхностного электрического поля [47].

На посадочном аппарате “Луна-27” предполагается установить усовершенствованную версию ПмЛ — прибор для исследований динамики пыли (ПмЛ-ЛР). Его основные чувствительные элементы будут установлены на выносной штанге, которая позволит уменьшить влияние посадочного аппарата на показания датчиков, разместить их ближе к поверхности.

В ходе исследований пылевой составляющей космической плазмы на орбитах Луны в 2013–2014 гг. обнаружено, что на высотах от несколь-

ких километров до 250 км, где проводились измерения, существует пылевое облако, характеристики которого зависят от местного времени, высоты [48]. Было сделано заключение, что облако состоит из вторичных частиц, образовавшихся в результате бомбардировки поверхности Луны микрометеоритами, а также, возможно, пылевых частиц, возникших в результате воздействия на реголит УФ-излучения Солнца и солнечного ветра. Следствие этих воздействий — электростатическая левитация пылевых частиц (хотя прямых доказательств левитации частиц на таких высотах пока не получено). Данные исследования были проведены прибором Lunar Dust Experiment (LDEX), установленным на борту орбитального аппарата НАСА “Lunar Atmosphere and Dust Experiment Explorer” (LADEE) [48]. На орбитальном аппарате “Луна-26” предлагается установить прибор для исследований такого пылевого облака, что позволит более детально представить распространение пылевых частиц на орбитах Луны.

Приборы для изучения плазменно-пылевых процессов у поверхности Луны планируется установить на следующих автоматических аппаратах, оснащённых луноходом и возможностью доставки образцов реголита на Землю. Такие исследования предусмотрены Федеральной космической программой.

*Лабораторные исследования и моделирование плазменно-пылевых процессов.* Помимо наблюдения динамики пыли у поверхности Луны *in situ* планируется выполнить программу лабораторного моделирования плазменно-пылевых процессов в условиях, близких к лунным. Для этого важно решить две ключевые задачи: создать лабораторную установку, имитирующую условия, близкие к естественным в приповерхностной области Луны, и создать аналоги реголита по своим параметрам близкие к тем, которые характеризуют лунную пыль.

Основой лабораторной установки должна стать вакуумная камера, оснащённая инжектором пылевых частиц и средствами их активации (эксимерные лампы УФ-излучения, источники заряженных частиц, лазерное излучение). Кроме того, для регистрации и диагностики физических процессов в вакуумной камере необходима высокоскоростная стереоскопическая оптическая система. Средствами лабораторного моделирования могут быть воспроизведены и изучены условия, свойственные лунной среде. Они, в частности, включают межпланетную плазму в условиях различного уровня солнечной активности, пересечение Луной удалённого структурированного геомагнитного хвоста, зону лунного терминатора, при котором кардинально меняются условия взаимодействия межпланетной плазмы и УФ-излучения Солнца с реголитом, особенности

**Таблица 1.** Характеристики аналогов лунного реголита

Категория	Характеристики аналога
Основной	Соответствует усреднённым характеристикам реголита. Может неточно воспроизводить химические, минералогические или физико-механические свойства
Стандартный	Измельчённый анортозит (для лунных материков) или базальт (для лунных морей) с дополнительными компонентами или без них, измельчённый до гранулометрического состава, подобного лунному
Улучшенный	Материал, соответствующий “стандартному”, с добавлением синтетических агглютинатов (не только стекла)
Специфический	Включает аналоги пыли и аналоги, которые воспроизводят такие свойства, как летучие вещества, нанофазное железо и т.д.

ночной стороны Луны и плазменных процессов на освещённой стороне Луны с учётом рельефа.

*Аналоги лунного грунта.* В числе важных составляющих лабораторного моделирования — использование аналогов реголита, характеристики которых соответствуют специфическим параметрам лунной пыли. Чтобы аналог соответствовал моделируемому грунту, необходимо задать условия, при соблюдении которых его можно считать аналогичным. Среди таких условий наиболее часто рассматриваются аналоги по химическому, минералогическому, гранулометрическому составу, по специфическим особенностям пылевых частиц, например, их крайне нерегулярной форме, учёту содержания на поверхности пылинок нанофазного железа и других аспектов.

В составе преобладающей массы частиц реголита присутствуют плагиоклазы, пироксены, вулканическое стекло, пирокластические отложения. Они формируются в процессе спекания незатвердевших частиц, образующихся при высокоскоростном импактном воздействии микрометеоритов на реголит, а также вследствие их вторичного разогревания и переплавления [14]. Как уже упоминалось, частицы лунной пыли характеризуются присутствием нанофазного железа. Другой важный параметр, который необходимо учесть при создании аналога реголита, — размеры частиц и их соответствие гранулометрическому распределению в естественных образцах. Необходимо иметь в виду и специфические формы пылевых частиц, сформиро-

ванных в результате высокоскоростных ударных процессов. На их острых сколах, заострённых краях в естественных условиях может появляться избыточный электростатический заряд, придающий частицам специфические свойства. Приближение к таким свойствам достигается в мельницах, где частицы разрушаются по слабым связям исходного материала. Существующие количественные методы оценки формы пылевых частиц основаны на использовании двух параметров: соотношение сторон (aspect ratio, AR) и коэффициента Neuwood (NF). Каждый из этих параметров может иметь значения от 0 до 1. Чем округлее частица, тем ближе значения обоих параметров к 1 (идеальный круг). AR характеризует удлинение частицы и определяется как отношение минимального ортогонального диаметра к максимальному. NF описывает сложность формы частицы путём сравнения периметра частицы с периметром круга с той же площадью поверхности [49].

Имеющиеся аналоги лунного реголита для лунных морей и материков, разработанные в основном в США и Китае, подразделяются на четыре категории: основной, стандартный, улучшенный и специфический. Их характеристики представлены в таблице 1.

Созданию аналогов лунного реголита и его составляющей — лунной пыли — в настоящее время уделяется большое внимание. Архив существующих аналогов лунного реголита Planetary Simulant Database [50] по состоянию на 31.03.2021 включает 43 зарегистрированных наименования аналогов, созданных в США, Китае, странах Евросоюза, Японии, Канаде, Германии, Великобритании, Корее, Австралии. Из них только три аналога предназначены для целенаправленного изучения пыли: “OPRFLCROSS1 Lunar Ice Simulant” компании “Off Planet Research” (США), “Beijing Highlands Lunar Dust (BHLD20)” и “China Lunar Dust Simulant CLDS” (КНР) — два последних использовались при подготовке миссии “Chang’e-5”. Недавно был представлен вариант аналога лунного реголита, созданного в нашей стране [51].

*Теоретические исследования и численное моделирование.* Это направление в последние десятилетия было основным при изучении динамики лунной пыли. Однако до сих пор остаются без ответа несколько ключевых вопросов: объяснение приобретения заряда поверхностью Луны, достаточного для отрыва частиц от поверхности; учёт адгезивных сил Ван дер Вальса, удерживающих пылевые частицы на поверхности; выяснение особенностей распределения плазмы и динамики пылевых частиц на границах света и тени в области лунного терминатора; объяснение специфических особенностей рельефа Луны (например, присутствие кратеров, крупных камней).

*Методы минимизации воздействия лунной пыли.*

Со времени обнаружения негативного влияния лунной пыли на инженерные системы посадочных аппаратов и человека начали разрабатываться методы уменьшения такого влияния. Динамика пыли рассматривалась как результат природных процессов, а также антропогенных процессов, связанных с деятельностью человека. Естественные физические процессы, приводящие к перемещению пыли, включают, как уже упоминалось, выбивание с поверхности Луны пылевых частиц в результате высокоскоростных ударов микрометеоритов, а также электростатическую левитацию пылевых частиц над поверхностью Луны в результате воздействия на реголит потока межпланетной плазмы и УФ-излучения Солнца. Что касается антропогенных процессов, то они сводятся к динамике пыли, вызванной посадкой космических аппаратов и их взлётом, движением роверов и астронавтов, работами, связанными с бурением, сбором образцов реголита, строительством и другими факторами, подразумевающими взаимодействие с реголитом [13].

Методы уменьшения влияния лунной пыли на инженерные системы посадочных аппаратов и человека сводятся к трём [13, 52]. *Системный подход* подразумевает проектирование посадочных средств, формирование программы деятельности человека на поверхности с учётом пылевого фактора. *Пассивные технологии* включают различные способы модификации поверхности и использования простых инструментов. *Активные технологии* подразумевают создание вблизи защищаемых поверхностей специальных систем, которые создают электростатические поля, способные отклонять подлетающие к ним заряженные пылевые частицы, либо сбрасывать уже осевшие на поверхность частицы. Такие системы защиты обычно требуют энергопотребления [32].

Разработка методов минимизации влияния пылевых частиц на инженерные системы и человека требует детальных лабораторных исследований с использованием аналогов лунной пыли и образцов материалов и поверхностей, используемых при проектировании посадочных аппаратов и верхней одежды космонавтов.

\* \* \*

В настоящее время как в России, так и в других странах, по-видимому, не существует крупномасштабных установок, имитирующих весь спектр возможных плазменно-пылевых процессов, характерных для приповерхностной экосферы Луны. Однако в нашей стране (как и в ряде других стран) уже созданы и действуют небольшие лабораторные установки на основе вакуумных камер с системами активации микрочастиц и видеорегистрации их динамики. Они действуют, в частно-

сти, в Институте космических исследований РАН, Объединённом институте высоких температур РАН, Институте прикладной физики РАН. Здесь могут выполняться научные исследования по решению части указанных выше проблем и есть специалисты, знакомые с такими проблемами. Однако, по нашему мнению, целенаправленные исследования должны выполняться в соответствии со специализированной научно-технической программой. Она может быть подготовлена совместно головными научно-исследовательскими организациями госкорпорации «Роскосмос» и Российской академии наук.

