



Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 3 (95) июль–сентябрь 2017 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главный редактор В.Я. Панченко,
заместители главного редактора В.В. Квардаков и В.Н. Фридлянов

Редакционная коллегия:

В.П. Анаников, В.Б. Бетелин, К.Е. Дегтярев, И.Л. Еременко,
В.П. Кандидов, П.К. Кашкаров, В.П. Матвеевко, Е.И. Моисеев,
А.С. Сигов, В.А. Ткачук, Р.В. Петров, И.Б. Федоров,
Д.Р. Хохлов, В.А. Шахнов

Редакция:

А.П. Симакова, Е.Б. Дубкова, Н.В. Круковская

Адрес редакции:

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru



Russian Foundation for Basic Research Journal

N 3 (95) July–September 2017

Founded in 1994

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994 (print)

Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

The Founder

Federal State Institution

“Russian Foundation for Basic Research”

Editor-in-Chief V. Panchenko,

Deputies chief editor V. Kvardakov and V. Fridlyanov

Editorial Board:

V. Ananikov, V. Betelin, K. Degtyarev, I. Eremenko,
V. Kandidov, P. Kashkarov, V. Matveenko, E. Moiseev,
A. Sigov, V. Tkachuk, R. Petrov, I. Fedorov,
D. Khokhlov, V. Shakhnov

Editorial staff:

A. Simakova, E. Dubkova, N. Krukovskaya

Editorial address:

32a, Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russia

Tel.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru

"RFBR Journal"
N 3 (95) July–September 2017

THEMED ISSUE EDITOR’S COLUMN

About the Editor of the Themed Section RAS Academician, Professor I.B. Fedorov 7

I.B. Fedorov

Abstract of the Themed Section 9

THEMED SECTION: THE 110TH ANNIVERSARY OF ACADEMICIAN S.P. KOROLEV’S BIRTH

N.S. Koroleva

On the 110th Anniversary of Academician S.P. Korolev’s Birth 11

I.A. Arbuzov, V.K. Chvanov, B.I. Katorgin, P.S. Levochkin, V.F. Rakhmanin, V.S. Sudakov

Powerful Liquid-Propellant Rocket Engines Development in JSC “NPO Energomash” 14

E.A. Mikrin, S.N. Timakov, A.V. Sumarokov, K.A. Bogdanov, A.V. Zhirnov, A.V. Zykov

Experience and Perspectives of the Onboard Algorithms Creation of the Spacecraft Motion Control 23

V.E. Lubinsky, S.V. Soloviev, N.V. Mishurova, A.M. Belyaev

The Russian Spacecrafts Flight Control 46

N.A. Testoev, V.Ye. Kosenko, E.N. Golovyonkin, V.V. Kudinov, Yu.V. Vilkov, F.K. Sinkovsky

Joint-Stock Company “Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems” – 58 Years in the Service of Cosmos and Fatherland 56

V.N. Kopenkov, V.V. Sergeev, V.A. Soifer, A.V. Chernov

Earth Remote Sensing and Geoinformation Systems 78

E.N. Kablov

Formation of Domestic Space Materials Science 97

About the Editor of the Themed Section RAS Academician, Professor I.B. Fedorov

- *President of BMSTU*
- *Member of the Scientific Council of the Russian Federation Security Council*
- *Chairman of the Expert Council of the Russian Foundation for Basic Research*
- *Member of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation*
- *Professor of BMSTU Department "Radio-electronic systems and devices"*

Igor Borisovich Fedorov was born on the 15th of April, 1940, in Moscow. In 1957 he graduated from a secondary school and entered the Bauman Moscow Higher Technical School (nowadays Bauman Moscow State Technical University – BMSTU). In 1963 I.B. Fedorov graduated from it specializing in radio-electronic systems. Then he was taken on as an engineer at the «Radio-Electronic Systems» Department. He had gone through all the stages of the institute career starting from an engineer and assistant at the Department up to the Rector and the President of BMSTU. I.B. Fedorov had been elected Rector for the first time in 1991, and has remained at the post for 19 years.

I.B. Fedorov is a well-known scientist in the field of the multiposition radar stations complexes design. He founded the scientific school in the area of radar systems of increased noise-immunity and inforamatory, which work under conditions where strong interference and complex geophysical environment exist on the signal propagation path. BMSTU radio-technical scientific school's achievements in the sphere of the modern information

technology development are well recognized: the Section of the Scientific Council of the RAS Department of «Nanotechnologies and Information Technologies» was established in BMSTU in 1998, it was named «Information Technology in Radiolocation» and chaired by I.B. Fedorov.

I.B. Fedorov authored more than 250 academic papers including 16 monographs and 16 invention patents. He carries out the active and fruitful work on the training of high-level specialists (both Candidates and Doctor of Sciences). With his direct involvement and under his scientific supervision more than 2000 radio engineers have been successfully graduated from BMSTU.

In 1992 I.B. Fedorov had been elected the Chairman of the Council of Rectors of Higher Educational Institutions of Moscow and Moscow Region, that he has led over the 20 years. During the years of its work, with the Moscow Government support the Council had done much for the development of the higher education in the capital. I.B. Fedorov is a long-standing Vice-President of the Russian Union of Rectors. He had become the full member of RAS in 2008.

The Technical Universities Association was created in 1994, it has now brought together 145 technical institutes of Russia and neighboring countries. I.B. Fedorov has become its the first President, since 2012 he is the Vice-President of the Association.

On 25 March 2010 Igor Borisovich Fedorov was elected the BMSTU President.



аппаратов» посвящена описанию основных особенностей технологии управления полетами существующих КА. Обсуждаются особенности перспективных космических программ полетов КА и предъявляемых ими требований к технологии управления. Предлагаются основные направления совершенствования этой технологии.

В работе коллектива авторов под руководством члена-корреспондента РАН Н.А. Тестоедова представлены материалы по вопросам создания, становления и развития космической промышленности в Сибирском регионе Российской Федерации, истории создания автоматических космических аппаратов связи и телевидения, ретрансляции, навигации и координатометрии в АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева».

В статье «Дистанционное зондирование Земли и геоинформационные системы» авторов академика РАН В.А. Сойфера, В.Н. Копенкова, В.В. Сергеева, А.В. Чернова рассматриваются роль и место космиче-

ского дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в геоинформационных системах. Приводятся этапы развития ДЗЗ и геоинформатики, краткий обзор российских средств получения, приема и обработки космических снимков. Описаны специфика и задачи обработки данных ДЗЗ.

В статье академика РАН Е.Н. Каблова «Становление отечественного космического материаловедения» на основе документов, научных отчетов и публикаций восстановлена история возникновения космического материаловедения в СССР. Представленные материалы охватывают основные события, связанные с периодом освоения космического пространства, до середины 60-х гг. прошлого века. Установлен вклад Всесоюзного научно-исследовательского института авиационных материалов в обеспечение лидирующего положения нашей страны в области космических исследований. Приводятся направления научных исследований по созданию материалов и технологий, применяемых в космических проектах С.П. Королева.

Приведенные в настоящем сборнике материалы описывают только часть научных направлений, созданных под руководством Сергея Павловича Королева и давших начало новой отрасли, ракетно-космической, воплотившей мечты многих поколений, – полетам в космос. Космические технологии стимулировали развитие новых современных инженерных направлений, являющихся фундаментом прогресса науки и техники в будущем.

Abstract of the Themed Section

I.B. Fedorov

This issue of the “Russian Foundation for Basic Research Journal” is devoted to the remarkable date in the history of space exploration – the 110th anniversary of Sergey Pavlovich Korolev’s birth. Having been a scientist of international repute and the practical astronautics founder, who has translated into reality K.E. Tsiolkovskiy ideas, Korolev will forever remain the First and Chief Spacecrafts Designer.

All the authors of the papers included in this “Russian Foundation of Basic Research Journal” issue are well-known scientists, directors of

space industry enterprises, who were the pioneers in spacecraft equipment development. In the introduction, Sergey Pavlovich Korolev’s daughter, the Doctor of Medical Sciences, Professor Nataliya Sergeevna Koroleva addresses to the readers her remembrances of her father’s extraordinary diligence and exceptional efficiency, ability to organize and coordinate the colossal work of many scientific and engineering teams.

The paper by the team of authors under the guidance of academician B.I. Katargin presents powerful liquid-propellant rocket engines (LPRE) developed in Energomash Research and Production Association. These propulsion systems reliably bring almost all the Russian domestic space objects into space, starting with the first artificial satellite of the Earth, the first manned

spacecraft and up to the “Mir” orbital station and the ultra-powerful “Energia” rocket with the “Buran” spacecraft. The Corporation “NPO Energomash” holds the leading positions in the Russian space-rocket industry as regards the highly reliable powerful oxygen-kerosene LPRE.

The team of authors under the guidance of academician E.A. Mikrin in their paper “Experience and Perspectives of the Onboard Algorithms Creation of the Spacecraft Motion Control” provides a summary of the methods of the spacecrafts movement control on-board algorithms development both historical and current. The benefits of adaptive approach applied now by the satellite-borne software developers are demonstrated on particular examples. The construction principles of the perspective autonomous systems for the motion control of a satellite group, equipped with rotating sun sails, by means of forces and moments created by light pressure are represented.

The article “The Russian Spacecrafts Flight Control” by V.E. Lyubinskiy, S.V. Solovev, N.V. Mishurova, A.M. Belyaev, who are the Public Joint-Stock Company “Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”” staff members, is devoted to the main features of the modern spacecrafts flight control. The perspective space flights programs peculiarities and their requirements to the modern spacecrafts control technologies are discussed. The principal lines of the control technology improvement are suggested.

The paper by the team of authors under the guidance of academician N.A. Testoedov provides some materials on the creation, formation and development of the space industry in Siberia region of the Russian Federation, on the history of the automatic satellites creation for space communications, television transmission, data relay, navigation and coordination development in the Joint-Stock Company “Academician Reshetnev Information Satellite Systems”.

Academician V.A. Soyfer, V.N. Kopenkov, V.V. Sergeev and A.V. Chernov in their work “Earth Remote

Sensing and Geoinformation Systems” discuss the role and place of space-based remote sensing of the Earth (RSE) in the geoinformation systems (GIS) functioning. The stages of RSE and GIS development, a short review of the Russian equipment for the satellite images receiving, collecting and processing are given. The specificity and tasks of the RSE data processing are described.

Academician E.N. Kablov’s paper “Formation of Domestic Space Materials Science” is based on documents, scientific reports and publications and restores the history of the USSR space materials science origin. The submissions cover the key events relating to the period of the space exploration until the mid-1960s. The “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials” contribution to the achievement the country’s leading position in space studies is outlined. The author presents main directions of scientific research on the creation of materials and technologies applied in S.P. Korolev’s space projects.

The materials collected in this issue of the “RFBR Journal” cover just a few of the scientific researches directions that have been established under S.P. Korolev authority and launched the new, space-rocket, industry, which embodied the new generations’ dreams of space flights. Space technologies stimulated the development of new modern engineering directions, which in turn are the foundation for future science and technology progress.

110-летию со дня рождения Сергея Павловича Королева посвящается

Н.С. Королева

Этот выпуск тематического сборника «Вестник РФФИ» в серии «Фундаментальная инженерия» посвящен знаменательной дате в истории освоения космоса: 110-летию со дня рождения основоположника практической космонавтики Сергея Павловича Королева. Авторы статей сборника – известные ученые, руководители предприятий космической промышленности. Во вступительном слове к читателям сборника выступает дочь Сергея Павловича, доктор медицинских наук, профессор Наталия Сергеевна Королева.

12 января 2017 года исполнилось 110 лет со дня рождения моего отца – академика Сергея Павловича Королева. За годы, прошедшие после его кончины, о нем написаны книги и статьи, сняты документальные и художественные фильмы. В 2007 году, к его 100-летней годовщине, в издательстве «Наука» вышел мой трехтомник «С.П. Королев. Отец», получивший в 2011 году премию Российской академии наук. В 2014 году Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева выпустила книгу «С.П. Королев. Энциклопедия жизни и творчества», в которой соединены воедино почти 150 конструкций моего отца, реализованных при его жизни и в последующие годы (корабль «Союз»), и люди, работавшие с ним бок о бок. Однако, несмотря на обилие информации, интерес к личности моего отца не ослабевает.

У моего отца был девиз: «Жить просто так – нельзя. Жить надо с увлечением!» Этому девизу он следовал всю жизнь.

Прошло чуть более полувека, как нет моего отца, но дело, которому он отдал свою жизнь, продолжается. На смену ветеранам приходит моло-

дежь. За прошедшие годы наука и техника сделали большой шаг вперед. Взлетают над нашей планетой новые космические корабли, летает Международная космическая станция. Этот процесс невозможно остановить, он нескончаем. Но сколько бы ни совершалось космических полетов, каких бы грандиозных успехов в будущем не достигла мировая космонавтика, человечество всегда будет помнить ее истоки и тех, кто стоял у этих истоков, кто делал все впервые. А это – и первая в мире межконтинентальная баллистическая ракета, и первый искусственный спутник Земли, и первый полет человека в космос, и первый выход человека в космическое пространство, и первые автоматические аппараты, запущенные к Луне, Венере и Марсу, и первая «мягкая» посадка на Луну и многое другое.