Реализация программы потребует модернизации и развития существующего лабораторного вакуумного оборудования, оснащения установок современными системами активации пылевых частиц и средствами регистрации физических параметров. Важным направлением лабораторных исследований должно стать создание аналогов лунного реголита. Комплексные исследования влияния микрочастиц лунной пыли (или её аналогов) на системы, оборудование и приборы пилотируемых посадочных аппаратов будут способствовать успешному проведению исследований Луны и минимизации токсичного влияния лунной пыли на человека.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кларк А. Лунная пыль. М.: Знание, 1965.
2. Gaier J.R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions // NASA/TM-2005-213610. 2005.
3. Winterhalter D. et al. Lunar Dust and Its Impact on Human Exploration: A NASA Engineering and Safety Center (NESC) Workshop // NASA/TM-2020-5008219/NESC-RP-19-01469. 2020.
4. Berg O.E., Wolf H., Rhee J. Lunar soil movement registered by the Apollo 17 cosmic dust experiment // Interplanetary Dust and Zodiacal Light, Proceedings of IAU Colloq. 31. 1976. P. 233–237. [https://doi.org/10.1007/3-540-07615-8\\_486](https://doi.org/10.1007/3-540-07615-8_486)
5. Nitter T., Havnes O., Melandso F. Levitation and dynamics of charged dust in the photoelectron sheath above surfaces in space // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103 (A4). P. 6605–6620. <https://doi.org/10.1029/97JA03523>
6. Sickafoose A.A., Colwell J.E., Horanyi M., Robertson S. Experimental levitation of dust grains in a plasma sheath // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107 (A11). P. 1408. <https://doi.org/10.1029/2002JA009347>
7. Poppe A., Horanyi M. Simulations of the photoelectron sheath and dust levitation on the lunar surface // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115 (A08106). P. 1–9. <https://doi.org/10.1029/2010JA015286>

8. Wang X., Horanyi M., Robertson S. Experiments on dust transport in plasma to investigate the origin of the lunar horizon glow // *Journal of Geophysical Research*. 2009. V. 114 (A05103). <https://doi.org/10.1029/2008JA013983>
9. Mishra S.K., Bhardwaj A. Photoelectron Sheath on Lunar Sunlit Regolith and Dust Levitation // *The Astrophysical Journal*. 2019. V. 884:5. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3e08>
10. Popel S.I., Zelenyi L.M. Dusty plasmas over the Moon // *Journal of Plasma Physics*. 2014. V. 80 (6). P. 885–893. <https://doi.org/10.1017/S0022377814000828>
11. Popel S.I., Zelenyi L.M., Golub' A.P., Dubinskii A.Yu. Lunar dust and dusty plasmas: Recent development, advances, and unsolved problems // *Planetary and Space Science*. 2018. V. 156. P. 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.02.010>
12. Захаров А.В., Зелёный Л.М., Попель С.И. Лунная пыль: Свойства, потенциальная опасность // *Астрономический вестник*. 2020. № 6. С. 483–507.
13. Afshar-Mohajer N. et al. Review of dust transport and mitigation technologies in Lunar and Martian atmospheres // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. P. 1222–1241.
14. McKay D.S. et al. The Lunar Regolith // *The Lunar Sourcebook* / Eds. Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge University Press, 1991. P. 285–356.
15. Fa W., Liu T., Xie M., Du J. Regolith thickness over the Apollo landing sites from morphology of small fresh impact craters // 50th Lunar and Planetary Science Conference (LPI Contrib. No. 2132). 2019. № 1765.
16. Carrier W.D. III Lunar regolith grain size distribution // *Moon*. 1973. V. 6. P. 250–263.
17. Park J.S., Liu Y., Kihm K.D., Taylor L.A. Micro-morphology and toxicological effect of lunar dust // *The 37th Lunar and Planetary Science Conference*. 2006. XXXVII. № 2193.
18. Родэ О.Д., Иванов А.В. Распределение частиц по размерам образцов реголита “Луны-24” // *Астрономический вестник*. 1984. № 18. С. 1–3.
19. Liu Y., Taylor L.A. Characterization of lunar dust and a synopsis of available lunar stimulants // *Planetary and Space Sciences*. 2011. V. 59. P. 1769–1783. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.11.007>
20. Hapke B., Sato H. The porosity of the upper lunar regolith // *Icarus*. 2016. V. 273. P. 75–83. ISSN 0019-1035. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.10.031>
21. Hayne P.O. et al. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2017. V. 122. P. 2371–2400. <https://doi.org/10.1002/2017JE005387>
22. Leonovich A.K. et al. Physical and mechanical properties of Lunar soil sample in nitrogen medium: research results, in *Lunnyi grunt iz Morya Izobiliya (Lunar Soil from Mare Fecunditatis)* / Ed. Vinogradov A.P. Moscow: Nauka, 1974. P. 563–570.
23. Slyuta E.N. Physical and mechanical properties of the Lunar soil (a review) // *Solar System Research*. 2014. V. 48. P. 330–353. <https://doi.org/10.1134/S0038094614050050>
24. Papike J.J., Simon S.B., Laul J.C. The Lunar Regolith' Chemistry, Mineralogy, and Petrology // *Rev. of Geophys and Space Physics*. 1982. V. 20 (4). P. 761–826.
25. Carrier W.D. III, Olhoeft G.R., Mendell W. Physical properties of Lunar surface // *The Lunar Sourcebook* / Eds Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.
26. Mahmood A., Mitchell J.K., Carrier W.D. III. Grain orientation in lunar soil // *Proceedings of the 5th Lunar Science Conference*. 1974. P. 2347–2354.
27. Liu Y., Park J., Schnare D., Hill E., Taylor L.A. Characterization of Lunar Dust for Toxicological Studies. II: Texture and Shape Characteristics // *Journal of Aerospace Engineering*. 2008. V. 21. № 4. P. 272–279.
28. Agrell S.O. et al. Observation of the chemistry, mineralogy and petrology of some Apollo 11 Lunar samples // *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference*. 1970. V. 1. P. 93–128.
29. Loftus D.J., Rask J.C., McCrossin C.G., Tranfield E.M. The Chemical Reactivity of Lunar Dust: From Toxicity to Astrobiology // *Earth, Moon and Planets*. 2010. V. 107. P. 95–105. <https://doi.org/10.1007/s11038-010-9376-x>
30. Keller L.P., McKay D.S. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith // *Science*. 1993. V. 261. P. 1305–1307.
31. Morris R.V. The surface exposure of lunar soils; some concepts of Is-FeO compilation // *Proc Lunar Planet Sci Conf 9th*. 1978. P. 2287–2297.
32. Cain J.R. Lunar dust: The Hazard and astronaut exposure risks // *Earth Moon and Planets*. 2010. V. 107. P. 107–125.
33. Taylor L.A. Deleterious effects of dust for Lunar base activities: A possible remedy // *New views of the Moon workshop*. 2000. Lunar Planetary Institute. Abstract.
34. Vanoman D. et al. The Lunar environment // *Lunar Sourcebook* / Ed. Heiken, G.H., Vanoman D.T., French B.M. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 27–60.
35. Mitrofanov I.G. et al. Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // *Science*. 2010. V. 330. P. 483–486.
36. Katzan C.M., Edwards J.L. Lunar dust transport and potential interactions with power system components // *NASA Contractor Report 4404*. 1991.
37. Christoffersen R. et al. Lunar dust effects on spacesuits systems insights from the Apollo spacesuits // *NASA/TR-2009-214786*. 2009.
38. Murphy T.W. et al. Long-term degradation of optical devices on the Moon // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.02.015>
39. Linnarsson D. et al. Toxicity of Lunar dust // *Planetary and Space Science*. 2012. V. 74 (1). P. 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.023>
40. Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M., Collier M.R. Prediction of dust concentration in the Lunar exosphere // *J. Astronautics*. 2007. V. 28. P. 166–167.
41. Calle C.I., Buhler C.R., McFall J.L., Snyder S.J. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during Lunar exploration missions // *J. of Electrostatics*. 2009. V. 67. P. 89–92.

42. *Severny A.B., Terez E.I., Zvereva A.M.* The measurements of sky brightness on Lunokhod-2 // *Moon*. 1975. V. 14. P. 123–128.
43. *Gaier J.R.* Interpretation of the Apollo 14 Thermal Degradation Sample Experiment // *Icarus*. 2012. V. 221. I. 1. P. 167–173.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.07.002>
44. *Rosenfeld E.V., Korolev A.V., Zakharov A.V.* Lunar nanodust: Is it a borderland between powder and gas? // *Adv. Space Res.* 2016. V. 58. P. 560–563.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.022>
45. *Park J.S., Liu Y., Kihm K.D. et al.* Submicron particle size distribution of Apollo 11 lunar dust // *Earth and Space*. 2006. ASCE 2006b.
46. *Zelenyi L.M.* Milestones of the Russian Space Science Program for the Decade 2016–2025 // *The Seventh Moscow Solar System Symposium (7MS3)*. 2016. Abstracts.
47. *Кузнецов И.А. и др.* Лунная пыль: свойства и методы исследований // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2016. № 4 (34). С. 20–32.
48. *Horányi M., Szalay J., Kempf S. et al.* A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon // *Nature*. 2015. V. 522. P. 324–326.  
<https://doi.org/10.1038/nature14479>
49. *Just G.H., Joy K.H., Roy M.J., Smith K.I.* Geotechnical characterisation of two new low-fidelity lunar regolith analogues (UoM-B and UoM-W) for use in large-scale engineering experiments // *Acta Astronautica*. 2020. V. 173. P. 414–424.
50. Planetary Simulant Database From the Colorado School of Mines. <https://simulantdb.com/index.php>
51. *Slyta E.N., Grisharina E.A., Makovchuk V.Yu., Agapkin I.A.* Lunar soil-analogue VI-75 for large-scale experiments // *Acta Astronautica* 2021. V. 87. P. 447–457.
52. *Kleiman J.* Protection of Materials and Structures from Space Environment // *Springer*. 2017.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ, СВЯЗЬ И НАВИГАЦИЯ:  
ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2021 г. Н. А. Тестоедов<sup>a,\*</sup>, С. Н. Карутин<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> АО “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнёва”, Железногорск, Россия

<sup>b</sup> АО “Институт навигационных технологий”, Москва, Россия

\*E-mail: testodov@iss-reshetnev.ru

\*\*E-mail: karutin-sn@inav.ru

Поступила в редакцию 20.07.2021 г.

После доработки 26.07.2021 г.

Принята к публикации 01.08.2021 г.

В статье представлена история создания в СССР и Российской Федерации автоматических космических аппаратов (АКА) различного назначения от начала космической эры до 60-летия первого орбитального полёта Ю.А. Гагарина, рассматриваются их сегодняшние возможности и перспективы развития в будущем, в том числе космических информационных АКА и аппаратов системы ГЛОНАСС. Значительное внимание в статье уделяется состоянию космической геодезии, совершенствованию её инструментария. Авторы знакомят читателя с новыми проектами и разработками, которые учёные и конструкторы АО “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнёва” предполагают реализовать совместно с коллективами институтов РАН и российских университетов. Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на научной сессии Общего собрания членов РАН 21 апреля 2021 г.

**Ключевые слова:** космос, космические аппараты, орбита, разработка, искусственный спутник Земли, связь, навигация, геодезия.

DOI: 10.31857/S086958732111013X

*Человечество вышло в космос для того, чтобы изучить его, искать возможности для службы его землянам. Космическая связь, навигация, геодезия, метеорология — это то, что сегодня служит человечеству и без чего уже нельзя достойно жить.*

*Академик М.Ф. Решетнёв*

## РОЖДЁННЫЕ В СИБИРИ



ТЕСТОЕДОВ Николай Алексеевич — член-корреспондент РАН, генеральный директор АО “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнёва”. КАРУТИН Сергей Николаевич — генеральный директор АО “Институт навигационных технологий”, генеральный конструктор системы ГЛОНАСС.