И я невольно задаю себе вопросы: почему именно мой отец возглавил эти работы в самом начале, когда еще не было ясно, нужно ли их проводить? что это даст людям? выполнимы ли они? Быть может, огромные средства и силы будут затрачены впустую, а ведь неизбежны, пожалуй, и человеческие жертвы. Какую надо было принять на себя ответственность, как быть уверенным в успехе, чтобы направить усилия вначале десятков, а потом тысяч людей на осуществление планов, многим казавшихся нереальными!

Отцу был присущ неординарный организаторский талант, раскрывшийся в полной мере в ту пору, когда он возглавлял и координировал колоссальную работу многих научных и конструкторских коллективов. Будучи прирожденным лидером, он умел связать воедино усилия проектантов, произ-



КОРОЛЕВА
Наталия Сергеевна
профессор,
Первый Московский
государственный медицинский
университет им. И.М. Сеченова
Минздрава Российской Федерации

Natalya S. KOROLEVA
Professor,
I.M. Sechenov First Moscow State
Medical University of the Ministry of Healthcare
of the Russian Federation
8-2, Trubetskaya Str., Moscow, 119991, Russia

водственников, испытателей – всех, кто был занят в общем деле, тысяч и тысяч людей, трудившихся на различных предприятиях во многих городах нашей страны. Сила личности отца была такова, что с его мнением очень часто соглашались и члены созданного им Совета главных конструкторов (а среди них были люди с очень непростыми характерами), и видные ученые, военачальники, и члены правительства. Авторитет его формировался под воздействием убедительности доводов, настойчивости в достижении цели, феноменальности результатов, которых он добивался. Именно эти качества, а не высокое служебное положение, постепенно поднимали его над окружающими и делали его мнение непререкаемым. Сотрудники вспоминали, что его выступления на совещаниях всегда отличались наступательным духом, он ставил вопросы как рачительный хозяин большого дела, которого все интересует и заботит. Он никогда не ограничивался констатацией фактов, а использовал их, чтобы ставить новые задачи, причем логика его рассуждений была такова, что факты делали поставленную задачу совершенно обязательной для исполнения. Вот такая напористость, умение мыслить масштабно, способность нацелить на главные вопросы, вызывали большое уважение и никого не оставляли равнодушным – ни тех, кто работал под его руководством, ни тех, кто принимал решения в государственных масштабах. Эти качества рождали его личный авторитет, потому что прямым их следствием были успехи в работе.

В решении всех вопросов отца отличала смелость, опиравшаяся на научный и инженерный фундамент. Как главному конструктору ему постоянно приходилось принимать очень ответственные решения. Выступая 10 ноября 1964 г. перед сотрудниками своего предприятия, он заметил: «Наши работы являются принципиально новыми по очень многим вопросам. Спросить негде». Это была тяжелая ноша – ответственность за жизнь людей, за правильность расходования огромных государственных средств.

Его отличали кипучая энергия, необыкновенное трудолюбие и исключительная работоспособность. Он работал яростно, страстно, неистово, словно торопился жить, и сутки для него были коротки. В студенческие годы даже старался спать через ночь – так ценил время. Большое значение он придавал личному примеру, особенно в сложных и опасных ситуациях, считая, что «плох тот командир или руководитель, который посылает только подчиненных, а сам уходит в сторону. Мне кажется, что за таким командиром люди не пойдут. Но, конечно, все должно быть с умом и в меру» (из письма жене от 9 мая 1957 г.). Мог быть жестким с подчиненными,

но они знали, что в случае неудачи он возьмет вину на себя и не станет вымещать неприятности на окружающих. Это спланивало вокруг него людей, создавало атмосферу доверия и во многом способствовало успеху всего дела. Сотрудники не опасались высказывать смелые рискованные мысли. Сам отец был постоянным генератором новых идей и новых задач. И всегда стремился, чтобы его идеи как можно быстрее «овладевали массами» и были реализованы. В минуты испытаний он, как правило, не падал духом, проявляя громадное самообладание и оптимизм. «Ты знаешь, я по натуре большой оптимист всегда и во всем» (из письма к жене от 30 марта 1964 г.). Хотя, замечу, бывали у него и кратковременные периоды упадка душевных сил, особенно болезненные после несправедливых жизненных ударов. При неполадках и авариях отец, безусловно, огорчался, однако быстро приходил в себя и мужественно преодолевал эти состояния, включая на полную мощь свою железную волю. В таких ситуациях он собирал главных конструкторов, всех участников работы, держал с ними совет и всегда находил решение, которое позволяло исправить допущенные ошибки. При возникновении замечаний, отказов, ненормальности в работе бортовой аппаратуры отец не считал своей обязанностью непрерывное участие в процессе устранения и преодоления возникших проблем. Поняв суть вопроса, он полагал достаточным сформировать группу специалистов, которые должны заняться поиском причин и устранением отказа или замечания. А за собой он оставлял получение достаточной информации о ходе процесса и принятие окончательного решения. При этом он покидал место испытаний, только убедившись в том, что специалисты правильно, с его точки зрения, определили пути и направление своей работы. Выказывание им полного доверия поднимало автори-

тет участников. В письме жене от 22 декабря 1958 г. он писал: «...вся наша работа – это поиск все нового и нового, а раз так, то могут быть и срывы и неудачи. Для нас лично этот риск невелик, т.к. все условия для надежного и безопасного проведения наших работ имеются, и мы очень осторожны. Поэтому... соберем силы и будем спокойно идти по намеченной дороге. А дорога, на которую нас ведет наше дело, – это светлая, но длинная и исполненная трудностей дорога. О ней лишь мечтали лучшие умы человечества, а нам выпало счастье быть пионерами на этом пути».

Отец был вспыльчив, но отходчив. Сотрудники ОКБ вспоминали, что реакция его на всякие нарушения была исключительно действенной не за счет интонации и тембра голоса или выражения глаз – это были весьма впечатляющие, но не главные элементы беседы – монолога, а за счет поразительной способности так формулировать смысл проступка, что сознание вины потрясало. Он реагировал на все причины, приводящие к задержке в работе так, как будто ему наносили личную обиду. Если дело затягивалось, мог взорваться, пригрозить сотрудникам выговором и даже увольнением. Людям, формально относящимся к работе, он советовал идти в мукомольную промышленность или заняться производством кастрюль и тазов. И наоборот, интерес к делу, которым он занимался, всегда служил пропуском к его сердцу.

У отца была репутация очень грозного начальника, однако люди

не опасались обращаться к нему и с обычными житейскими просьбами, зная, что они не останутся без внимания. Он любил свой коллектив, гордился им, заботился о нем. По четвергам принимал сотрудников по личным вопросам – в среднем 30–35 человек, и не покидал кабинет до тех пор, пока не примет последнего записавшегося. Умел вникнуть в нужды людей и прийти им на помощь в трудные моменты: доставал лекарства, устраивал в больницы, ходатайствовал по поводу жилья. Его заботу о подчиненных и не только о подчиненных ему людях, участие в их судьбах ощутили на себе многие. При этом каждый знал, что если дело срочное, надо встретить Главного утром у входа в здание КБ и проводить до кабинета, чтобы обсудить ту или иную проблему. Он предпочитал по возможности сразу, не откладывая, решить вопрос, а если это не удавалось, записывал его в личный настольный блокнот. Напоминать не приходилось – любил сам доводить все до конца. Сочетание в характере отца качеств требовательного, справедливого руководителя и гуманного человека способствовало успеху дела и укреплению его авторитета. Гуманность его проявлялась, например, во время борьбы с космополитизмом, когда ему стоило немалых трудов отстоять многих своих сотрудников. Для него принадлежность к той или иной национальности не имела никакого значения.

Отцу удалось совершить то, о чем мечтали многие поколения людей, но он ушел из жизни, не успев сделать все, что планировал, в частности осуществить полеты на Луну и другие планеты. Он мечтал о том времени, когда космический полет будет доступен людям так же, как сейчас доступен полет на пассажирском самолете. Мечтал о превращении космической техники в отрасль народного хозяйства, верил, что придет время, когда в околоземном пространстве начнут создаваться поселения людей, использующих солнечную энергию, производящих лекарства, промышленную и биопroduкцию, которую невозможно создать на Земле. Он не только руководил грандиозной космической программой, но и мечтал написать о том, как были достигнуты результаты, поразившие мир и сделавшие нашу страну Первой Великой космической державой.

Разработка мощных жидкостных ракетных двигателей в АО «НПО Энергомаш»

И.А. Арбузов, В.К. Чванов, Б.И. Каторгин, П.С. Левочкин, В.Ф. Рахманин, В.С. Судakov

Обсуждаются результаты разработки мощных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в АО «НПО Энергомаш». Приводятся сведения о разработках в пятидесятые-шестидесятые годы прошлого века двигателей для первых космических ракет-носителей семейств Р-7 и РН «Протон». Описываются разработки нового поколения кислородно-керосиновых ЖРД для ракет-носителей «Энергия», «Зенит», «Атлас 5», «Ангара» и других. Приводится информация о перспективных разработках ЖРД для новых поколений космических ракет-носителей, выгодах использования имеющегося семейства ЖРД на базе РД-170/171 для новых средств выведения.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, турбонасосный агрегат, ракета-носитель, газогенератор, камера сгорания.

Жидкостные ракетные двигатели являются основными составляющими в любой космической ракете-носителе (РН). Над их созданием работает множество различных российских и зарубежных научных и производственных организаций и компаний. В России наибольший вклад в разработку таких двигателей вносит Акционерное общество (АО) «НПО Энергомаш».

АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», известное ранее как ГДЛ-ОКБ (Газодинамическая лаборатория-Опытно-конструкторское бюро), ОКБ-456, КБ Энергомаш – ныне это ведущее российское предприятие по разработке мощных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Разработанные в НПО Энергомаш ЖРД надежно выводят в космос практически все отечественные космические объекты, начиная с первого искусственного спутника Земли, первого космического корабля с человеком на борту до орбитальной станции «Мир» и сверхмощной ракеты «Энергия» с космическим кораблем «Буран». АО «НПО Энергомаш» по праву занимает лидирующую позицию в ракетно-космической отрасли в сфере разработ-

ки высоконадежных мощных кислородно-керосиновых жидкостных ракетных двигателей.

В настоящее время АО «НПО Энергомаш» является головным предприятием новой интегрированной структуры, объединившей ведущие российские предприятия ракетного двигателестроения.

Значительная часть пусков всех космических РН в мире осуществляется с использованием двигателей интегрированной структуры ракетного двигателестроения, позволяющих надежно выводить и эксплуатировать как большинство российских, так и многие зарубежные космические объекты, от первого искусственного спутника Земли и первого космического корабля с человеком на борту до элементов Международной космической станции.



АРБУЗОВ
Игорь Александрович
Генеральный директор
НПО Энергомаш
имени академика
В.П. Глушко



ЧВАНОВ
Владимир
Константинович
профессор,
НПО Энергомаш
имени академика В.П. Глушко



КАТОРГИН
Борис Иванович
академик,
НПО Энергомаш
имени академика
В.П. Глушко



ЛЕВОЧКИН
Петр Сергеевич
НПО Энергомаш
имени академика
В.П. Глушко



РАХМАНИН
Вячеслав Федорович
НПО Энергомаш
имени академика
В.П. Глушко



СУДАКОВ
Владимир Сергеевич
НПО Энергомаш
имени академика
В.П. Глушко

Совместно с отраслевыми институтами НПО Энергомаш участвует в работах по освоению прогрессивного метода изготовления деталей с использованием аддитивной технологии, ведутся работы по освоению горючего на основе керосина с микроскопической добавкой высокомолекулярного полиизобутилена. Предприятие ведет разработку ЖРД с кольцевой камерой сгорания и тарельчатым соплом и отработку ЖРД на сжиженном природном газе (метане); проведены испытания новых ионных электроракетных двигателей, идут работы по созданию перспективных кислородно-водородных ЖРД.

В 1957 г. именно двигатели НПО Энергомаш обеспечили вывод в космос первого искусственного спутника Земли, открывшего космическую эру. В 1954–1957 гг. разработаны ЖРД РД-107 (рис. 1) и РД-108 для первой отечественной межконтинентальной баллистической ракеты Р-7, на базе которой позднее создано семейство космических РН «Восток», «Восход», «Молния», «Союз». Создание Р-7 под руководством прославленного академика Сергея Павловича Королева явилось выдающимся достижением человеческого разума и научно-технических возможностей. С помощью этих РН выполняется вся отечественная программа пилотируемых полетов, начиная с корабля «Восток».

Запуск первого искусственного спутника Земли состоялся 4 октября 1957 г. Впервые аппарат, созданный человеком, преодолел силу земного притяжения, это увидел и услышал весь мир. Неожиданность его появления вызвала международный эффект непредсказуемой силы – ведь все это удалось стране, больше других пострадавших от недавней войны. Создание ракетного комплекса на основе ракеты Р-7 состоялось [1].

Работы по совершенствованию двигателей РД-107 и РД-108, повышению их надежности продолжались. В результате большого коли-



Рис. 1. Жидкостный ракетный двигатель РД-107.

чества доводочных и летных испытаний двигателей была подтверждена настолько высокая надежность двигателей, что стало возможным доверить им подъем с земли и доставку в космос человека.

За обеспечение полета в космос Ю.А. Гагарина ОКБ-456 награждено орденом Ленина. Герой Социалистического Труда главный конструктор В.П. Глушко был награжден второй Золотой медалью «Серп и Молот».

Успешный запуск корабля «Восток» открыл эпоху полетов в космос – эру космонавтики. С тех пор все пилотируемые космические корабли, стартующие с космодрома Байконур, поднимаются с поверхности Земли двигателями РД-107 и РД-108 и их модификациями. То же относится к большей части беспилотных космических кораблей и спутников.

Высокая надежность ракет типа Р-7, подтвержденная набранной статистикой полетов, позволила обеспечить их длительную эксплуатацию, ставшую рекордной для ракетной техники, – ровно 60 лет. Количество изготовленных маршевых двигателей стало поистине «астрономическим»: при количестве пусков ракет, составляющих к настоящему времени свыше 1900, число работавших в полете двигателей – свыше 9500 экземпляров, количество изготовленных двигателей – свыше 12000. Такой статистики не имеет ни один другой двигатель в мировой практике.

Разработка мощных маршевых двигателей на высококипящем топливе была начата в ОКБ-456

в начале 50-х гг. В то время была острая необходимость создания ракет дальнего действия, обеспечивающих высокую боевую готовность наряду с возможностью длительного хранения при максимальной защищенности стартовых позиций. Таким требованиям отвечало топливо в виде углеводородного горючего в сочетании с окислителем – азотной кислотой.

Первым мощным жидкостным реактивным двигателем на высококипящем топливе, прошедшим в ОКБ полный цикл отработки, стал двигатель РД-214. Его разработали для баллистической одноступенчатой ракеты средней дальности Р-12. Позднее РД-214 использовался в составе космической двухступенчатой РН серии «Космос». РД-214 находился в эксплуатации в состав ракет Р-12 и «Космос» более 30 лет.

Разработкой ЖРД РД-251 и РД-252 было завершено создание трех поколений двигателей на высококипящем топливе без дожигания в камере турбогаза; при этом постоянно улучшались энергетические и эксплуатационные характеристики двигателей, вершины которых для этого класса ЖРД были достигнуты на РД-251 и РД-252.

В начале 60-х годов была начата разработка двигателя первой ступени РН «Протон» (рис. 2). В качестве двигателя первой ступени был принят предложенный ОКБ-456 проект самого мощного к тому времени однокамерного жидкостного двигателя РД-253 [2]. Он был первым и самым мощным маршевым ЖРД на долгохраняемых компонентах топлива, выполненным по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. С появлением РД-253 (рис. 3) совершен качественный скачок в освоении высокого уровня давления в камере



Рис. 2. Ракета-носитель «Протон».

и достижении высоких значений удельного импульса тяги, который обозначил одно из основных направлений совершенствования характеристик отечественных ЖРД. Этот двигатель стал родоначальником большого семейства маршевых ЖРД, разработанных в последующие годы. Первый запуск РН «Протон» состоялся 16 июля 1965 г., а его двигатель РД-253 является самым надежным из числа находящихся в эксплуатации мощных ЖРД. Он доныне серийно изготавливается на Пермском моторостроительном заводе им. Я.М. Свердлова (теперь ПАО «Протон-ПМ»). В 1987–1993 и 2001–2005 гг. созданы форсированные варианты двигателя РД-253: изделия РД-275 и РД-276 соответственно. Их тяга была увеличена со 150 до 170 тс, что позволило увеличить массу полезного груза, выводимого РН «Протон-М».

С начала 1970-х гг. началась разработка нового поколения кислородно-керосиновых ЖРД по схеме с дожиганием окислительного газа: двигателя РД-120 для второй ступени РН «Зенит», а также самого мощного ЖРД РД-170/171, предназначенного для первых ступеней РН «Энергия» и «Зенит» соответственно.

В мае 1974 г. произошли события, определившие дальнейшее развитие космической техники. Ракетная фирма, которой многие годы руководил С.П. Королев, была преобразована в НПО «Энергия». Генеральным конструктором и директором НПО «Энергия» назначили руководителя КБ Энергомаш академика В.П. Глушко.

По его инициативе была начата новая разработка ряда РН, обеспечивших решение большого круга задач как военного, так и мирного назначения. Необходимо было создать универсальный двигатель для первых ступеней мощной ракеты-носителя «Энергия», ракетно-космической системы «Энергия-Буран» (рис. 4), РН среднего класса «Зенит».



Рис. 3. Жидкостный ракетный двигатель РД-253.



Рис. 4. Ракетно-космическая система «Энергия» – «Буран».



Рис. 5. Жидкостный ракетный двигатель РД-171М.

Двигатель РД-170/171 представляет собой сложную конструкцию. В центре на оси двигателя расположен турбонасосный агрегат (ТНА), состоящий из турбины и двух насосов: окислителя и горючего. Рабочим телом турбины являются газообразные продукты сгорания (окислительный газ) части расхода горючего с полным расходом жидкого кислорода, полученные в двух одинаковых газогенераторах. Газ с давлением 600 атм и температурой 500 °С поступает в турбину, а затем направляется через специальные газопроводы в камеры сгорания. В состав ТНА включена вторая ступень насоса горючего, которая обеспечивает подачу части горючего в газогенераторы с повышенным до 800 атм давлением. После первой ступени насоса горючего керосин идет на охлаждение камер сгорания, а затем в смесительные головки, где смешивается и сгорает с окислительным газом при давлении 250 атм и температуре около 3500 °С. Управление вектором тяги осуществляется за счет отклонения каждой камеры на угол до 8°. Для обеспечения возможности поворота камер потребовалось создание специального гибкого элемента – узла качания. Он

представляет собой паяно-сварную конструкцию; в ней поворот достигается за счет деформации гибкого элемента – многослойного бронированного снаружи стального сильфона. Входная и выходная части узла качания снаружи связаны карданным узлом, оси которого являются осями качания камеры. Для обеспечения бескавитационной работы насосов при относительно низких давлениях в баках ракеты в составе ЖРД имеются бустерные насосы окислителя и горючего, установленные на входе в двигатель и состоящие из шнекового насоса и турбины.

25 августа 1980 г. состоялся первый огневой пуск двигателя, характеристики которого превышали все ранее достигнутое как в отечественном, так и в зарубежном ракетном двигателестроении. 9 июня 1981 г. наконец состоялось первое успешное полноресурсное испытание двигателя (150 с) на режиме с тягой 700 т. Но только 1 декабря 1984 г. удалось провести успешное испытание двигателя РД-171 в составе первой ступени РН «Зенит» на стенде в НИИ Химмаш. В декабре 1987 г. комплекс «Зенит» был принят специальной Государственной комиссией в эксплуатацию. С этого момента начались штатные запуски этой ракеты.

Эксплуатация двигателя РД-171 в составе РН «Зенит» проводилась также по программе «Морской старт». Была проведена модернизация РД-171 для повышения надежности (РД-171М) (рис. 5) и РД-120 с тягой в пустоте, увеличенной до 93 тс (вместо 85 тс). Эти двигатели были основой для реализации международных программ «Морской старт» и «Наземный старт». Специалистом, ответственным за разработку двигателя РД-120, в НПО

Энергомаш был ведущий конструктор В.К. Чванов, который в дальнейшем стал главным конструктором этого двигателя, а затем и первым заместителем генерального директора, главным конструктором предприятия.

Остановимся на некоторых основных особенностях создания двигателя РД-120 – маршевого двигателя второй степени РН «Зенит» и всех его модификаций. Были предъявлены особо жесткие требования к надежности: нижняя граница математической оценки надежности ЖРД должна быть не ниже 0.992; каждый экземпляр двигателя должен проходить ресурсное контрольно-технологическое огневое испытание без последующей переборки; гарантированный ресурс двигателя должен составлять не менее пяти рабочих ресурсов сверх штатного.

Двигатель РД-120 с самого начала проектировался на тягу 85 тс. Удельный импульс тяги ограничивался степенью расширения сопла камеры, а именно давление газов в камере определялось прочностными возможностями использовавшихся прототипов агрегатов подачи компонентов топлива, а диаметр среза сопла лимитировался имевшимися в отрасли печами для пайки. Был достигнут уровень удельного импульса тяги в пустоте 350 с.

Летно-конструкторские испытания двигателя РД-120 в составе РН «Зенит» начались 13 апреля 1985 г. и закончились 28 августа 1987 г. Наиболее сложной частью доводки двигателя РД-120 явилась отработка оптимальных условий его запуска. При последующей стендовой отработке двигателя РД-120, которая была в основном проведена в Приморском филиале НПО Энергомаш, были выявлены и устранены все конструкторские и технологические недостатки, отработаны все эксплуатационные требования. После успешного проведения доводки двигатель получил «путевку» на испытания совместно со ступенью ракеты.

Со всеми доработками двигатель прошел полный объем стендовых и летных испытаний и в результате показал себя одним из наиболее надежных в отечественной ракетной технике. Изготовление экспериментальных двигателей РД-120 проводилось на опытном заводе Энергомаш с начала отработки до конца 1982 г. Затем производство было передано в ПО «Южмашзавод» (Днепропетровск).

В конце 90-х гг. началась разработка модернизированного варианта двигателя РД-120. Тяга двигателя была форсирована до 93 тс; четыре двигателя прошли 28 огневых испытаний с наработкой 8135 с. Первый пуск РН «Зенит» с форсированным двигателем РД-120 успешно выполнен по программе «Морской старт» 10 июня 2003 г., с тех пор на всех пусках

РН «Зенит» использовались модернизированные двигатели РД-120.

Таким образом, в ходе разработки двигателей РД-170/171 и РД-120 была создана основа для нового поколения кислородно-керосиновых двигателей (РД-170, РД-171, РД-120, РД-180, РД-171М, РД-191, РД-181 и др.), которые работали, работают и в будущем будут надежно работать в составе космических ракет-носителей нашей страны и других государств.

К сожалению, в 2014 г. практически завершилось использование РН «Зенит» с двигателями РД-171М и РД-120, поэтому прекратилось изготовление двигателей РД-171М на НПО Энергомаш. Но мы надеемся, что новые модификации этих двигателей будут востребованы для создания сверхтяжелых космических РН нашей страны.

С 1990 г. НПО Энергомаш начало активную деятельность по поиску партнеров на международном рынке. При поддержке и одобрении Правительства РФ были установлены контакты с фирмами Франции, Англии и США, в результате чего в 1996 г. НПО Энергомаш приступило к разработке двигателя РД-180 для модернизируемой РН «Атлас» (США).

Решение о выборе двигателя РД-180 было принято по результатам конкурса, устроенного компанией «Локхид-Мартин» в 1995 г. В конкурсе, кроме РД-180, участвовал кислородно-керосиновый двигатель MA-5D фирмы «Rocketdyne» и российский двигатель НК-33 НПП «Труд» из Самары.

Победу в конкурентной борьбе одержал РД-180, что в значительной мере определялось его основными характеристиками: *удельным импульсом*; достижение высокого импульса было обеспечено за счет высокого уровня давления в камере сгорания, а также за счет совершенства системы смесеобразования топлива в смесительной головке камеры; *широким диапазоном изме-*

нения тяги – от 100% до 47%, что обеспечило возможность использования двигателя РД-180 для всего семейства РН «Атлас». В процессе отработки двигателя РД-180 продемонстрирована возможность длительной (> 300 с) устойчивой работы в режиме 40% тяги [3].

Разработка двигателя РД-180, в целом, была проведена двигательным отделом (главный конструктор Ф.Ю. Челькис, заместитель главного конструктора, начальник отдела В.И. Семенов) под руководством генерального директора и генерального конструктора Б.И. Каторгина. Двигатель РД-180 представляет собой двухкамерный ЖРД с вертикально расположенным турбо-насосным агрегатом. В процессе проведения работ по созданию РД-180 были найдены более совершенные, чем на двигателе РД-171, решения по ряду агрегатов, что было подтверждено при их автономных испытаниях и при огневых испытаниях двигателя. За разработку и внедрение на мировой рынок двигателя РД-180 ведущим специалистам НПО Энергомаш Б.И. Каторгину, В.К. Чванову, С.С. Головченко, В.Н. Худякову, Ф.Ю. Челькису и В.И. Семенову была присуждена Государственная премия РФ.

С 2000 г. полеты американских РН «Атлас 3» и «Атлас 5» выполняются с помощью двигателей РД-180 разработки НПО Энергомаш. Эти двигатели серийно изготавливаются в НПО Энергомаш и с 1999 г. поставляются в США. К лету 2017 г. поставлено около 100 двигателей РД-180 и успешно выполнено 77 пусков РН Атлас с РД-180.

Разработка двигателя РД-180, проведенная в сжатые сроки, позволила НПО Энергомаш начать создание однокамерного ЖРД РД-191 на компонентах кислород+керосин с тягой на номинальном режиме: на земле 196 тс, в пустоте – 212.6 тс для унифицированного разгонного блока первой ступени нового семейства российских РН «Ангара».

Работы по ЖРД РД-191 начались в конце 1998 г. Этот однокамерный двигатель выполнен по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа и заимствует от прототипов камеру и ряд агрегатов автоматики. Остальные агрегаты и технические решения применены впервые, благодаря чему он имеет способность глубокого дросселирования (до 27% от номинальной тяги), уникальной для маршевых двигателей первой ступени.

В течение 1999 г. была выпущена конструкторская документация, в 2000 г. начата автономная отработка агрегатов двигателя РД-191, завершена подготовка производства. В мае 2001 г. собран первый доводочный двигатель РД-191. Первое огневое испытание двигателя РД-191 проведено в июле 2001 г.