Космическая эра началась 4 октября 1957 г. запуском СССР первого в мире автоматического космического аппарата (АКА) — искусственного спутника Земли (“ПС-1” — “Простейший спутник-1”), что стало выдающимся вкладом нашей страны в сокровищницу мировой науки и техники.

4 июня 1959 г., то есть спустя менее двух лет после этого знаменательного события, вышел приказ Государственного комитета Совета министров СССР по оборонной технике СССР об образовании восточного филиала ОКБ-1 С.П. Королёва в Красноярске-26 (ныне г. Железногорск Красноярского края). Его возглавил заместитель и ученик Королёва, тогда 35-летний кандидат технических наук Михаил Фёдорович Решетнёв [1].

Первое изделие ОКБ-10 (с 1966 г. — КБ Прикладной механики, с 2008 г. АО “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнёва”), созданное молодым коллективом, — ракета-носитель лёгкого класса “Космос”. Она предназначалась для выведения автоматических космических аппаратов весом до 500 кг на средние эллиптические и круговые орбиты высотой до 1500–2000 км. 18 августа 1964 г. эта ракета-носитель доставила на орбиту первые три АКА, как и сама она, разработанные в ОКБ-10 [2, 3].

После успешного создания ракеты “Космос” сибирскому предприятию была передана спутниковая тематика. В середине 1960-х годов в ОКБ-10 освоили выпуск самых мощных на то время АКА типа “Молния”, предназначенных для создания первой в мире системы связи и телевидения на высоких эллиптических орбитах (первые КА “Молния” разрабатывались в ОКБ-1 и Московском НИИ радиосвязи). Работы по созданию экспериментальных космических систем связи “Стрела”, начатые в 1961 г. в ОКБ-586 (ныне ГКБ “Южное” им. М.К. Янгеля), уже в следующем году были переданы в ОКБ-10 и успешно там продолжены.

За прошедшие шесть десятилетий специалистами компании “ИСС” изготовлено и выведено в космос более 1280 аппаратов различного назначения, на основе которых сформировано свыше 40 многоспутниковых систем и комплексов на всех орбитах. Сегодня две трети орбитальной группировки России разработаны в конструкторском бюро и изготовлены в производственных цехах сибирского предприятия. Это, в частности, космические информационные системы, КА и системы связи, навигации, геодезии, а также научно-экспериментальные автоматические космические аппараты.

Начиная с 1960-х годов учёными и специалистами предприятия в сотрудничестве с коллективами институтов Академии наук и университетов страны созданы четыре поколения низкоорбитальных спутниковых систем (“Стрела-1”, “Стрела-1М”, “Стрела-3” и “Гонец”), отличающихся более высокой пропускной способностью передачи информации и функциональными возможностями. Эти космические группировки постоянно развиваются, совершенствуются, они успешны. Но наиболее передового научно-технического уровня удалось достичь при создании геостационарных космических аппаратов и аппаратов, запускаемых на высокие эллиптические орбиты.

Анализируя путь развития АКА, можно констатировать, что на условном первом этапе (1967) в первую очередь были рассчитаны и освоены орбиты для высокого эллипса — они оказались лучшими, наиболее устойчивыми, используются до

сих пор. Тогда же были отработаны основные типы космических аппаратов и их подсистемы — полезные нагрузки, системы электропитания, терморегулирования, ориентации, коррекции и другие.

На втором этапе и этапе втором плюс (1985–2010) была разработана и внедрена технология удержания орбитальной позиции космического аппарата. В результате геостационарный спутник перестал для наземного наблюдателя описывать некую восьмёрку относительно экватора с размахом в 10°, что позволило существенно упростить конструкцию наземных станций, резко сократить их стоимость. На космических аппаратах этого этапа впервые были установлены бортовые электронно-вычислительные машины (словосочетание “бортовой компьютер” тогда ещё не использовалось), обеспечившие высокоточное наведение антенных лучей бортовых ретрансляторов на обслуживаемые в космосе объекты.

Сегодняшний третий этап (2011) характеризуется переходом к аппаратам негерметичного исполнения, широким применением в конструкции АКА композиционных материалов, созданием и использованием электронной компонентной базы (ЭКБ), стойкой к прямому воздействию факторов космического пространства, использованием активной и пассивной систем терморегулирования размерностью от микросхемы до аппарата в целом и, конечно же, применением высокоэффективных солнечных батарей на базе трёхкаскадного арсенида галлия с КПД до 30%. Как следствие, резко выросли тактико-технические характеристики АКА: срок активного существования вырос в 15 раз (до 15 лет); мощность полезной нагрузки увеличилась в 40 раз, до 13–14 кВт, а её удельный вес в 2.5 раза. В итоге теперь треть состава аппарата — это целевая нагрузка, а не обеспечивающие системы (рис. 1).

Ещё большее влияние на объёмы информации, пропускаемые через спутник, оказали следующие факторы: освоение более высоких и информативных диапазонов частот, новые методы кодирования информации и, соответственно, её уплотнения, а самое главное — переход с аналоговых информационных технологий на цифровые. Мультипликативный эффект всех этих новшеств позволил увеличить объём пропускаемой через спутник информации на три порядка и более. Таким образом, эффективность автоматических космических аппаратов повысилась более чем в 1000 раз, а части из них — в 10 тысяч раз по сравнению с теми, которые запускались 40 лет назад. В качестве примера использования результатов фундаментальных и прикладных научных исследований в космической отрасли упомянем высокоэффективные фотопреобразователи на базе ге-

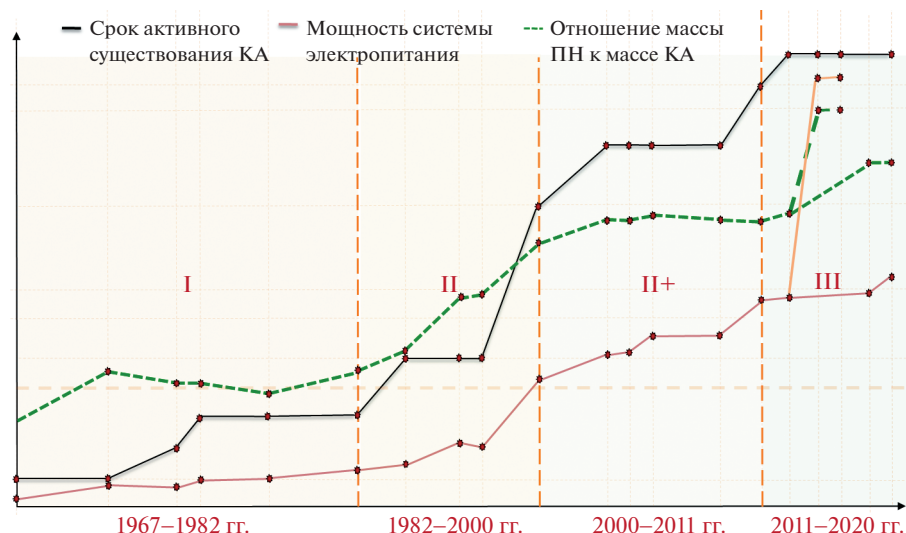


Рис. 1. Динамика развития автоматических космических аппаратов связи

тероструктур, разработанные под руководством академика РАН Ж.И. Алфёрова, а также элементы комплекса системы обеспечения необходимой рабочей температуры на приборах, созданные в Красноярском научном центре СО РАН под руководством академика РАН В.Ф. Шабанова.

Заметим, что доля композиционных материалов в конструкции современных космических аппаратов достигает 80%. Примерами эффективно-го применения композитных материалов являются созданные ЗАО “Центральный научно-исследовательский институт судового машиностроения” под научным руководством академика В.В. Васильева конструкционные элементы негерметичных КА серии “Эспресс-1000/2000”: анизотридные силовые конструкции (центральная труба, конический адаптер переходной системы, конический адаптер антенного блока); анизотридные размеростабильные спицы и штанги крупногабаритных трансформируемых рефлекторов антенных систем; металлокомпозитные баки высокого давления для хранения ксенона.

Но нельзя не упомянуть и факторы, тормозящие темпы развития спутниковых систем. Мы, спутникостроители, обновляющие АКА каждые 5 лет, крайне заинтересованы в повышении мощности ракет, но не можем повлиять на темпы обновления их парка, а они невысоки по объективным причинам: на создание нового образца этой космической техники уходит 25 лет и более. Ракетчики же, в свою очередь, привязаны к космодромам, стартовым столам, включая в том числе и зарубежный ныне “Байконур”.

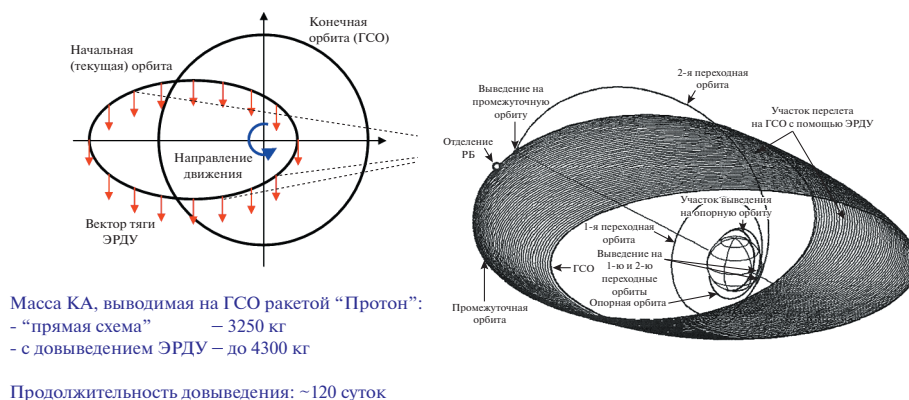
В последние годы проблема нехватки мощности ракет успешно решена коллективом учёных и специалистов АО “ИСС” при участии сотрудников НИИ прикладной механики и электродина-

мики МАИ под руководством академика РАН Г.А. Попова. Ими разработана и реализована технология довыведения космических аппаратов в необходимую орбитальную позицию с помощью электрореактивных двигателей самого космического аппарата (рис. 2). Как результат, ракета “Протон-М” с разгонным блоком “Бриз-М”, стартовав с космодрома “Байконур”, может вывести непосредственно на геостационарную орбиту спутник массой не более 3250 кг, а с довыведением в течение четырёх месяцев — 4300 кг, то есть на 32% больше. Помимо огромной экономической выгоды, а работа одного транспондера весом 10 кг стоит примерно 1 млн долл. в год, мы, спутникостроители, ощутили существенную независимость от мощности ракет, а разработчики ракет — от космодрома запуска, что немаловажно, имея в виду национальную безопасность Российской Федерации.

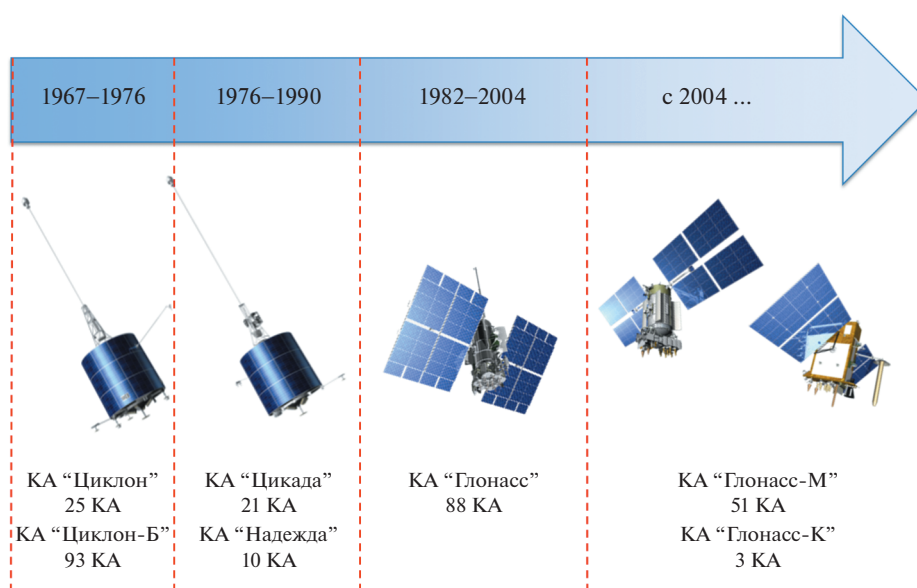
Крупным отечественным научно-техническим достижением стало создание системы ГЛОНАСС. Навигационные системы начали разрабатываться в Железногорске более 50 лет назад как навигационно-связные на базе низколетящих АКА типа “Циклон” (в общей сложности было запущено более 160 таких спутников) [4]. В системе использовался метод навигационных определений с помощью эффекта Доплера, по мере её развития определение местоположения морских судов обеспечивалось с точностью от 600 до 30 м.

При повышении требований потребителей к точности места определения и постоянной доступности была разработана многоспутниковая навигационная система второго поколения с использованием дальномерных методов навигационных определений. Сегодня 24 космических аппарата (по 8 АКА в трёх плоскостях), летящих на

### Комбинированная схема выведения космического аппарата с ЭРДУ на геостационарную орбиту



**Рис. 2.** Комбинированная схема выведения космического аппарата с электрореактивной двигательной установкой на геостационарную орбиту



**Рис. 3.** Этапы создания и развития навигационных автоматических космических аппаратов

высоте 20 тыс. км над Землёй, обеспечивают постоянную доступность навигации в любой точке планеты с точностью навигационного сигнала до 1 м (с вероятностью 1 сигма), но это без учёта ионосферных и тропосферных поправок (рис. 3) [5, 6].

Развитие системы ГЛОНАСС предусмотрено федеральной программой "Космическая деятельность России до 2030 года". При этом в составе существующей орбитальной группировки произойдёт смена поколения аппаратов на "ГЛОНАСС-K2", а число аппаратов увеличится до 30 за счёт введения дополнительной высокоэллиптической группировки, как это реализуется в китайской системе "Бейдоу". Внедрение до десяти

новых навигационных сигналов будет способствовать повышению помехозащищённости, а внедрение межспутниковых радио- и оптических линий — дальнейшему повышению точности навигационного сигнала [7].

Система навигационных определений по радиотехническим сигналам проста и удобна, неслучайно в мире число глобальных навигационных систем возросло до четырёх — ГЛОНАСС, GPS, Галилео и Бейдоу. Но такая система может быть заглушена или преднамеренно искажена как из космоса, так и локально с Земли. Кроме того, ряд потребителей не имеет прямого доступа к радиотехническому сигналу, например, находящиеся под водой или под земной поверхностью.

Поэтому наряду с радиотехническими навигационными системами разрабатываются их альтернативы на других физических принципах: это инерциальные навигационные системы и системы на основе изменений магнитного и гравитационного поля Земли. С учётом современного развития техники самые перспективные из них — на основе измерений гравитационного поля Земли. Недостаток инерциальной системы состоит в том, что она требует сверки через достаточно короткие временные промежутки, а системы, основанной на измерении магнитного поля Земли, — в его искажении металлическими конструкциями, например конструкциями корабля.

В 2014 г. предприятия космической отрасли столкнулись с проблемой импортозамещения элементной компонентной базы (ЭКБ). Под руководством госкорпорации “Роскосмос” был проанализирован состав ЭКБ импортного производства, поэтапно осуществляется её замена на отечественную с использованием результатов опытно-конструкторских работ, организуемых Минпромторгом России. За десятилетие (2015—2025) доля ЭКБ отечественного производства в аппаратах “ГЛОНАСС” вырастет до 100%.

### ВОЗМОЖНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

Как и в навигации, АО “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнёва” является единственным в России разработчиком космических геодезических систем, имеющих несомненные преимущества в силу глобальности, оперативности и независимости. Задачи космической геодезии совпадают с задачами геодезии в целом, но первая даёт возможность получать решения в более сжатые сроки и с большей точностью, чем с использованием традиционных методов. Кроме того, существует ряд задач, решение которых вообще невозможно без использования искусственных спутников Земли или требует столько времени и средств, что делает их практически невыполнимыми.

Первая (она же основная) задача космической геодезии — определение фундаментальных постоянных, характеризующих форму и размеры Земли, а также изменений этих фундаментальных постоянных во времени. Вторая, тесно связанная с первой, задача — создание геоцентрических (планетоцентрических) систем координат. Её решение сводится к построению сетей опорных точек в единой для Земли системе координат, имеющей начало в центре масс, а направления осей определённым образом зафиксированы для различных временных этапов. Решение этих двух задач невозможно, если неизвестно внешнее гравитационное поле Земли. Определение параметров, ха-

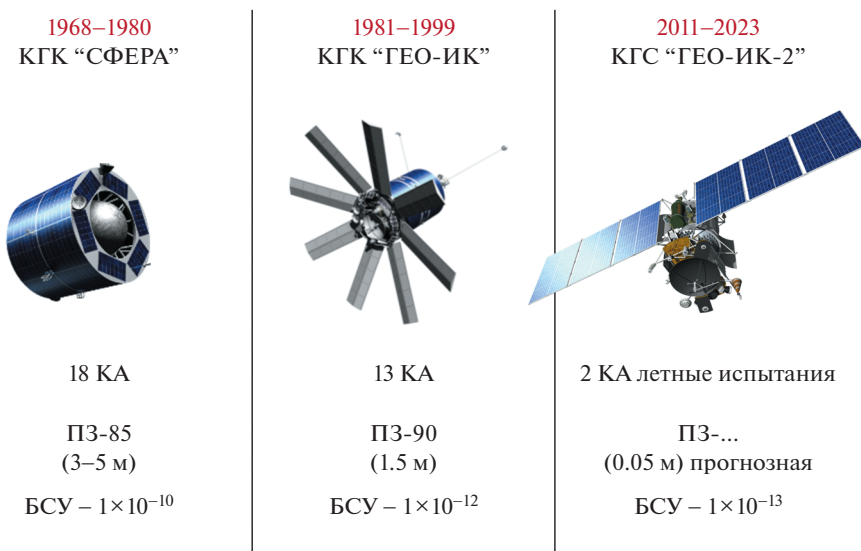
рактеризующих гравитационное поле, также проводится методами космической геодезии.

Космическая геодезия позволяет решать и прикладные задачи. К их числу относятся прежде всего координатно-временная привязка результатов космических съёмок Земли, выполняемых в интересах исследования природных ресурсов и космического картографирования. Важны и данные, полученные методами космической геодезии — они используются для решения задач геофизики и геодинамики.

Повышение точности космических геодезических измерений позволит получить количественные данные об эволюции фигуры и гравитационного поля Земли во времени и тем самым установить характер и особенности движения материков, закономерности протекания тектонических процессов, прогнозировать поиск полезных ископаемых и эффективно предсказывать сейсмические процессы, в том числе сильные землетрясения. Высокоточное геодезическое обеспечение необходимо также в интересах навигационной системы ГЛОНАСС и практически всех новых космических технологий [7]. В этом смысле космическая геодезия служит базисом координатно-метрических систем, картографии, дистанционного зондирования Земли, составления и мониторинга кадастра, высокоточного мониторинга транспортных средств самого широкого профиля.

История отечественной космической геодезии началась с эксплуатации КА “Сфера” (1972—1980) (рис. 4). Он был запущен на круговую орбиту высотой около 1200 км с наклоном  $74^\circ$  и  $83^\circ$  и представлял собой цилиндр диаметром 2 м и высотой около 2 м, покрытый солнечными фотопреобразователями. Космический аппарат оснащён системой импульсной световой сигнализации и радиотехнической доплеровской системой. Запуски КА “Сфера” и их эксплуатация в составе космического геодезического комплекса (КГК) дали возможность за короткие сроки создать единую систему координат на всю поверхность земного шара с центром в центре масс Земли, уточнить элементы ориентирования в сравнении с системой координат 1942 г. и геофизические параметры Земли. По результатам обработки геодезической информации в 1977 г. была создана модель поля Земли, построена общеземная геодезическая сеть определения астрономических геодезических пунктов со средней квадратической погрешностью в несколько десятков метров.

Второй этап развития космической геодезии в России ознаменовался созданием и запуском 22 января 1981 г. геодезического КА “ГЕО-ИК” второго поколения. Аппараты выводились на околокруговые орбиты высотой около 1500 км и наклоном  $74^\circ$  и  $83^\circ$ . Для решения целевых за-



**Рис. 4.** Этапы создания автоматических космических аппаратов для нужд космической геодезии в СССР и Российской Федерации

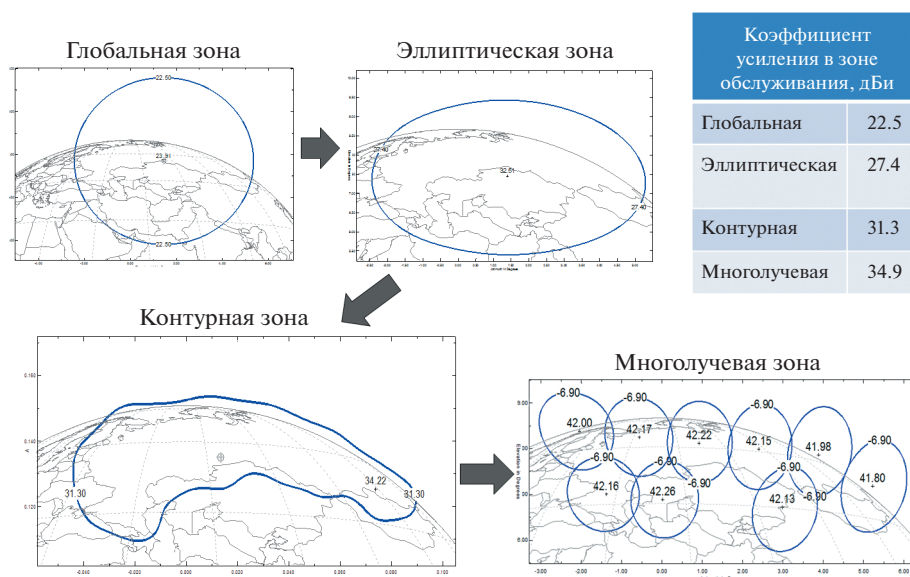
дач КА “ГЕО-ИК” оснащались радиовысотометром, радиотехнической доплеровской и дальномерной запросной системами, системой световой сигнализации, уголковыми отражателями, системой синхронизации и хранения времени.