30 июля 2009 г. в Научно-испытательном центре ракетно-космической промышленности было успешно проведено первое огневое испытание универсального ракетного модуля УРМ-1 с ЖРД РД-191 в рамках программы создания РН «Ангара». 25 августа 2009 г. состоялся пуск первой южнокорейской РН КСЛВ-1 («Наро»). В составе первой ступени российского производства этой РН успешно отработал двигатель РД-151 – аналог ЖРД РД-191 разработки и производства НПО Энергомаш. В 2010 и 2014 г. были выполнены второй и третий пуски этой РН. Замечаний к работе двигателей первой ступени разработки и производства НПО Энергомаш в этих пусках не имелось. Нарботка в трех пусках на РН КСЛВ-1 составила 607.4 с.

17 мая 2011 г. был подписан акт Межведомственной комиссии об успешном завершении разработки ЖРД РД-191 для семейства РН «Ангара», открывающий путь к серийному производству двигателя. 9 июля 2014 г. был выполнен первый пуск РН «Ангара 1.2ПП» с РД-191, а 23 декабря 2014 г. – первый пуск РН «Ангара 5» с пятью РД-191.

Испытания в составе ступени, работа двигателя при пусках РН КСЛВ-1 и РН «Ангара» стали подтверждением конструкторских возможностей КБ, сохранения традиций школы В.П. Глушко, технологических и производственных возможностей предприятия, способности на собственной испытательной базе проводить уникальные испытания двигателей в процессе их разработки, доводки и сертификации.

НПО Энергомаш на базе кислородно-керосиновых ЖРД нового поколения разработало в конце 1980-х – начале 1990-х гг. проект трехкомпонентного ЖРД РД-704 для перспективной авиационно-космической системы МАКС.

Такой двигатель позволял на начальном этапе выведения (1-й режим) использовать плотное

топливо кислород+керосин с добавкой водорода, обеспечивающее существенное повышение удельного импульса, а на заключительном участке выведения (потребная тяга на котором существенно ниже) – топливо кислород+водород (2-й режим), имеющее максимальную энергетическую эффективность (удельный импульс). Таким образом, реализация в рамках единой конструкции двух режимов работы двигателя позволяла оптимизировать массово-габаритные характеристики орбитального самолета. Впервые для трехкомпонентного двигателя было предложено использовать камеру, смесительная головка которой обеспечивала горение трех компонентов в общем объеме камеры с последующим переходом на двухкомпонентный режим.

В НПО Энергомаш был разработан экспериментальный трехкомпонентный двигатель и впервые в мире проведены его огневые испытания на стенде в Научно-исследовательском институте химического машиностроения (09.08.1994 г.). Их результаты подтвердили возможность реализации высокоэффективного процесса горения трехкомпонентного топлива с достижением коэффициента полноты сгорания топлива до значений, близких к параметрам для кислородно-водородного топлива. Впервые экспериментальными исследованиями была подтверждена возможность сгорания трех компонентов в одном огневом пространстве с достижением высокой эффективности горения, что доказывает принципиальную возможность создания нового поколения ЖРД.

В НПО Энергомаш сейчас ведутся теоретические исследования различных вариантов схем системы подачи, оптимизации конструктивной схемы камеры, а также отдельных агрегатов.

В итоге можно констатировать, что задел, созданный в НПО Энергомаш по трехкомпонентному двигателю, позволяет провести его разработку в достаточно короткие сроки.

Ярким примером максимально быстрого создания двигателя для перспективной РН является история создания двигателя РД-181. В конце 2014 г. АО «НПО Энергомаш» заключило контракт с американской компанией «Orbital Sciences Corporation» (затем «Orbital ATK») на поставку в США двигателей РД-181 производства НПО Энергомаш.

Двигатель РД-181 в инициативном порядке был разработан специально для использования на модернизированной РН «Антарес». РД-181 – это модификация двигателя РД-191, обеспечившего успешные первые пуски РН семейства «Ангара» в июле и декабре 2014 г. с космодрома Плесецк, но учитывающий особенности интерфейсов РН «Антарес».

Два РД-181 составляют двигательную установку первой ступени РН «Антарес». В производстве РД-181 используются современные материалы, новые технические и конструкторские решения. Использование РД-181 позволит доставлять значительно большие грузы на МКС и на низкие орбиты.

В очень короткие сроки была выпущена конструкторская документация, проведена подготовка производства, агрегаты сертификационного двигателя РД-181 прошли автономные испытания, изготовлен двигатель, на котором уже в апреле–мае 2015 г. успешно проведены сертификационные испытания. В процессе испытаний подтверждено соответствие характеристик и надежности двигателя требованиям заказчика. В июне 2015 г. в США поставлены первые двигатели. В октябре 2016 г. состоялся первый пуск усовершенствованной РН «Антарес» с двигателями РД-181, их производство и поставка в США продолжаются.

Сфера перспективных разработок НПО Энергомаш включает создание новых модификаций ЖРД, таких как РД-175 с тягой до 1000 тс для сверхтяжелых РН, РД-193 для модификации РН «Союз» и ряд других.

В перспективе семейство кислородно-керосиновых ЖРД АО «НПО Энергомаш» предоставляет возможность проектировать с их использованием практически любую РН от легкого класса до тяжелого и сверхтяжелого классов на базе максимальной унификации технических решений и минимизации издержек [4].

Предприятия интегрированной структуры ракетного двигателестроения успешно осуществляют непосредственное сотрудничество с крупными зарубежными аэрокосмическими корпорациями, такими как «Pratt&Whitney», «Lockheed Martin», «ULA», «Orbital ATK» и другими. Продолжаются поставки дви-

гателя РД-180, с помощью которого успешно выполнено 77 пусков американских РН семейства «Атлас 5». Готовятся новые пуски американской РН «Антарес 230» с двигателями РД-181. Двигатели разработки АО Энергомаш в составе иностранных ракет надежно выводят различные космические аппараты, обеспечивают доставку грузов к МКС и вывод новых пилотируемых ко-

раблей; сотрудничество нацелено на длительную перспективу.

АО «НПО Энергомаш» и другие предприятия интегрированной структуры ракетного двигателестроения открыты для любых форм сотрудничества в сфере высоких технологий, например в наукоемких проектах, направленных на укрепление российских позиций в мировом ракетном двигателестроении и развитие международного сотрудничества в области космических инноваций.

Литература

1. **В.П. Глушко**
Развитие ракетостроения и космонавтики в СССР, Москва, Машиностроение, 1987, 305 с.
2. *Космонавтика: Энциклопедия*, под ред. В.П. Глушко, Москва, Советская энциклопедия, 1985, 528 с.
3. *НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. Путь в ракетной технике*, под ред. Б.И. Каторгина, Москва, Машиностроение, Машиностроение-Полет, 2004, 488 с.
4. *НПО Энергомаш: 85 лет со дня основания*, Москва, Химки, Изд. «Оружие и технологии», 2014, 103 с.

English

Powerful Liquid-Propellant Rocket Engines Development in JSC “NPO Energomash”

Igor A. Arbuzov

Director-General of Glushko NPO Energomash
1, Burdenko Str., Khimky, Moscow region, 141400, Russia
energo@npom.ru

Petr S. Levochkin

Glushko NPO Energomash
1, Burdenko Str., Khimky, Moscow region, 141400, Russia
energo@npom.ru

Vladimir K. Chvanov

Professor, Glushko NPO Energomash
1, Burdenko Str., Khimky, Moscow region, 141400, Russia
energo@npom.ru

Vyacheslav F. Rakhmanin

Glushko NPO Energomash
1, Burdenko Str., Khimky, Moscow region, 141400, Russia
energo@npom.ru

Boris I. Katorgin

Academician,
Glushko NPO Energomash
1, Burdenko Str., Khimky, Moscow region, 141400, Russia
energo@npom.ru

Vladimir S. Sudakov

Glushko NPO Energomash
1, Burdenko Str., Khimky, Moscow region, 141400, Russia
energo@npom.ru

Abstract

In this paper results of development of powerful liquid-propellant rocket engines (LPRE) at JSC “NPO Energomash” are discussed. Information on engines developments for the first space launch vehicles of the R-7 and “Proton” series in the fifties and sixties of the last century is presented. The new generation of oxygen-kerosene LPREs development for launch vehicles “Energia”, “Zenit”, “Atlas 5”, “Angara” is described. The authors provide information on the LPRE promising developments for new generations of space launch vehicles and the benefits of use the existing series of liquid propellant rocket engines based on the RD-170/171 for new launch vehicles.

Keywords: liquid-propellant rocket engine, turbopump unit, launch vehicle, gas generator, combustion chamber.

Images & Tables ●



Fig. 1. RD-107 liquid-propellant rocket engine.



Fig. 2. "Proton" launch vehicle.



Fig. 3. RD-253 liquid-propellant rocket engine.



Fig. 4. "Energia" – "Buran" rocket-space system.



Fig. 5. RD-171M liquid-propellant rocket engine.

References ●

1. V.P. Glushkov *Development of Rocketry and Astronautics in the USSR [Razvitie raketostroeniya i kosmonavтики v SSSR]*, USSR, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 208 pp. (in Russian).
2. *Cosmonautics: Encyclopedia, [Kosmonavtika: Entsiklopediya]*, Ed. V.P. Glushko, USSR, Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1985, 528 pp. (in Russian).
3. V.P. Glushko NPO Energomash. *Way in Rocket Engineering, [NPO Energomash imeni akademika V.P. Glushko. Put v raketnoy tekhnike]*, Ed. B.I. Katorgin, RF, Moscow, Mashinostroenie, Mashinostroenie-Polet Publ., 2004, 488 pp. (in Russian).
4. NPO Energomash: *85 Years Since the Founding, [NPO Energomash: 85 let so dnya osnovaniya]*, RF, Moscow, Khimki, "Oruzhie i tekhnologii" Publ., 2014, 104 pp. (in Russian).

Опыт и перспективы создания бортовых алгоритмов управления движением космических аппаратов*

Е.А. Микрин, С.Н. Тимаков, А.В. Сумароков, К.А. Богданов,
А.В. Жирнов, А.В. Зыков

В статье рассматриваются вопросы синтеза бортовых алгоритмов управления движением космических аппаратов (КА) как в историческом аспекте, так и с современной точки зрения. На конкретных примерах демонстрируются преимущества адаптивного подхода, применяемого в настоящее время разработчиками бортового математического обеспечения. Излагаются принципы построения перспективных автономных систем управления движением группировок КА с вращающимися солнечными парусами с помощью сил и моментов сил светового давления.

Ключевые слова: бортовой вычислительный комплекс, кластер, система ориентации и навигации, адаптивный наблюдатель, группировка КА.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 15-08-01795, 17-08-01635, 09-01-13513, 12-08-00254, 16-38-00458 и 16-38-00910).

Введение

Одна из наиболее ярких страниц истории нашего государства – начало эры освоения космического пространства – неразрывно связана с именем Сергея Павловича Королева, первого главного конструктора ракетно-космических систем. 12 января 2017 г. страна отметила 110-летие со дня рождения основоположника практической космонавтики академика С.П. Королева.

Королев – это «сплав» холодного рационализма, творческой фантазии и железной воли в достижении намеченных целей. Благодаря этим качествам и несмотря на все удары судьбы, выпавшие на долю этого человека, именно он открыл дорогу к звездам для всего человечества и именно ему больше, чем

кому-либо другому, принадлежит заслуга в том, что космический век стал реальностью. Все, кому посчастливилось с ним работать, признавали его организаторский талант, эрудицию, живой аналитический ум, феноменальную память и поразительную работоспособность. И все-таки, если попробовать выделить в человеке то самое главное, что легло в основу многих его идей и разработок, то надо сказать: крупнейший ученый и выдающийся конструктор умел и любил мечтать, обгоняя время, забегая вперед своего века. Широта взглядов Королева на будущее космонавтики, воспитанная с первых шагов его инженерной деятельности, способствовала тому, что каждую новую разработку он рассматривал не локально, а с позиций далекой перспективы. Этому направлению развития ракетно-космической техники Сергей Павлович оставался верен на протяжении всей своей творческой деятельности.

Наряду с величайшими достижениями в науке и технике С.П. Королев подготовил целую плеяду ученых и специалистов, которые продолжили



МИКРИН
Евгений Анатольевич
академик, профессор,
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



ТИМАКОВ
Сергей Николаевич
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



СУМАРКОВ
Антон Владимирович
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



БОГДАНОВ
Кирилл Андреевич
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



ЖИРНОВ
Алексей Владимирович
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



ЗЫКОВ
Александр Владимирович
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева

его дело. Создание советской школы ракетостроения – только часть вклада Королева в исследование и освоение космического пространства. Вся его жизнь – пример настойчивого и терпеливого подбора, воспитания и учебы коллективов высшей квалификации, технически смелых и самоотверженно преданных делу специалистов.

Непреходящее творческое наследие С.П. Королева находит свое продолжение и в современной российской космонавтике, развитый им комплексный и в то же время детальный системный подход к проектированию ракетно-космических систем является основополагающим для разработчиков новых перспективных проектов отечественной космонавтики [1].