Наряду с уже традиционными триангуляционным и орбитальным методами, при решении геодезических задач использовался метод альтиметрии — прямого измерения радиовысотометром высоты орбиты до морской поверхности. В результате обработки геодезической информации были созданы две модели поля Земли (“ПЗ-85” и “ПЗ-90”), построена мировая астрономо-геодезическая сеть со средней квадратической погрешностью определения пунктов в несколько метров и определена форма Земли, характеризуемая превышением высоты геоида над квазигеоидом в несколько метров.

С 2001 по 2011 г. наземной специальной аппаратурой был накоплен большой объём измерений (кодовые псевдодальности и измерения фазы несущей), проведённых с использованием КА систем ГЛОНАСС и GPS. Систематизация и анализ этих измерений позволили к концу 2011 г. разработать новую версию общеземной геодезической системы координат (ПЗ-90.11). Постановлением Правительства Российской Федерации она была установлена для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полётов и решения навигационных задач. Тем же правительственным постановлением была установлена национальная геодезическая система координат 2011 г. (ГСК-2011) — для использования при осуществлении геодезических и картографических работ на территории Российской Федерации.

В целях совершенствования геодезического обеспечения потребителей создана и развёрнута космическая геодезическая система (КГС) на базе спутников второго поколения — КА “ГЕО-ИК-2”, дополнительно оснащённых аппаратурой радионавигации, которая предназначена для определения параметров собственной орбиты по сигналам КА орбитальных группировок систем ГЛОНАСС и GPS. Облик КА “ГЕО-ИК-2” формировался под целевую орбиту (гелиосинхронная круговая, высота около 1000 км, наклонение около  $99^\circ$ ). Лётные испытания КГС “ГЕО-ИК-2” начались в 2011 г. (всего запущено три КА: в 2011, 2016 и 2019 гг.), в настоящее время они находятся на стадии завершения. Осуществляется обработка измерительной информации для решения целевых геодезических задач, реализующих государственную систему координат с относительной погрешностью определения расстояния между пунктами сети на уровне дециметров.

Для выполнения перспективных требований к геодезическому обеспечению в настоящее время формируется облик космической системы “ГЕО-ИК-3” с применением новых космических технологий, новой прецизионной спутниковой аппаратуры, новых подходов к проектированию. Систему третьего поколения предполагается создавать на базе многоярусной орбитальной группировки с использованием всех средств и методов космической геодезии, включая классический динамический метод, совместно с гравиметрическим и альтиметрическим методами, а также с применением спутникового гравитационного градиентометра и метода прецизионных межспутниковых измерений относительного



**Рис. 5.** Зоны покрытия территории Российской Федерации автоматическими космическими аппаратами системы связи

положения двух низкоорбитальных КА для прямых измерений геомагнитного поля Земли.

Орбитальная группировка КГС “ГЕО-ИК-3” будет включать в себя:

- 1–2 среднеорбитальных КА, оснащённых высокоточным радиовысотомером и обращающихся на солнечно-синхронной орбите;
- низкоорбитальный КА, оснащённый спутниковым гравитационным градиентометром;
- 2 низкоорбитальных КА, оснащённых высокоточной аппаратурой межспутниковых измерений;
- орбитальную группировку КА систем ГЛОНАСС, GPS, Галилео (войдут функционально).

Созданы три поколения космических геодезических систем, что позволило определить и уточнить фундаментальные постоянные, характеризующие форму и размеры Земли, а также изменения этих фундаментальных постоянных во времени. Решён ряд прикладных задач, таких как координатно-временная привязка результатов космических съёмок Земли, картографирования, задач геофизики и геодинамики, прогноза поиска полезных ископаемых.

## ПРОЕКТЫ, УСТРЕМЛЁННЫЕ В БУДУЩЕЕ

Каждый АКА состоит из десятков подсистем и приборов. Не перечисляя все, представим эволюцию антенн связи — от глобальных, эллиптических, контурных до многолучевых. На рисунке 5 показаны изменения зон покрытия АКА связи при изменении конструкции антенн (на примере

территории Российской Федерации, включая переиспользование частот с перераспределением мощности при применении многолучевой антенны) [8]. По сравнению с глобальными антеннами, многолучевые позволяют повысить мощность сигнала, принимаемого потребителем на Земле, примерно в 16 раз, а это означает, что диаметр земной приёмной антенны можно уменьшить в 4 раза.

Отдельное научно-техническое направление, реализуемое сегодня, — создание крупногабаритных антенн с раскрывающимся рефлектором диаметром до 48 м. На рисунке 6 представлено развитие трёх конструкторских решений. Первое — сетчатые антенны диаметром 5 м, раскрывающиеся на жёстких спицах, уже 10 лет работают на космических аппаратах “Луч”. Их более масштабные аналоги, но с меньшим количеством спиц и новой формообразующей структурой диаметром 12 м отправятся на орбиту через два года. В средней части рисунка — антенна с вантовой конструкцией рефлектора — это вырезка (размер полуоси 41 на 35 м). Этап научно-исследовательских работ по этим антеннам завершён, в текущем году стартует этап опытно-конструкторских работ. Космический аппарат с такой антенной планируется отправить на орбиту через шесть лет. И конечно же, высший научно-инженерный “пилотаж” — раскрывающаяся антенна диаметром 10 метров из композиционных материалов для космической обсерватории “Миллиметрон”, создаваемой по заказу Российской академии наук. Предполагается, что её среднее квадратическое отклонение составит всего 10 мк, что в десятки раз точнее решения, уже полученного результата для

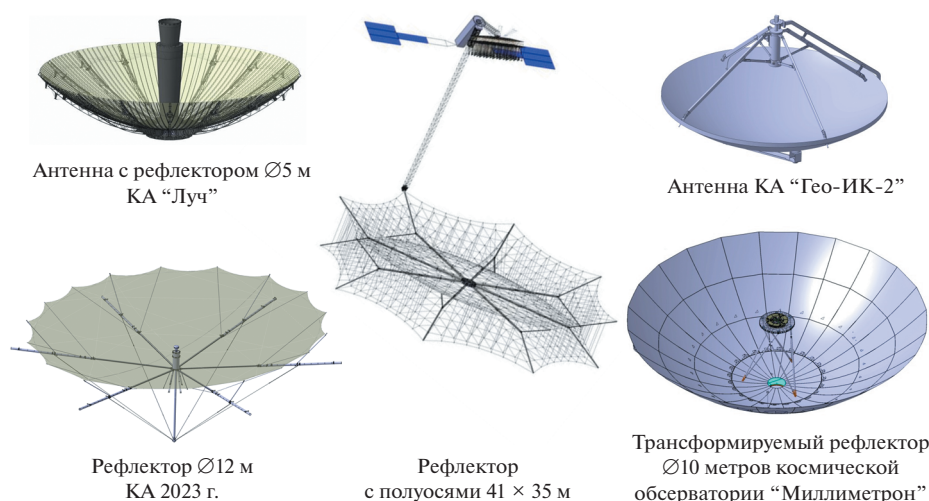


Рис. 6. Космические антенны различных конструкций

жёстких антенн. С использованием традиционных методов такая точность недостижима, поэтому необходимы новые научно-технические решения, ещё не используемые в автоматических космических аппаратах. В частности, это орбитальная юстировка, положения облучателя, контр-рефлектора и рефлектора относительно друг друга, а ещё — охлаждение элементов антенны, определяющих её геометрию, и первого защитного контура жидким гелием. Тем самым мы вторгаемся в гелиевую криогенику. Эта технология заметно отстала в России, для будущей обсерватории “Миллиметррон” специалисты “ИСС” её возрождают.

Сегодняшний мировой вызов — многоспутниковые низкоорбитальные космические системы. У всех на слуху OneWeb, Starlink. В рамках “Космической программы РФ до 2025 г.” в подпрограмме “Сфера” учёными и специалистами АО “ИСС” выполнен аванпроект космической системы “Марафон”. Это многоспутниковая система из 264 малых космических аппаратов. Её развёртывание предполагается в 2024–2026 гг. Назначение — предоставление телематических услуг для интернета вещей. Опционально — приложения для авиации, флота, навигации. Проект стартует в 2021 г., поскольку Правительством РФ необходимые решения уже приняты.

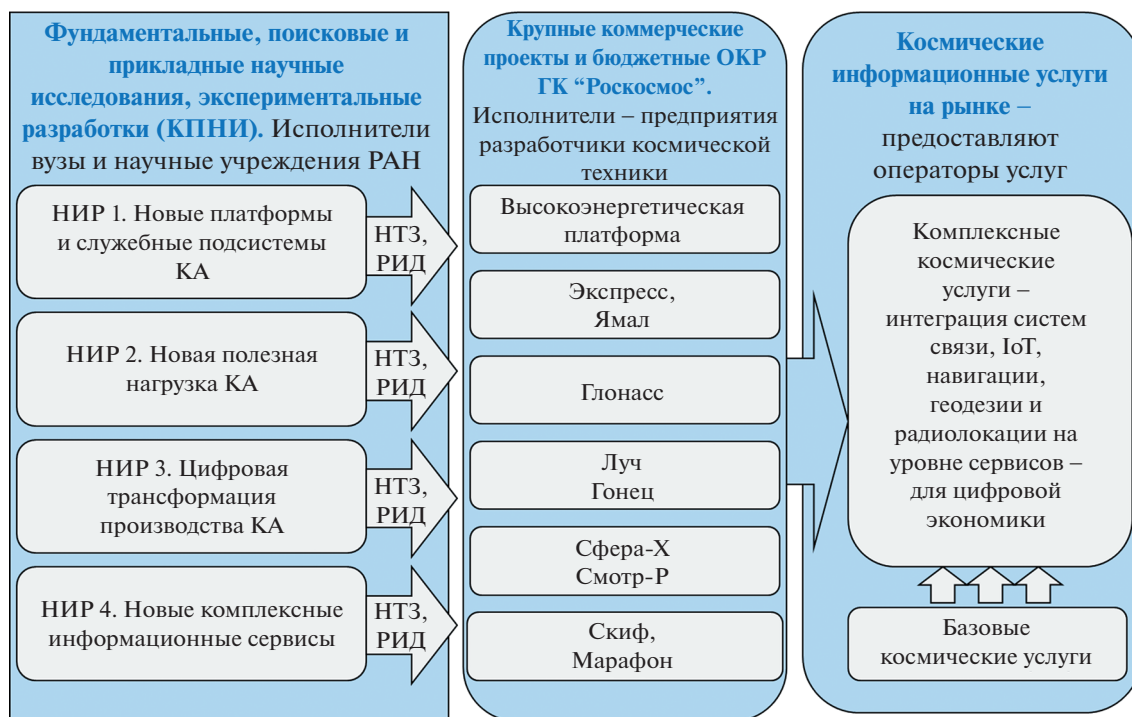
Ещё один проект, обращённый в будущее, — космическая система “Скиф”, также входящая в состав подпрограммы “Сфера”. Это русифицированный, продвинутый, по сравнению с существующим зарубежным, вариант: за рубежом он называется “o3b”; предполагается, что спутники, образующие систему, двигаются в экваториальной плоскости. Отечественный вариант предусматривает, что с орбитальной плоскости на высоте 8 тыс. км (наклонение 90°) обеспечивается по-

крытие всей территории России сигналом широкополосного доступа в Интернет, а при наличии двух ортогональных плоскостей — для всего мира. Научно-техническая проблема, стоящая перед этой космической системой (её ещё предстоит решить), — создание активных фазированных антенных решёток и блока обработки сигналов. Эта задача пока не решена и для геостационарных аппаратов.

“ИСС”, не только как предприятие, но и как инициатор технологической платформы “Национальная информационная спутниковая система” располагает богатым опытом взаимодействия с подразделениями Российской академии наук и ведущими российскими университетами. За последние 10 лет для реализации различных совместных проектов привлечено более 4 млрд рублей федеральных средств с таким же уровнем софинансирования со стороны “ИСС” и других участников технологической платформы. Хотя “ИСС” — научно-производственное объединение, но по отношению к проектам РАН и Минобрнауки России компания часто выступает в качестве индустриального партнёра.

Постановлением Правительства РФ от 19.02.2019 г. № 162 запущен механизм разработки комплексных научно-технических программ (КНТП) полного инновационного цикла. АО “ИСС”, СО РАН, Национальный исследовательский университет “МАИ” выступили инициаторами и разработчиками программы “Глобальные информационные спутниковые системы”, уже переданной в Правительство Российской Федерации (рис. 7).

В структуре КНТП три блока. Первый — комплексная программа научных исследований (КПНИ), фундаментальных, поисковых, прикладных, а также экспериментальных разрабо-



**Рис. 7.** Комплексная научно-техническая программа "Глобальные информационные спутниковые системы" – логическая схема

ток с использованием федеральных средств (для подразделений РАН и университетов). Блок предусматривает выполнение 40 комплексных научно-исследовательских работ, включающих в себя 150 конкретных проектов с участием подразделений Академии наук и российских университетов. Второй блок – опытно-конструкторские работы госкорпорации "Роскосмос" и коммерческих заказчиков. Третий – космические информационные услуги операторов потребителям. Естественно, что последний блок и служит главной целью – создание услуг населению. В ходе исполнения КПНИ должны быть разработаны новые технологии, применимые при создании радиолокационных малых космических аппаратов и высоко-мощных связных платформ, которые определяются из важнейших приоритетов развития космической отрасли Российской Федерации. Реализация этих планов обеспечит достойное продолжение славного космического пути, начатого первым орбитальным полётом Ю.А. Гагарина.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 40 космических лет. Железногорск: Научно-производственное объединение прикладной механики имени академика М.Ф. Решетнёва, 2002.
2. Академик Михаил Федорович Решетнёв. Железногорск: НПО ПМ им. акад. М.Ф. Решетнёва, 2006.
3. История развития отечественных автоматических космических аппаратов. М.: ИД "Столичная энциклопедия", 2015.
4. Мы были первыми. История создания навигационно-связной космической системы Военно-морского флота. М.: Кучково поле, 2014.
5. Карутин С.Н., Власов И.Б., Дворкин В.В. Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем. М.: Изд-во Московского ун-та, группа компаний "Галерея", 2014.
6. Чеботарёв В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск: СибГАУ, 2011.
7. Космические вехи: сборник научных трудов, посвящённый 50-летию создания ОАО "ИСС" имени академика М.Ф. Решетнёва / Гл. ред. Н.А. Тестоедов. Красноярск: ИП Суховольская Ю.П., 2009.
8. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излучённого поля / Под общ. ред. Ю.Е. Седельникова, Н.А. Тестоедова. Красноярск: СибГАУ, 2015.

— НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
— “ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ” —

**“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ  
В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”**

**ПОСТАНОВЛЕНИЕ НАУЧНОЙ СЕССИИ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН**

DOI: 10.31857/S0869587321110098

Первый в истории человечества пилотируемый космический полёт Юрия Гагарина, выполненный 12 апреля 1961 г., открыл дорогу к звёздам. День 12 апреля официально утверждён Генеральной конференцией международной авиационной федерации как Всемирный день авиации и космонавтики. В 2011 г. Генеральная ассамблея ООН провозгласила 12 апреля Международным днём полёта человека в космос.

После запуска первого искусственного спутника Земли, состоявшегося 4 октября 1957 г., и полёта Юрия Гагарина наша страна стала признанным лидером в исследовании и освоении космического пространства. Огромный вклад в разработку теоретических основ космонавтики внесли К.Э. Циолковский, Н.И. Кибальчич, Ф.А. Цандер, Ю.В. Кондратюк, Г.Э. Лангемак, И.В. Мешерский и другие учёные. Блестящие русские философы-космисты Н.Ф. Фёдоров, Н.А. Морозов, В.И. Вернадский и К.Э. Циолковский сформировали в нашей стране особую духовную среду, обеспечившую становление поколения энтузиастов, создавших первые космические ракеты и сделавших возможным выход человека в космос.

В начале 1930-х годов в Москве и Ленинграде возникли группы изучения реактивного движения (ГИРД), работавшие на общественных началах и объединившие энтузиастов ракетного дела. Инженеры московской ГИРД под руководством Сергея Павловича Королёва уже в 1933 г. провели испытания экспериментальной ракеты на гибридном топливе ГИРД-09 конструкции М.К. Тихонравова. Первой в СССР научно-исследовательской и опытно-конструкторской организацией по разработке ракет стала Газодинамическая лаборатория (ГДЛ). В 1933 г. в Москве на базе ГДЛ и московской ГИРД был создан Реактивный научно-исследовательский институт (РНИИ).

С середины 1940-х годов работы в области ракетостроения развернулись широким фронтом. В начале 1945 г. М.К. Тихонравов организовал группу специалистов РНИИ по разработке проекта пилотируемого высотного ракетного аппарата (кабины с двумя космонавтами) для исследова-

ния верхних слоёв атмосферы. В 1948 г. под руководством С.П. Королёва была создана и запущена первая советская баллистическая ракета. Затем последовала разработка целой серии баллистических ракет военного назначения. Практически все баллистические ракеты, разработанные в СССР, использовались также для изучения и освоения космоса.

Начиная с конца 1940-х годов и до 1983 г. на высотных ракетах различных модификаций выполнялись астрофизические, геофизические, биологические и ионосферные исследования на суборбитальных траекториях. Серия ракет “Вертикаль” получила название “академической”. Созданное под руководством С.П. Королёва ОКБ-1 (впоследствии ЦКБЭМ НПО “Энергия”) стало с начала 1950-х годов центром космической науки и промышленности в СССР. Был сформирован Совет главных конструкторов во главе с С.П. Королёвым, который в дальнейшем и осуществлял руководство космической программой СССР. Развернулись работы по созданию первого искусственного спутника Земли ПС-1. Благодаря работам многих научных коллективов, в первую очередь тех, которые возглавляли академики С.П. Королёв, М.В. Келдыш, В.П. Бармин, А.Ф. Богомолов, В.П. Глушко, В.И. Кузнецов, Н.А. Пилюгин, 4 октября 1957 г. был осуществлён запуск первого в мире искусственного спутника Земли.

В начале 1959 г. под председательством академика М.В. Келдыша в Академии наук СССР прошло совещание, на котором подробно обсуждался вопрос о полёте человека в космос, в том числе о критериях отбора будущих космонавтов. 22 мая 1959 г. было подписано постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о создании корабля-спутника для полёта человека в космос. Через полгода в соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 10 декабря 1959 г. № 1388-618 “О развитии исследований по космическому пространству” был создан Межведомственный научно-технический совет по космическим исследованиям при АН СССР под председательством академика М.В. Келдыша.

Была прямо поставлена задача — “осуществление первых полётов человека в космическом пространстве”. Реализация этой грандиозной задачи была поручена главному конструктору С.П. Королёву.

После осуществления первых пилотируемых полётов в космос космическая отрасль стала бурно развиваться. Это оказалось возможным благодаря выдающимся достижениям отечественных учёных и инженеров. Ещё в 1950-х годах академики М.В. Келдыш, В.А. Котельников, А.Ю. Ишлинский, Л.И. Седов, Б.В. Раушенбах, Д.Е. Охотимский и их коллеги разработали математическую теорию и навигационно-баллистическое обеспечение космических полётов. Возникла новая научная дисциплина — динамика космического полёта.

Конструкторские бюро во главе с академиком Н.А. Пилюгиным и В.И. Кузнецовым создали уникальные системы управления ракетно-космической техникой, обладающие высокой надёжностью. Академик В.П. Глушко и А.М. Исаев создали лучшую в мире школу практического ракетного двигателестроения, теоретические основы которой были заложены в 1930-е годы, на заре отечественного ракетостроения. В конструкторских бюро под руководством академика В.Н. Челомея, В.М. Мясничева, Д.А. Полухина были выполнены работы по созданию крупногабаритных особо прочных оболочек. Впоследствии это стало основой создания мощных межконтинентальных ракет, а затем и пилотируемых станций, современных модулей для Международной космической станции (МКС), ракет-носителей “Протон”. Большая работа по созданию ракет-носителей на базе баллистических ракет была выполнена в КБ “Южное” во главе с академиком М.К. Янгелем. Надёжность этих ракет-носителей лёгкого класса не знает аналогов в мировой космонавтике. В этом же КБ под руководством академика В.Ф. Уткина была создана ракета-носитель среднего класса “Зенит” — представитель второго поколения ракет-носителей.