Со времени выдающегося достижения отечественной космонавтики – запуска первого искусственного спутника Земли – прошло 60 лет. Это событие явилось результатом плодотворной деятельности ряда научных коллективов, объединенных руководителями отечественной космической программы С.П. Королевым и М.В. Келдышем в единую команду. Эти два выдающихся ученых предприняли в свое время беспрецедентные организационные усилия. Проявив блестящую научную эрудицию и прозорливость, они четко сформулировали задачи на долгую перспективу и поставили их перед объединенными общей идеей коллективами талантливых специалистов и энтузиастов ракетно-космической техники. Благодаря эффективной деятельности этих коллективов уже через три с половиной года человечество дерзнуло впервые выйти в космическое пространство. 12 апреля 1961 г. Юрий Гагарин на космическом корабле «Восток-1» совершил свой триумфальный полет. Между этими двумя эпохальными событиями произошло еще одно – запущенная 4 октября 1959 г., ровно через два года после запуска первого искусственного спутника Земли, межпланетная автоматическая станция «Луна-3» сфотографировала обратную сторону Луны и стала первым космическим аппаратом, снабженным активной системой ориентации. Решающий вклад в решение этой грандиозной по тем временам задачи, несомненно, принадлежал коллективам научных школ и конструкторских бюро, привлеченных С.П. Королевым и М.В. Келдышем по прикладной небесной механике и управлению движением космических аппаратов. Среди таких коллективов была группа Б.В. Раушенбаха. Работы Б.В. Раушенбаха и Е.Н. Токаря по динамике движения искусственных спутников вокруг их центра масс легли в основу проектирования первых активных систем ориентации и стабилизации космических аппаратов. Эти системы были созданы по принципиально новой

идеологии и не имели прототипов ни в Советском Союзе, ни в мире.

Примененная на космическом аппарате «Луна-3» система ориентации была сравнительно простой. Она состояла из двух групп оптических датчиков (солнечных и лунного), гироскопических датчиков угловых скоростей, логического блока и системы реактивных двигателей, работавших на сжатом азоте, т.е. содержала все основные элементы систем ориентации. Управление этой системой, как и фотоаппаратурой, телевизионными и другими устройствами осуществлялось как по командной радиолинии, так и от бортовой автоматики, содержащей программно-временные устройства. Автоматическая станция «Луна-3» стала, выражаясь принятой в наши дни терминологией, первым космическим аппаратом (КА) дистанционного зондирования. Миссия «Луна-3» положила начало бурно развивающемуся направлению практической космонавтики – теории автономного управления движением КА, а работы основоположников этого направления не потеряли своей актуальности до нашего времени и послужили началом целой серии подобных исследований как у нас в стране, так и за рубежом [1].

Следующим крупным шагом в развитии автономного управления движением КА стало использование бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) в системах управления КА. Введение в состав контура управления БЦВМ, с одной стороны, положило начало сложной и кропотливой работе – разработке бортового программного обеспечения систем управления движением и навигации КА, с другой – открыло широчайшие возможности для создания принципиально новых алгоритмов управления движением, обеспечивающих более высокое качество выполнения траекторных и угловых маневров КА.

Если рассматривать возможности применения БЦВМ в более широком

аспекте, а именно для автономного управления всеми бортовыми системами КА, включая целевую аппаратуру и систему обеспечения жизнедеятельности, сбор и передачу на наземные станции телеметрической информации, прием и исполнение командных сигналов с наземных пунктов слежения, то без преувеличения можно констатировать, что внедрение БЦВМ в бортовой комплекс управления КА, а позднее и кластеров (бортовой кластер – группа компьютеров, функционирующих в бортовом комплексе управления Международной космической станции (МКС), объединенных высокоскоростными каналами связи) [2] стало революционным шагом в развитии космонавтики [3, 4].

Возвращаясь к применению БЦВМ для управления движением КА, необходимо отметить, что совершенствование систем управления КА и орбитальными станциями с целью расширения областей их применения и продления ресурса их активного функционирования является основой конкурентоспособности разрабатываемых изделий, поэтому проектирование систем управления с более высокими качественными показателями всегда было, есть и будет оставаться актуальной задачей. Эти показатели достигаются как улучшением характеристик датчиковой аппаратуры, повышением качества исполнительных органов, так и применением новых математических методов в разработке бортовых алгоритмов управления.

Адаптивные системы управления

По мере возрастания вычислительных мощностей бортовых компьютеров открываются новые возможности реализации все более сложных алгоритмов управления с целью достижения более высоких технических характеристик КА, таких как точность стабилизации, минимизация расхода топлива, продление ресурса активного функционирования. Современные

требования диктуют необходимость обеспечения этих характеристик в условиях нестационарности, стохастичности, а порой и полной неопределенности параметров объекта управления и среды полета. Требуемые точностные характеристики должны быть достигнуты, несмотря на наличие случайных и систематических ошибок в каналах измерений, к тому же часто приходится решать задачу управления при неполном составе измерений.

Одним из актуальных направлений разработки алгоритмов управления движением летательных аппаратов, обеспечивающих повышение их эффективности, надежности, экономичности и долговечности в условиях параметрической неопределенности объекта управления и непредсказуемых изменений характеристик среды является адаптивный подход. Суть этого подхода заключается в одновременном изучении объекта и управлении им в автономном режиме. При этом необходимо особо подчеркнуть, что процессы изучения и управления протекают параллельно в режиме реального времени, а сам алгоритм адаптации является звеном контура регулирования. С точки зрения современной теории управления изучение объекта сводится к решению задач идентификации [5, 6]. Под идентификацией объекта управления в данной статье понимается определение параметров объекта при одновременной оценке его вектора состояния. Параметрами являются коэффициенты передаточных функций, дифференциальных или конечно-разностных уравнений, описывающих объект управления и среду в пространстве состояний, а компонентами вектора состояния – переменные этих уравнений.

Идеи адаптивного подхода в теории управления начали формироваться в конце сороковых, в начале пятидесятих годов прошлого века применительно к управлению реактивными самолетами и ракетоносителями. Эти идеи достаточно полно были представлены в работах Чарльза Дрейпера (C.S. Draper), В. Ли (V.T. Li), Г. Вайтеккера (H.P. Whitakker) и других сотрудников лаборатории авиационной автоматики Массачусетского технологического института [7, 8]. Динамика реактивных самолетов и ракет претерпевает большие изменения в результате значительных вариаций плотности атмосферы и скорости полета, что сказывается на эффективности аэродинамических рулей. Для парирования резких изменений динамических характеристик летательных аппаратов потребовалось введение в систему управления специальных контуров, автоматически изменяющих коэффициенты обратной связи и, как следствие, компенсирующих потерю эффективности рулей управления. Позднее такие системы получили название адаптивных систем управления с эта-

лонной моделью [5]. Главной задачей адаптивного управления с бортовой эталонной моделью является автоматический поиск экстремального (оптимального) режима функционирования и удержание динамического поведения объекта управления вблизи фазовой траектории, задаваемой эталонной моделью, несмотря на внешние возмущения и другие факторы, противодействующие реализации такого поведения.

Согласно принятой в настоящее время терминологии различают два класса адаптивных систем. Первый класс известен под названием адаптивных систем с настраиваемыми моделями. Он характеризуется тем, что настройке (идентификации), как правило, подлежат коэффициенты матричных передаточных функций и уравнений, описывающих настраиваемую бортовую модель динамического поведения объекта управления и применяется для управления объектами с зашумленными входными сигналами при неполном составе измерений с целью получения оценок полного вектора состояния объекта. Далее в соответствии с заданным алгоритмом управления по этим оценкам формируется управляющий сигнал на исполнительные органы для целенаправленного приведения объекта управления к требуемому состоянию. Второй класс – адаптивные системы с эталонными моделями – применяется для настройки коэффициентов уравнений описывающих собственно систему управления. В ответ на непредсказуемые изменения параметров окружающей среды, в частности среды полета летательного аппарата, контур адаптации, ориентируясь на выходные переменные функционирующей на борту эталонной модели, подстраивает коэффициенты обратной связи и другие параметры системы управления, минимизируя рассогласование между динамическим поведением реального объекта управления и его бортовой эталонной моделью. Настройка этих бортовых моделей основана на применении в режиме реального времени метода градиентного спуска.

Такое разделение адаптивных систем управления на классы сложилось исторически. В настоящее время при необходимости алгоритмы с настраиваемыми и эталонными бортовыми моделями могут применяться одновременно. Примером такого подхода может служить система управления орбитальной трехосной ориентацией аппаратов «Ямал-200» с помощью маховиков [9]. Эта система управления применялась в связи с отказами гироскопических измерителей вектора угловой скорости (ГИВУС) и невозможностью использования показаний звездных датчиков из-за солнечных вспышек. В качестве эталонной модели в алгоритме управления резервными режимами ориентации исполь-

зовалась эталонная модель поведения *невозмущаемой гиросистемы* [10, 11], а в качестве настраиваемой бортовой модели эмулировалась динамика объекта управления с идентификацией момента трения в подшипниках маховиков. В этом режиме на инерционные исполнительные органы (маховики) подаются рассчитанные в контуре адаптации по навигационной информации такие управляющие воздействия, при которых вектор кинетического момента системы маховиков остается постоянным в инерциальном пространстве [12]. Система маховиков при этом эмулирует поведение свободного гироскопа. В силу закона сохранения кинетического момента всего объекта управления (корпус аппарата плюс маховики) в отсутствие начальных ошибок орбитальной трехосной ориентации и пренебрежимо малых внешних возмущающих моментов спутник продолжает сохранять ее в течение часа. Учет возмущающих моментов в контуре адаптации позволяет продлить поддержание трехосной орбитальной ориентации до нескольких часов [13]. Другими словами в резервных режимах ориентации инерционные исполнительные органы (маховики) используются в качестве инерциальных датчиков первичной информации.

Ниже приводится описание двух алгоритмов с настраиваемыми и эталонными бортовыми моделями: нелинейного полосового фильтра, разработанного для фильтрации упругих колебаний конструкции МКС, и адаптивной системы управления спутника связи серии «Ямал-200».

Использование адаптивного наблюдателя в контуре управления МКС в качестве самонастраиваемого полосового фильтра

Структура фильтра построена по схеме адаптивного наблюдателя с настраиваемой бортовой моделью

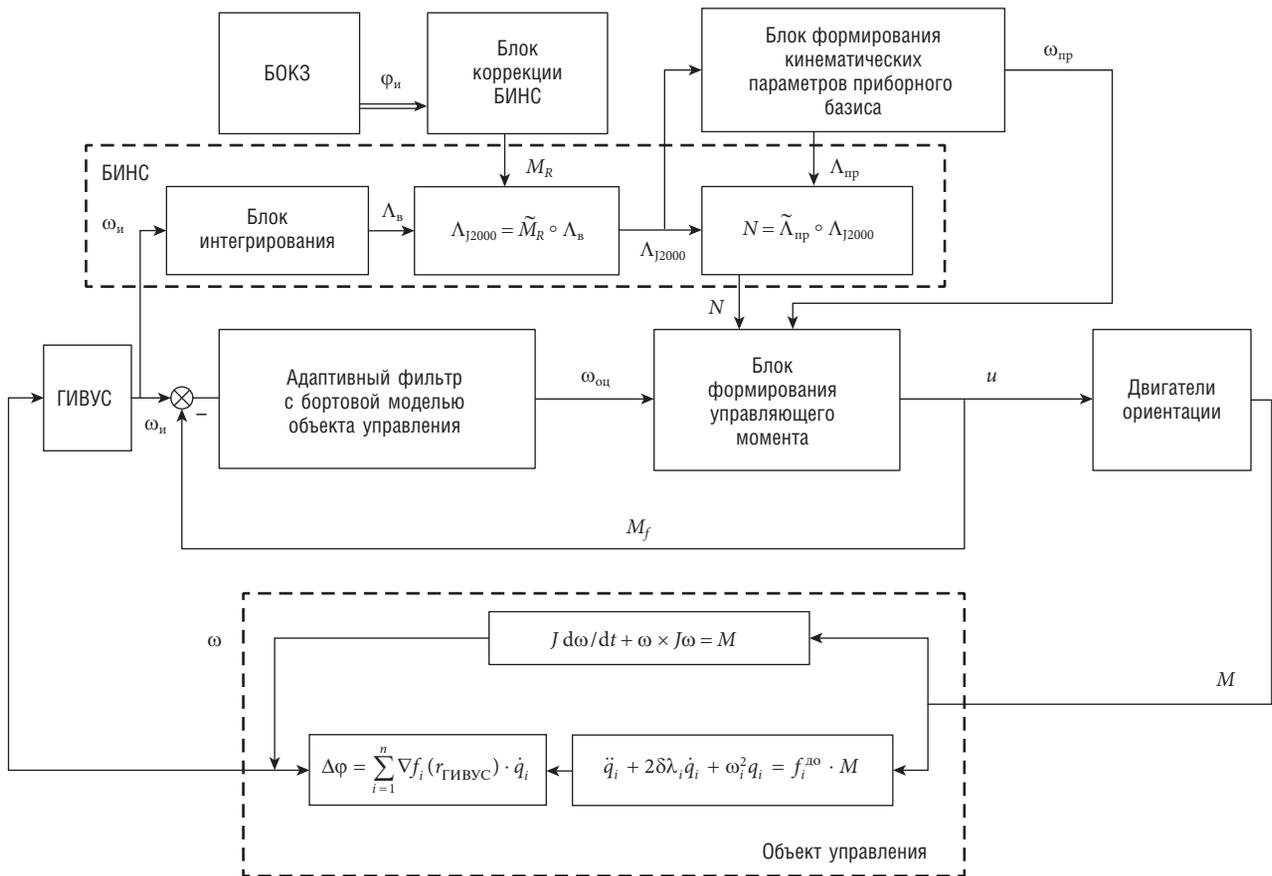


Рис. 1. Блок-схема системы управления угловым движением МКС.

Обозначения: ω – абсолютная угловая скорость КА как твердого тела; ω_u – измерения абсолютной угловой скорости КА; J – тензор инерции КА; M – управляющий момент от двигателей ориентации; u – управляющий сигнал на двигатели; $\omega_{оц}$ – оценка угловой скорости движения КА наблюдателем; M_f – бортовой прогноз создаваемого управляющего момента; M_f – бортовой прогноз создаваемого управляющего момента; φ_u – измерения угловых рассогласований в измерительных каналах блока определения координат звезд (БОКЗ); Λ_{J2000} – кватернион поворота от инерциальной системы координат J2000 к связанному с КА базису; кватернион Λ_v определяется следующим кинематическим соотношением: $2\Lambda_v = \Lambda_v \circ \omega_{оц}$; M_R – кватернион поворота от инерциальной бортовой системы координат (ИСК БИНС) к фактической J2000 на момент измерения угловых рассогласований в связанной системе координат относительно орбитальной; $\Lambda_{пр}$ – кватернион разворота от инерциальной системы координат J2000 к приборному базису, которым, в частности, может быть орбитальная система координат; N – командный кватернион, по которому формируется управляющее воздействие на двигатели ориентации; $\omega_{пр} = [0; 0; \omega_{оц}]^T$ – угловая скорость приборной системы координат, например угловая скорость движения орбитального базиса в инерциальном пространстве; знак « \circ » обозначает операцию кватернионного умножения; знак « \sim » над кватернионом обозначает сопряженный кватернион. Подробное описание кинематических соотношений в кватернионной форме приводится в работе [20]; $\Delta\varphi$ – упругие добавки к угловым скоростям КА; δ – логарифмический декремент колебаний; λ_i – собственная частота i -го тона упругих колебаний конструкции; $\omega_i = 2\pi\lambda_i$ – круговая собственная частота i -го тона упругих колебаний конструкции; q_i – i -я ортогональная координата каждого тона колебаний в n -мерном пространстве; \dot{q}_i , \ddot{q}_i – первая и вторая производные q_i ; f_i – векторная форма углового перемещения по i -му тону упругих колебаний конструкции в местах установки двигателей ориентации ($f_i^{до}$) и измерителей угловой скорости $f_i(r_{ГИВУС})$.

объекта управления, причем целью адаптации для описываемого наблюдателя является выделение из сигналов с ГИВУС составляющих, соответствующих угловой скорости станции как твердого тела, и составляющих, обусловленных упругими колебаниями конструкции. Такая схема была выбрана по причине постоянно изменяющихся инерционно-массовых и жесткостных характеристик конструкции МКС в процессе ее сборки на орбите. Кроме того, на момент разработки системы управления движе-

ем станции эта схема была отработана в контурах управления движением станции «МИР» и спутника «Ямал-100» [14]. Она также применялась при проведении эксперимента «Знамя-2» для активного демпфирования колебаний вращающегося пленочного диска диаметром 20 м, прикрепленного с помощью карданной вставки к корпусу грузового корабля «Прогресс» [15, 16].

Идентификация параметров бортовой модели станции и оценка ее вектора состояния осуществляются на фоне выполнения МКС различных динамических режимов, при этом никаких тестовых включений двигателей не требуется. Первичная информация об упругих колебаниях содержится в сигналах с датчиков угловой скорости в виде осцилли-

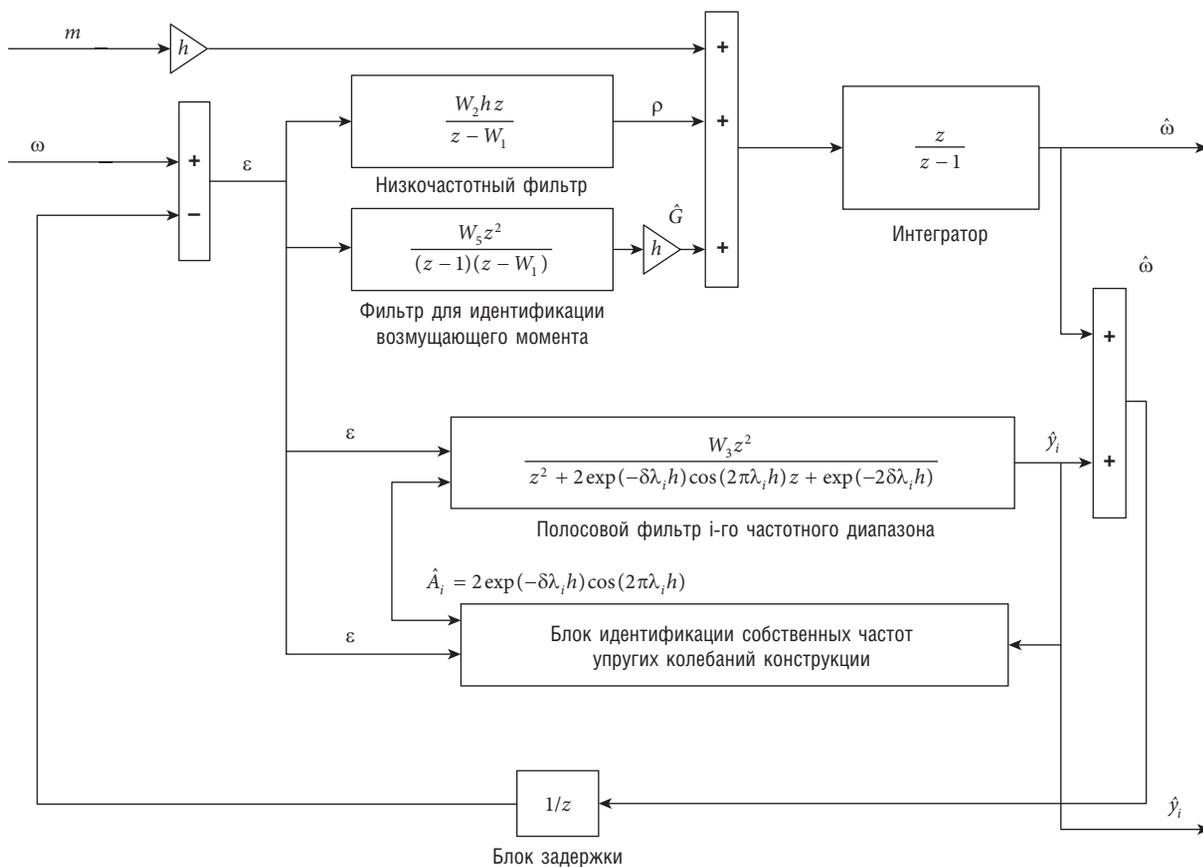


Рис. 2. Блок-схема адаптивного полосового фильтра.

Обозначения: z – операция z -преобразования; ω – измеренная угловая скорость; t – управляющее ускорение; $\hat{\omega}$ – оценка угловой скорости как твердого тела; ε – невязка; ρ – интегральная невязка или невязка, пропущенная через низкочастотный фильтр; \hat{y}_i – оценки скорости трех доминирующих тонов упругих колебаний конструкции; h – период квантования по времени; \hat{G} – оценка слабо меняющегося возмущающего ускорения; $\hat{A}_i = 2 \exp(-\delta\lambda_i h) \cos(2\pi\lambda_i h)$ – функция оцениваемой частоты упругих колебаний; λ_i – частоты упругих колебаний, $\delta = 0.05$ – логарифмический декремент, W_k – весовые коэффициенты.

рующих составляющих. Бортовая модель динамики углового движения объекта управления, функционирующая в контуре адаптации фильтра, включает в себя динамику объекта управления как твердого тела, а также динамику его упруго деформируемой конструкции. Настройка бортовой модели осуществляется методом градиентного спуска. Параметрами модели, подлежащими идентификации, являются собственные частоты трех доминирующих тонов упругих колебаний конструкции и вектор слабо меняющегося возмущающего момента. Оцениваемыми компонентами вектора состояния являются компоненты угловой скорости объекта управления как твердого тела и компоненты векторов состояния трех доминирующих тонов упругих колебаний конструкции. Анализ сходимости оценок в контуре адаптации фильтра и динамической устойчивости объекта управления с настраиваемой моделью в целом основан на модифицированной для систем ММО модальной методике [17]. По оценкам компонент вектора состояния, описывающих динамику объекта управления как твердого тела, формируются управляющие сигналы на исполнительные органы, а по оценкам переменных, описы-

вающих амплитуду и фазу упругих колебаний (в случае необходимости), – управляющие сигналы для активного демпфирования на те же исполнительные органы. Более подробное описание законов управления активным демпфированием колебаний конструкции КА при одновременном управлении угловыми маневрами объекта управления приведено в работах [18, 19].

Контур управления угловым движением российского сегмента МКС построен по схеме бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) [20]. Блок-схема системы управления представлена на рисунке 1.

Описание адаптивного наблюдателя

Настраиваемая бортовая модель (рис. 2) содержит модели доминирующих мод движения, включая моду

движения объекта управления как твердого тела. Модель каждой моды движения содержит в цепи обратной связи блок идентификации параметров модели. Идентификация осуществляется итерационным методом градиентного спуска. Функция штрафа берется в виде положительно определенной квадратичной формы от невязок. Кроме невязки, на вход модели каждой моды движения и на вход каждого блока настройки модели подается сигнал от исполнительных органов. Эти сигналы эмулируют фактические управляющие воздействия исполнительных органов на объект управления.

Невязка – ошибка $\varepsilon(n)$, которая используется для оценки вектора состояния и адаптивной коррекции бортовой модели на n -ом такте, формируется по принципу отрицательной обратной связи как разность между измеренной угловой скоростью ω и суммой выходных переменных бортовой модели:

$$\varepsilon(n) = \omega(n) - [\hat{\omega}(n) + \hat{y}_1(n) + \hat{y}_2(n) + \hat{y}_3(n)], \quad (1)$$

где $\hat{\omega}$ – оценка угловой скорости как твердого тела, $\hat{y}_{1,2,3}$ – оценки скорости первых трех доминирующих тонов упругих колебаний конструкции в месте установки гироскопического измерителя вектора угловой скорости, h – длительность такта бортового компьютера.

Полученная невязка проходит через фильтр низких частот

$$\rho(n+1) = W_1 \rho(n) + \varepsilon(n)h, \quad (2)$$

где ρ – интегральная невязка, W_1 – весовой коэффициент.

Оценка угловой скорости объекта управления как твердого тела осуществляется с помощью разностного уравнения (3).

$$\hat{\omega}(n+1) = \hat{\omega}(n) + m(n)h + \hat{G}(n)h + W_2 \rho(n+1), \quad (3)$$

здесь $m(n)$ – управляющее ускорение, W_2 – весовой коэффициент, \hat{G} – оценка слабо меняющегося возмущающего ускорения.

Идентификация возмущающего ускорения проводится в квазистатическом приближении:

$$\hat{G}(n+1) = \hat{G}(n) + W_5 \rho(n+1), \quad (4)$$

где W_5 – весовой коэффициент.

Оценка скорости упругих колебаний конструкции в месте установки ГИВУС для трех доминирующих тонов вычисляется с помощью разностного уравнения второго порядка ($i = 1, 2, 3$):

$$\hat{y}_i(n+1) = \hat{A}_i(n) \hat{y}_i(n) - B_i \hat{y}_i(n-1) + W_3 \varepsilon(n+1). \quad (5)$$

В этом уравнении $\hat{A}_i(n) = 2 \exp[\delta \lambda_i(n)h] \cos[2\pi \lambda_i(n)h]$ – функция оцениваемой частоты упругих колебаний на n -ом такте, $B_i = \exp(-2\delta \lambda_i(0)h)$ – константа, λ_i – частота упругих колебаний, $\delta = 0.05$ – логарифмический декремент, W_3 – весовой коэффициент, $i = 1, 2, 3$. Для идентификации параметров \hat{A}_i используется метод градиентного спуска для функционала $\Phi = \rho(n+1)^T \cdot \rho(n+1)$ – квадратичная форма от интегральных невязок:

$$\hat{A}_i(n+1) = \hat{A}_i(n) + W_4 \text{sign}[\hat{y}_i(n)] \rho(n+1), \quad (6)$$

где W_4 – весовой коэффициент. Числовые значения весовых коэффициентов W_{1-5} рассчитываются из условий, обеспечивающих асимптотическую сходимость параметров и вектора состояния бортовой модели к фактическим значениям параметров и компонент вектора состояния объекта управления. Переменные со значком (^) подлежат идентификации.

Результаты численного моделирования и натурных испытаний

На рисунках 3 и 4 представлены результаты численного моделирования процесса настройки бортовой модели динамики конструкции в одном из каналов управления. Динамика конструкции в бортовой модели была представлена двумя доминирующими тонами упругих колебаний с собственными частотами 0.15 и 0.58 Гц, что соответствует динамике конструкции МКС. Начальные значения оценок отличались от искомым значений частот на 80% и 50% соответственно. Подстройка частот велась на фоне выполнения углового маневра, в процессе выполнения которого проводился набор и гашение угловой скорости с использованием ракетных двигателей. Влияние доминирующих тонов упругих колебаний превосходило ускорение по твердому телу в два раза на частоте 0.15 Гц и в три раза на частоте 0.58 Гц. Настройка частот проводилась одновременно в двух частотных диапазонах спектра. Граничное значение частоты, разделяющей диапазоны, 0.5 Гц.