С помощью беспилотных лунных и планетных зондов, разработанных под руководством члена-корреспондента АН СССР Г.Н. Бабакина, были выполнены пионерские исследования Луны (фотографирование её обратной стороны, автоматическая доставка на Землю лунного грунта, первые луноходы и др.), а также полёты на ближайшие к Земле планеты Солнечной системы, прежде всего Венеры.

Коллективами многих отечественных организаций были созданы серии космических аппаратов дистанционного зондирования Земли: “Зенит”, “Янтарь”, “Кобальт”, “Ресурс-Ф”, “Ресурс-О”, “Метеор-Природа”, “Метеор”, “Океан” и др. Под руководством академика М.Ф. Решет-

нёва было разработано более 30 типов космических комплексов и систем спутниковой связи и навигации.

Многоразовый корабль “Буран” впервые в мире осуществил автоматическую посадку на Землю. Ракетно-космическая система “Энергия—Буран” на многие годы опередила своё время, а по ряду характеристик значительно превзошла имеющиеся зарубежные средства космической техники.

Происходили качественные изменения в области пилотируемых космических полётов. Возможность успешно работать вне космического корабля впервые удалось доказать советским космонавтам. Была продемонстрирована способность человека в течение длительного времени жить и работать в условиях невесомости. Во время таких космических полётов было проведено большое число экспериментов — физических, медицинских, технических, геофизических, астрономических.

Важным этапом стало осуществление программы ЭПАС, завершившейся в июле 1975 г. запуском и стыковкой на орбите космических кораблей “Союз” и “Аполлон”. Этот полёт ознаменовал собой начало международных программ, которые развивались в последнюю четверть XX века. Их несомненным успехом стали изготовление, запуск и сборка на орбите Международной космической станции, которая уже более 20 лет работает в непрерывном пилотируемом режиме.

Космонавтика вызвала необходимость формирования нового направления в технике и строительстве — космодомостроения. Его родоначальниками у нас в стране стали коллективы под руководством крупных учёных — академика В.П. Бармина и члена-корреспондента АН СССР В.Н. Соловьёва. Россия интенсивно осуществляла и осуществляет запуски с известных всему миру космодомов Байконур и Плесецк, а также проводит пуски с создаваемого космодрома Восточный.

Решение разнообразных новых задач, вставших перед создателями техники для исследования и освоения космического пространства, дало мощный импульс развитию многих областей фундаментальной науки: математики и информатики, физики, химии и наук о материалах, наук о Земле, биологии, механики, систем управления и др. Возникли новые научные направления: дистанционное зондирование Земли из космоса, космическое приборостроение, космическая физическая и медицина, медицина экстремальных состояний организма, космическая биология и многие другие. Для спускаемых аппаратов на Венеру и Марс потребовалось создать аппаратуру, способную работать в экстремальных

условиях. Разработка мощных жидкостных ракетных двигателей, действующих в этих специфических условиях, потребовала решения целого ряда новых задач в области термо- и газодинамики, теории теплопередачи и прочности, металлургии высокопрочных и жаростойких материалов, химии топлив, вакуумной и плазменной технологии, которые были решены, в том числе с непосредственным участием учёных Академии наук.

Значительный вклад в развитие космических наук о жизни внесли академики М.В. Келдыш, Н.М. Сисакян, Л.А. Орбели, В.Н. Черниговский, А.В. Лебединский, В.В. Парин, О.Г. Газенко, А.И. Григорьев, С.Н. Вернов и другие выдающиеся учёные нашей страны. Их исследования позволили дать научно обоснованный ответ на вопрос о возможности длительного пребывания человека в космосе.

Широкую известность получили достижения учёных Академии наук в таких областях, как спутниковая метеорология, геодезия, экологический мониторинг, развитие методов, технологий и средств дистанционного зондирования Земли для углубления знаний о нашей планете, изучение влияния процессов, происходящих на Солнце и в космосе, на ионосферу и атмосферу Земли, организация и проведение технологических экспериментов, невозможных в земных условиях.

Сегодня российская космонавтика переживает не лучшие времена. Резко снижено финансирование космических программ, ряд предприятий находятся в крайне тяжёлом положении. Это значительно усложнило и на много лет задержало развитие космических исследований в нашей стране.

Однако даже в сложных современных условиях российские учёные и инженеры проектируют космические системы XXI века. Успешно реализуется уникальный совместный проект Госкорпорации “Роскосмос” и Германского центра авиации и космонавтики DLR, цель которого — построение полной карты Вселенной в рентгеновском диапазоне. Проект начат 13 июля 2019 г., когда в окрестность точки Лагранжа L2 системы “Солнце—Земля” была выведена одна из лучших в мире рентгеновских обсерваторий “Спектр-РГ”. С её помощью уже построена наиболее детальная рентгеновская карта Вселенной. На пяти зарубежных космических аппаратах успешно работают приборы, созданные в России. В ближайшие годы должны быть выведены в космос три станции для исследования Луны, медико-биологический спутник “Бион-М”, ультрафиолетовый телескоп “Спектр-УФ”, реализованы два проекта по исследованию околоземного космоса “Ионосфера” и “Резонанс”, в сотрудничестве с Евро-

пейским космическим агентством доставлен к Марсу космический аппарат “Экзомарс”.

В настоящее время создаются спутниковые системы связи, охватывающие все страны мира и обеспечивающие двустороннюю оперативную связь с любыми абонентами. Этот вид связи оказался самым надёжным и становится всё более выгодным. Системы ретрансляции позволяют осуществлять управление космическими группировками с одного пункта на Земле. Разработаны и эксплуатируются глобальные навигационные спутниковые системы. Без этих систем сегодня уже не мыслится использование современных транспортных средств — морских судов, самолётов гражданской авиации, военной техники и др.

Создаются новые поколения систем спутниковой навигации, связи, дистанционного зондирования Земли, в том числе многофункциональная многоспутниковая система на основе малых космических аппаратов “Сфера”.

Тесное взаимодействие Российской академии наук и Госкорпорации “Роскосмос” было и продолжает оставаться эффективным инструментом развития космической деятельности. Соглашение о сотрудничестве, подписанное 24 декабря 2015 г., направлено на формирование и реализацию Федеральной космической программы, в первую очередь в части фундаментальных исследований и создания инструментов для их проведения. Значительное внимание в этом соглашении уделяется сохранению и развитию научных школ, формированию научной и инновационной инфраструктуры, а также развитию международного научно-технического сотрудничества.

Важную роль в научном обеспечении Федеральной космической программы играют научные советы, в том числе Научно-технический совет Госкорпорации “Роскосмос” — постоянный консультативный орган, созданный для научно-методологического, информационно-аналитического и экспертного обеспечения деятельности Госкорпорации. В работе этого совета принимают участие члены РАН. Активно работает Совет РАН по космосу, созданный постановлением Президиума РАН от 30 июня 1992 г. № 215 для обеспечения выполнения Указа Президента Российской Федерации от 25 февраля 1992 г. № 185 “О структуре управления космической деятельностью в Российской Федерации”, ставший правопреемником Междуведомственного научно-технического совета по космическим исследованиям при Академии наук СССР.

2 ноября 2020 г. Президент Российской Федерации В.В. Путин провёл совещание по вопросам финансирования и развития ракетно-космической отрасли. Президент подчеркнул важность обсуждаемых проблем: “Решение этих стратегических задач имеет огромное значение для нашей

страны, для эффективного развития отечественной экономики, для повышения безопасности государства, для сохранения лидерства России на глобальном космическом рынке, где конкуренция динамично растёт”.

12 апреля 2021 г. В.В. Путин, поздравляя ветеранов и работников ракетно-космической отрасли с праздником — с Днём космонавтики — и с 60-летием первого полёта человека в космос, призвал отечественных учёных и специалистов к движению вперёд как в практическом освоении космоса, так и в фундаментальных исследованиях. Президент отметил, что ориентиром для реализации масштабных задач по освоению космоса и на ближайшие годы, и в предстоящие десятилетия являются Основы государственной политики в области космической деятельности до 2030 года и на дальнейшую перспективу, утверждённые в январе 2020 г.

Задача проведения научных космических исследований — второй по важности приоритет государственной политики в области космонавтики после задачи создания орбитальных группировок космических аппаратов телекоммуникации, навигации, дистанционного зондирования Земли, поиска и спасения в целях решения задач повышения обороноспособности и социально-экономического развития. Космонавтика нужна науке — она грандиозный и могучий инструмент изучения Вселенной, Земли, самого человека.

На научной сессии общего собрания членов РАН заслушаны и обсуждены доклады, посвящённые истории освоения космоса, роли Академии наук в развитии пилотируемой космонавтики. В докладах были представлены результаты фундаментальных исследований в области космической медицины, исследований Земли из космоса, использования ядерной энергии в космических системах, астрофизики высоких энергий, космической геодезии, а также планы исследований Луны и планет с помощью автоматических аппаратов.

Общее собрание членов РАН ОТМЕЧАЕТ:

полёт Ю.А. Гагарина в космос, состоявшийся 60 лет назад, стал возможным благодаря усилиям и таланту отечественных учёных и инженеров во главе с выдающимися основателями практической космонавтики академиками С.П. Королёвым и М.В. Келдышем, оказал определяющее влияние на начало масштабного исследования, освоения и использования космического пространства;

огромную роль фундаментальной науки — математики, физики, химии, наук о Земле, механики, физиологии, медицины, биологии — в обеспечении первого полёта человека в космос и решении задач по созданию техники, исследованию и освоению космического пространства;

исключительно важное значение, которое Российская академия наук и Госкорпорация “Роскосмос” придают формированию перспективных направлений совместной деятельности, развитию фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, а также широкому использованию полученных результатов в интересах развития космической отрасли;

положительный опыт сотрудничества РАН и Госкорпорации “Роскосмос”, накопленный при формировании комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла (КНТП) по приоритетным направлениям, определённым Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, в том числе при формировании КНТП “Глобальные информационные спутниковые системы”;

получение, несмотря на сложную экономическую ситуацию, новых научных результатов по ряду актуальных направлений фундаментальных исследований, соответствующих приоритетам развития космической отрасли, в том числе построение карт звёздного неба в рентгеновском диапазоне спектра с помощью космической обсерватории “Спектр-РГ”;

важность международного научного сотрудничества в области космической деятельности (научной дипломатии);

недостаточное финансирование фундаментальных и поисковых научных исследований, проводимых в нашей стране, затрудняющее формирование научного и технологического задела в интересах развития различных областей космической деятельности;

активную работу Совета РАН по космосу по формированию перспективных направлений научных исследований и анализу результатов, полученных в различных направлениях космической деятельности;

важную роль Научно-технического совета Госкорпорации “Роскосмос” в осуществлении научно-методического, информационно-аналитического и экспертного обеспечения космической деятельности Госкорпорации;

высокий уровень докладов, представленных на научной сессии общего собрания членов РАН ведущими учёными РАН и Госкорпорации “Роскосмос” по важнейшим направлениям космической деятельности, отражающим вклад Академии наук в освоение космоса и определяющим перспективы дальнейших работ в интересах исследования и освоения космического пространства.

Общее собрание членов РАН ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. Одобрить совместную деятельность РАН и Госкорпорации “Роскосмос” по актуальным направлениям исследований в целях углубления

знаний о Земле и космическом пространстве, а также в интересах развития космической отрасли, обеспечивающей получение прорывных научных результатов, развитие инновационного потенциала экономики и повышение международного авторитета страны.

2. Поддержать предложенные Госкорпорацией “Роскосмос” основные приоритетные научно-технологические направления космической деятельности в интересах обеспечения потребностей различных отраслей российской экономики, предупреждения и снижения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, охраны окружающей среды, обеспечения пространственной связанности территории страны, поиска и спасания, повышения обороноспособности и обеспечения безопасности, а также в интересах фундаментальной и прикладной науки, которые будут способствовать повышению экономических показателей и конкурентоспособности российской космической отрасли, в том числе:

развитие космических группировок для обеспечения телекоммуникационных услуг (связь, телевидение, широкополосный интернет), повышение качества навигационного обеспечения в различных, в том числе малодоступных регионах страны, включая Арктическую зону Российской Федерации и трассу Северного морского пути;

формирование высокоэффективных многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе созвездия малых космических аппаратов для обеспечения всепогодного, круглосуточного наблюдения Земли с высокой периодичностью;

создание современных типов аппаратуры ДЗЗ, в том числе: малогабаритных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), функционирующих на различных частотах и поляризациях, гиперспектрометров, многоспектральных комплексов, микроволновых радиометров, высоко-разрешающей оптико-электронной аппаратуры и других приборов, обеспечивающих формирование широкого спектра информационных продуктов;

создание и развитие пространственно-распределённых наземных средств приёма и обработки космических данных, а также средств взаимодействия с различными потребителями космической информации;

создание российской пилотируемой орбитальной станции;

развитие работ по созданию транспортного энергетического модуля для изучения и освоения дальнего космоса;

широкое использование цифровых и аддитивных технологий для развёртывания производств в космическом пространстве;

разработку робототехнических комплексов для использования в условиях космоса;

развитие технологий и систем лазерной связи;

создание Национального космического центра в соответствии с указанием Президента Российской Федерации от 30 января 2019 г. № Пр-120.

3. Поддержать основные направления фундаментальных и поисковых научных исследований с использованием космической техники, в том числе:

проведение исследований в интересах наук о Земле (геофизика, геология, геохимия, горные науки, океанология, науки об атмосфере, география), биологических, сельскохозяйственных и других наук, а также в интересах экологии с использованием космических данных;

исследования Луны, планет Солнечной системы, небесных тел, объектов дальнего космоса для решения актуальных проблем космологии, астрофизики и астрономии;

развитие существующих и разработка новых методов ДЗЗ и научных принципов создания космической аппаратуры, основанных на регистрации различных физических полей (электромагнитного, гравитационного, магнитного, потоков частиц), в том числе для получения космических изображений в различных диапазонах спектра электромагнитных волн;

развитие научных основ использования суперкомпьютерных технологий для анализа больших данных, поступающих от космических систем;

разработка научных основ методов, алгоритмов и программного обеспечения для сверхвысокопроизводительной обработки больших потоков спутниковых данных петабайтного и эксабайтного масштабов;

развитие методов создания баз данных, в том числе с использованием облачных технологий, для хранения и использования больших данных, а также методов управления большими данными, формируемыми космическими средствами;

комплексы исследований для решения фундаментальных проблем в области наук о жизни в интересах обеспечения возможности длительного пребывания человека в космосе.

4. Поддержать участие РАН и институтов РАН, находящихся под её научно-методическим руководством, в реализации Федеральной космической программы и обеспечить по согласованию с Госкорпорацией “Роскосмос” участие представителей РАН в органах проектного управления и экспертных советах этой комплексной программы.

5. Одобрить совместную деятельность РАН и Госкорпорации “Роскосмос” по формированию комплексной научно-технической программы

(КНТП) полного инновационного цикла “Глобальные информационные спутниковые системы” и считать целесообразным использовать накопленный опыт формирования замкнутых цепочек — от учёных, проводящих научные исследования, до заказчиков, реализующих результаты этих исследований в конкретные разработки и продукцию, в том числе в рамках перспективных КНТП.

6. Считать целесообразным активизировать международное сотрудничество в области космических исследований (научную дипломатию), способствующее повышению эффективности исследований и освоения космического пространства, а также снижению уровня международной напряжённости.

7. Госкорпорации “Роскосмос” и РАН обратить особое внимание на необходимость укрепления кадрового потенциала научных и отраслевых организаций, способных решать масштабные задачи космической деятельности, проведения совместных мероприятий по популяризации достижений отечественных космических программ и результатов фундаментальных и прикладных исследований.

8. Совершенствовать деятельность Совета РАН по космосу в части решения актуальных проблем и задач по всему спектру направлений фундаментальных космических исследований и освоения космоса. Одобрить активное и кон-

структивное участие представителей Госкорпорации “Роскосмос” и подведомственных ей предприятий в работе Совета, секциях и экспертных комиссиях Совета.

9. Рекомендовать Совету РАН по космосу совместно с Отделением общественных наук РАН, Отделением глобальных проблем и международных отношений РАН и Отделением историко-филологических наук РАН провести заседание, посвящённое гуманитарным, социальным и философским проблемам исследования и освоения космоса.

10. Обратиться в Правительство Российской Федерации с просьбой рассмотреть возможность повышения объёмов финансирования научных исследований, проводимых с помощью космических средств, до уровней, обеспечивающих их конкурентоспособность в приоритетных направлениях космической деятельности.

11. Научно-издательскому совету РАН издать материалы настоящей научной сессии общего собрания членов РАН, а также общих собраний отделений РАН по областям и направлениям науки и региональных отделений РАН по рассматриваемой тематике в виде отдельной книги.

12. Представить руководству страны решения и рекомендации настоящей научной сессии общего собрания членов РАН.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ВКЛАД АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ”

ОБЩАЯ ДИСКУССИЯ

*Ключевые слова:* освоение космоса, космические программы, системы жизнеобеспечения, Российская инженерная академия, необоснованные преследования учёных.

DOI: 10.31857/S0869587321110049

Обсуждение открыл академик РАН **А.В. Смирнов**, который познакомил участников сессии с решениями общего собрания Отделения общественных наук РАН, принятыми в преддверии научной сессии. Освоение космоса предполагает прежде всего соответствующий уровень развития науки и техники, но одновременно и состояние общества. На собрании отделения прозвучала та мысль, что космос являлся и является до сих пор одной из важнейших скреп российского национального самосознания. С ним наше общество связывает надежды на будущее, это предмет национальной гордости и общественной консолидации.

К сожалению, сейчас учёные фиксируют опасную негативную тенденцию: общественная поддержка космических исследований снижается. По данным психологических наблюдений, доля россиян, по мнению которых выгоду от космических программ получают чиновники, больше, чем совокупная доля тех, кто допускает, что соответствующие средства расходуются непосредственно на подготовку космических проектов.

Здесь, безусловно, надо что-то делать, считает **А.В. Смирнов**, нужна комплексная программа, которая обеспечила бы новое понимание того, что такое космос в жизни нашей страны. Опорой должны стать традиции отечественной философии и мировоззрения. Ведь русский космизм встроен в целую систему национальной философии, философии общего дела. На собрании отделения говорилось также о необходимости продолжать обширные психологические исследования, которые проводятся Институтом психологии РАН совместно с отрядом космонавтов.

Существующая в настоящее время институциональная форма развития космических исследований и космической деятельности объединяет в рамках одной корпорации три разных направления: это формирование общественного блага — гособоронзаказ, это фундаментальные космические исследования и пилотируемое освоение космоса, наконец это создание частных благ в виде коммерческих услуг и поставок. Подобная ситуа-

ция может приводить к определённым конфликтам в целеполагании. Поэтому отделение поддерживает идею создания института надведомственного целеполагания, такого, как Совет по космосу при Президенте РФ.

Выступивший затем академик **А.Г. Дегерменджи** поддержал призыв **О.Д. Rogozina** участвовать в работах, связанных с системой жизнеобеспечения на космических аппаратах. Те, кто начинал такие исследования, — академики **Л.В. Киренский** и **И.И. Гительзон**, создали поистине революционную систему, суть которой — скопировать биосферный круговорот, но не в точном подобии, что невозможно, а в его сущностной части. Были разработаны теории таких систем — для длительного полёта на запасах, зелёная — на микроводорослях, на высших растениях. Теория получила мощное развитие, и её венцом стало создание системы **БИОС-3**, в которой за счёт круговорота в электронной оранжерее удалось добиться очень высокой степени замыкания. Но стояла задача вернуть в круговорот то, что никогда не возвращалось, и тогда возникла система **БИОС-4**, основанная на новых технологиях, включая системы окисления неразлагаемых органических веществ. Требуется три-четыре года, чтобы эта система была доведена до 98–100-процентного замыкания.

От имени Российской инженерной академии выступил член-корреспондент РАН **Б.В. Гусев**. Напомнив, что между Российской академией наук и Российской инженерной академией в своё время было подписано соглашение о сотрудничестве, **Б.В. Гусев** выразил благодарность за поддержку целого ряда направлений, таких как энергетика, связанная с возобновляемыми источниками, материаловедение, экологическая тематика, развитие транспортных систем, в том числе на искусственных сооружениях.

В своём выступлении академик РАН **В.А. Рыбаков** отклонился от темы заседания в связи с форс-мажорным обстоятельством. По сообщению издания “Коммерсантъ. Приволжье”, в Нижнем Новгороде полиция задержала физика

академика РАН Е.А. Хазанова, лауреата Государственной премии Российской Федерации. Это было сделано прямо на рабочем месте, без объяснения причин. Подробности этого обстоятельства не сообщаются. Как считает В.А. Рубаков, Общее собрание членов РАН должно высказать серьёзную озабоченность этим фактом, а президиум Академии наук необходимо наладить взаимодействие с правоохранительными органами во избежание необоснованных преследований учё-

ных. В ответ президент РАН **А.М. Сергеев** обещал взять этот вопрос под свой контроль, вплоть до обращения в высокие инстанции и правоохранительные органы, когда ситуация прояснится. По мнению академика РАН **Ю.А. Костицына**, регулярные сообщения о том, что задержали то одного, то другого учёного, должны насторожить академию, и президиуму следует озаботиться этим вопросом.