На рисунках 5, 6 и 7 представлено поведение компонент измеренной угловой скорости и ее оцен-

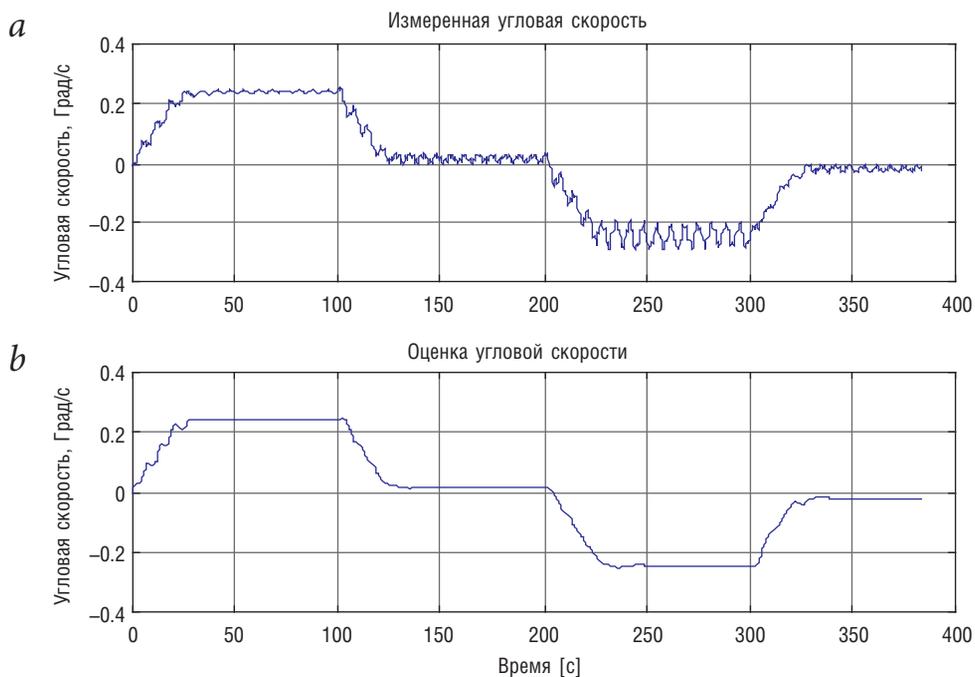


Рис. 3. Угловая скорость: измерения (а) и оценка (b).

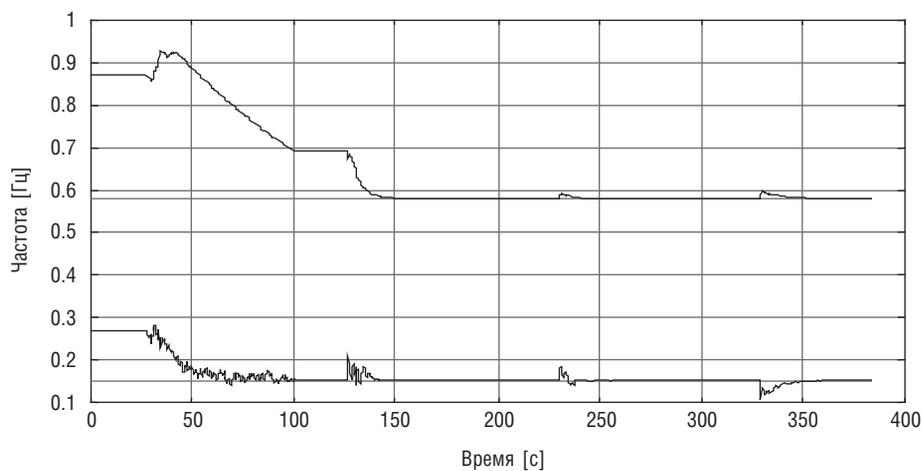


Рис. 4. Переходный процесс идентификации собственных частот упругих колебаний конструкции.

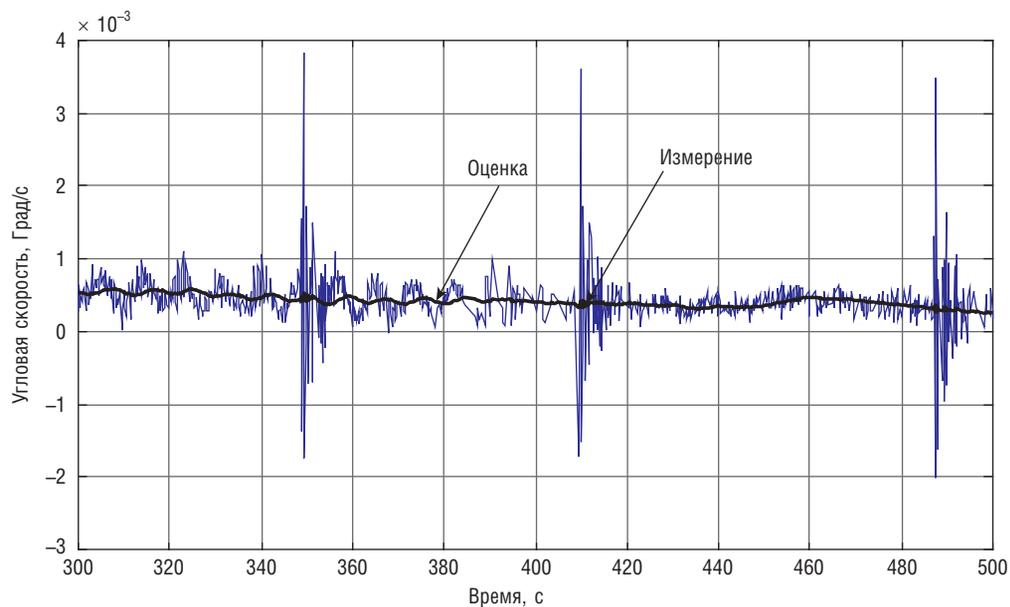


Рис. 5. Измеренная угловая скорость в сравнении с ее оценкой в канале крена.

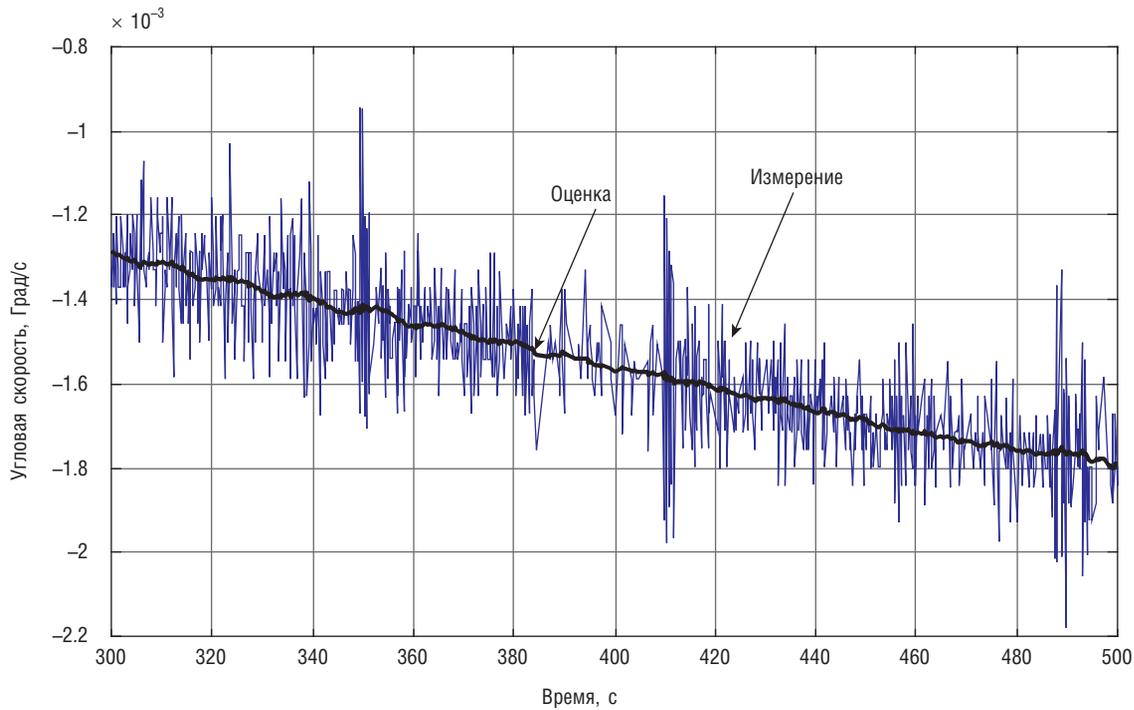


Рис. 6. Измеренная угловая скорость в сравнении с ее оценкой в канале рыскания.

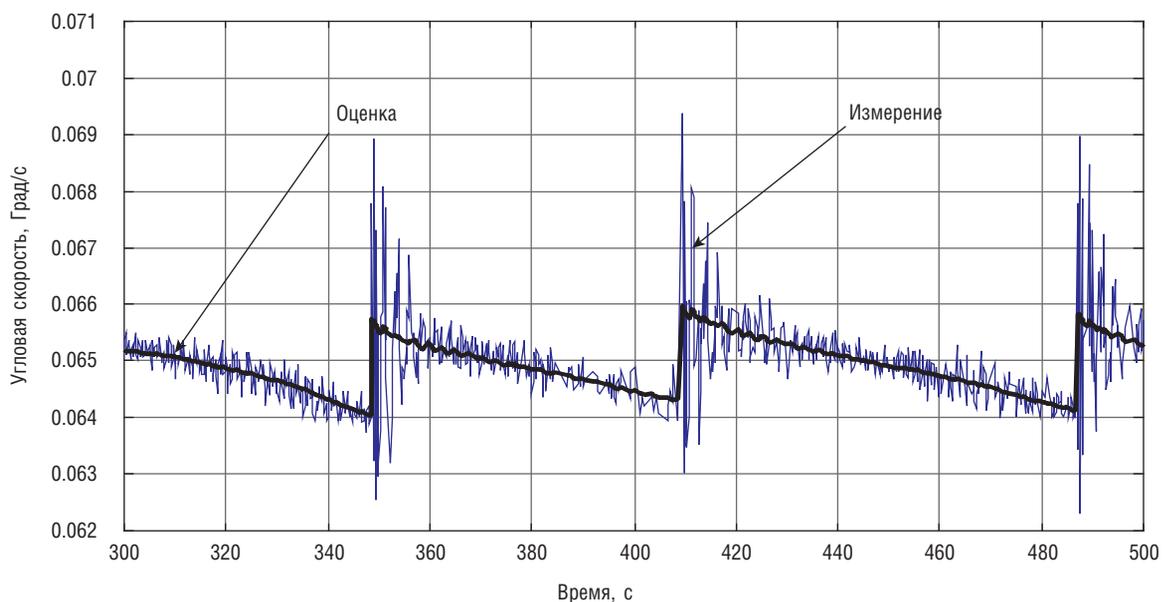


Рис. 7. Измеренная угловая скорость в сравнении с ее оценкой в канале тангажа.

ки адаптивным полосовым фильтром в каналах крена, рыскания и тангажа. Данные получены после обработки телеметрической информации, поступавшей во время проведения режима коррекции орбиты МКС. Коррекция проводилась с помощью кормовых двигателей причаливания и ориентации (ДПО) грузового корабля «Прогресс», пристыкованного к служебному модулю станции. Частота сброса телеметрической информации 5 Гц. Ступен-

чатый характер измерений угловой скорости на рисунке 6 обусловлен ошибками квантования по уровню датчика угловой скорости. Поведение оценки угловой скорости в канале тангажа, представленной на рисунке 7, указывает на то, что возмущающий момент от эксцентриситета суммарной тяги ДПО идентифицирован адаптивным наблюдателем вполне достоверно.

Здесь нужно отметить следующее. Условия наблюдений, выполнение которых необходимо для корректной оценки собственных частот, реализуются эпизодически, поэтому переходный процесс идентификации частот затягивается. Кроме того,

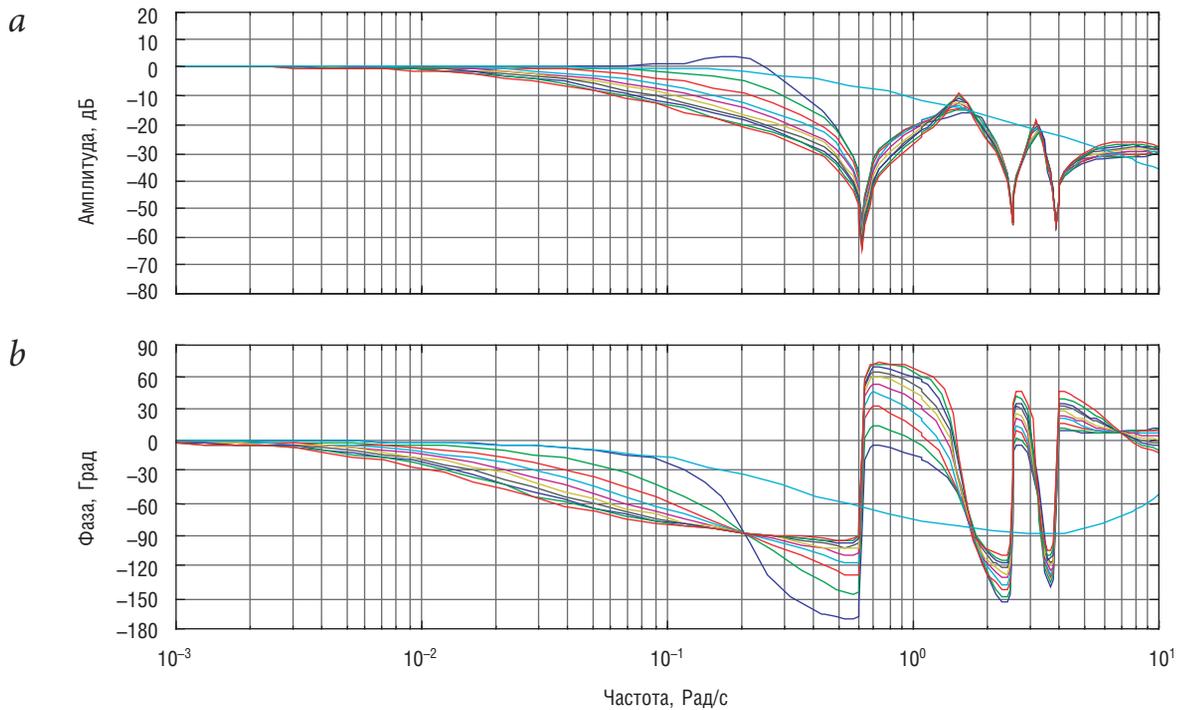


Рис. 8. Амплитудно-частотная (а) и фазово-частотная (б) характеристики полосового фильтра для различных параметров в сравнении с характеристиками цифрового низкочастотного фильтра.

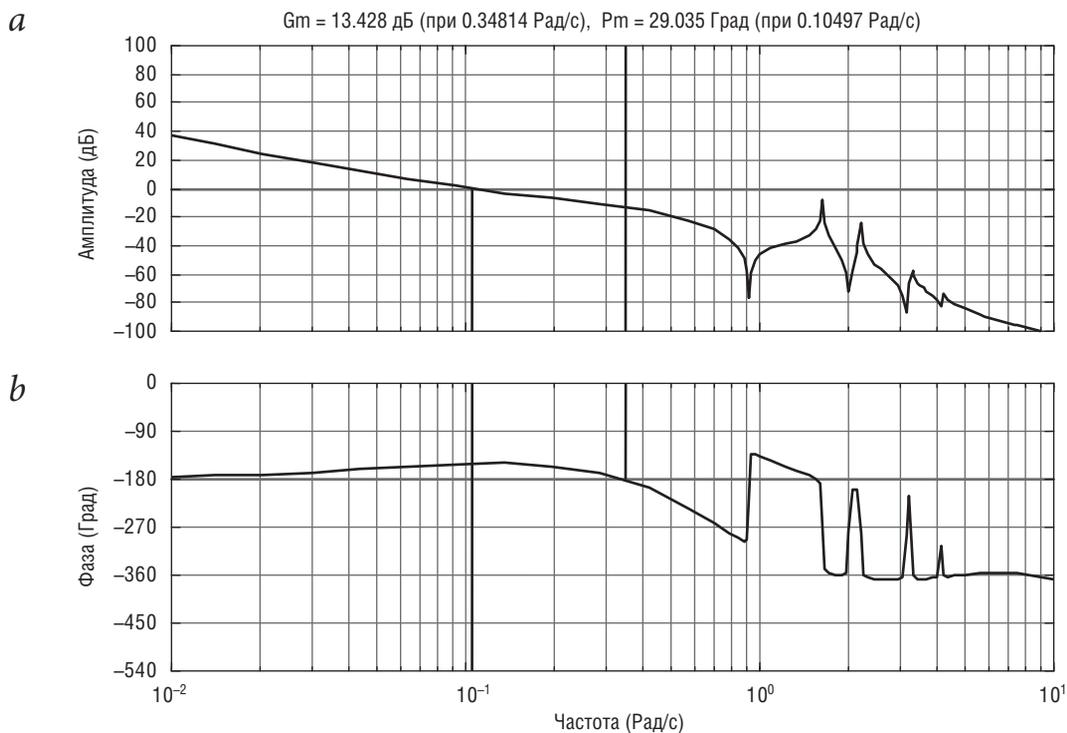


Рис. 9. Запас устойчивости линеаризованного автомата стабилизации с ненастроенным полосовым фильтром: G_m – по амплитуде (а) и P_m – по фазе (б).

на смещение оценок иногда влияют возбужденные высшие гармоники упругих колебаний конструкции и дрейф самих идентифицируемых частот. Естественно, что контур управления с полосовым настраиваемым фильтром не должен терять динамической устойчивости в те промежутки времени, когда фильтр не настроен.

В настроенном состоянии фильтр обеспечивает подавление осциллирующих составляющих в сигнале с ГИВУС в тысячу раз или на 60 дБ, что иллюстрируется амплитудно-частотной характеристикой фильтра, представленной на рисунке 8.

При этом составляющая сигнала, обусловленная движением объекта управления как твердого тела, не испытывает запаздывания, так как бортовая модель учитывает влияние возмущающих и управляющих воздействий в режиме реального времени.

Система управления должна обеспечивать динамическую устойчивость и в том случае, когда бортовая модель не настроена. Рисунок 9 иллюстрирует результаты робастного анализа для линейризованного автомата стабилизации. Из представленной диаграммы видно, что даже в ненастроенном состоянии бортовой модели обеспечивается запас устойчивости по амплитуде 13 дБ и по фазе 29°.

Применение настраиваемой и эталонной бортовых моделей в резервном контуре управления спутника связи «Ямал-200»

Этот раздел посвящен разработке адаптивного алгоритма управления ориентацией спутника связи на геостационарной орбите без измерения угловой скорости. Вместо измерений угловой скорости в качестве первичной информации используются измерения скорости вращения установленных на спутнике маховиков. Эта информация применяется в адаптивном наблюдателе для оценки абсолютной угловой скорости объекта управления. Таким образом, инерционные исполнительные органы используются в предлагаемом алгоритме также в качестве инерциальных датчиков. Другой отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является использование в контуре управления наземных измерений угла поворота вокруг местной вертикали, сформированных на Земле по изменению плоскости поляризации линейно поляризованного сигнала от радиомаяка, установленного на спутнике. Отклонение от местной вертикали измеряется датчиком местной вертикали. Для фильтрации и усред-

нения получаемых измерений поворота плоскости поляризации требуется значительное время (от 10 до 30 с). В связи с этим информация об угле поворота спутника вокруг местной вертикали поступает на борт с большим запаздыванием и сравнительно редко. Помимо этого, анализ результатов экспериментов показал, что даже после наземной обработки сигнала уровень шумов в измерениях угла поворота вокруг местной вертикали весьма значителен. С достаточной степенью точности шумы можно аппроксимировать гауссовским дискретным процессом типа белого шума со среднеквадратичным отклонением 0.2°. Высокий уровень шумов измерительной аппаратуры и редкое обновление информации в каналах измерений потребовали введения в контур управления блока прогнозирования и интерполяции вектора состояния объекта управления. Предварительные результаты математического моделирования показали, что на точность оценки угловой скорости КА влияет знание величины момента трения в подшипниках маховиков. Поскольку эта величина заранее точно не определена, то задачу прогноза приходится решать в условиях параметрической неопределенности. Для устранения последней в контур управления был введен блок динамической оценки момента трения в подшипниках маховиков. Идентификация момента трения потребовала настройки бортовой модели объекта управления. Таким образом, задача сводится к одновременной оценке вектора состояния и идентификации параметров бортовой модели. Для решения вышеописанных задач в контур управления был введен блок оценки вектора состояния объекта управления. В этом блоке проводится оценка угловой скорости объекта управления и углов отклонения КА от орбитальной ориентации. Наряду с этим, для повышения точности оценки проводится идентификация моментов трения в подшипниках маховиков.

Описание объекта управления и его бортовой модели

Для введения в рассмотрение момента трения в подшипниках маховиков теорема об изменении кинетического момента применяется отдельно к корпусу КА и отдельно к системе маховиков. Для корпуса КА:

$$\begin{aligned} J_x \ddot{\gamma} + 4(J_z - J_y)\omega_0^2 \gamma - (J_x + J_y - J_z)\omega_0 \dot{\psi} &= f(h_x) - u_x + M_x; \\ J_y \ddot{\psi} + (J_x + J_y - J_z)\omega_0 \dot{\gamma} + (J_z - J_x)\omega_0^2 \psi &= f(h_y) - u_y + M_y; \\ J_z \ddot{\theta} + 3(J_x - J_y)\omega_0^2 \theta &= f(h_z) - u_z + M_z, \end{aligned} \quad (7)$$

где $f(h_l)$, $l = x, y, z$ – заранее известная функция зависимости момента трения в подшипниках маховиков

от скорости вращения их роторов и, соответственно, от их кинетического момента; $u_l, l = x, y, z$ – управляющие воздействия на маховики по каналам тангажа, крена и рысканья; $M_l, l = x, y, z$ – внешние возмущающие моменты. В первом приближении $f(h_l) = v_l h_l$. Для системы маховиков:

$$\begin{aligned} h_z \omega_0 \dot{\gamma} + h_z \dot{\psi} - h_y (\dot{\theta} + \omega_0) + \dot{h}_x &= -v_x h_x + u_x; \\ -h_z \dot{\gamma} + h_z \omega_0 \psi + h_x (\dot{\theta} + \omega_0) + \dot{h}_y &= -v_y h_y + u_y; \\ h_y (\dot{\gamma} - \omega_0 \psi) - h_x (\dot{\psi} + \omega_0 \gamma) + \dot{h}_z &= -v_z h_z + u_z. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как объект управления структурно определен, то его бортовая модель может быть описана на временном интервале между двумя поступлениями информации об угловых отклонениях КА такими же уравнениями, как (7) и (8).

Управляющее воздействие на маховики имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_x &= K_{1,x} \hat{\gamma} + K_{2,x} \dot{\hat{\gamma}}; \\ u_y &= K_{1,y} \hat{\psi} + K_{2,y} \dot{\hat{\psi}}; \\ u_z &= K_{1,z} \hat{\theta} + K_{2,z} \dot{\hat{\theta}}. \end{aligned} \quad (9)$$

В моменты поступления информации об угловых ошибках бортовая модель объекта корректируется (настраивается) методом градиентного спуска по невязкам между измеренными и спрогнозированными угловыми отклонениями ($\hat{\gamma}, \hat{\psi}, \hat{\theta}$), полученными за период времени от предыдущего до текущего измерения.

В каждом канале управления ($\hat{\phi}_x = \hat{\gamma}, \hat{\phi}_y = \hat{\psi}$ и $\hat{\phi}_z = \hat{\theta}$) имеем:

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_l \\ \hat{\phi}_l \\ \hat{v}_l \end{bmatrix}_{\text{корр}} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_l \\ \hat{\phi}_l \\ \hat{v}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{1,l} \\ W_{2,l} \\ W_{3,l} \end{bmatrix} (\phi_l - \hat{\phi}_l), \quad l = x, y, z. \quad (10)$$

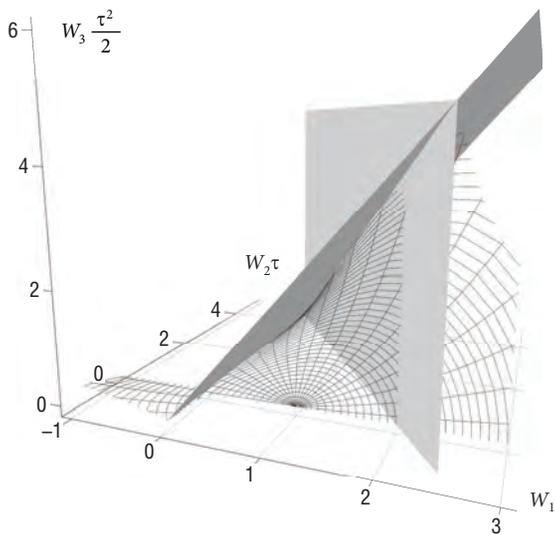


Рис. 10. Область сходимости в пространстве весовых коэффициентов.

где $W_{1,l}, W_{2,l}, W_{3,l}, l = x, y, z$ – весовые коэффициенты соответственно для угла, угловой скорости и коэффициента пропорциональности кинетического момента и момента трения в подшипниках маховиков. После коррекции выражения (10) бортовая модель снова переходит в режим прогноза в соответствии с уравнениями, аналогичными (7) и (8).

Далее проводится анализ сходимости наблюдаемых переменных к их фактическим значениям. В целях упрощения задачи пренебрегаем гироскопической связью в каналах рысканья и крена, и уравнения (7)–(9) принимают достаточно простой вид. Далее для нее находится матрица переходных состояний в отсутствие измерений угловых рассогласований и матрица коррекции в соответствии с уравнением (10). На основе анализа характеристического уравнения результирующей переходной матрицы состояний, равной произведению этих двух матриц, доказываем сходимость оценок параметров вектора состояния к их истинным значениям. С помощью критерия Раунса–Гурвица для систем, описываемых конечно-разностными уравнениями, находят область сходимости в пространстве весовых коэффициентов $W_{1,l}, W_{2,l}, W_{3,l}, l = x, y, z$ (рис. 10). Область сходимости на рисунке ограничена тремя плоскостями и параболическим гиперболоидом. Видно, что размер области сходимости зависит от времени между двумя последовательными измерениями углов рассогласования. Значения весовых коэффициентов выбираются методом модального управления корнями характеристического многочлена результирующей переходной матрицы состояний из области сходимости. В качестве эталонного многочлена используется полином Баттерворта 3-го порядка. В результате получены следующие численные значения коэффициентов: $W_{1,l} = 0.4679, W_{2,l} = 0.1464/\tau_l, W_{3,l} = 0.0232/\tau_l^2, l = x, y, z$.

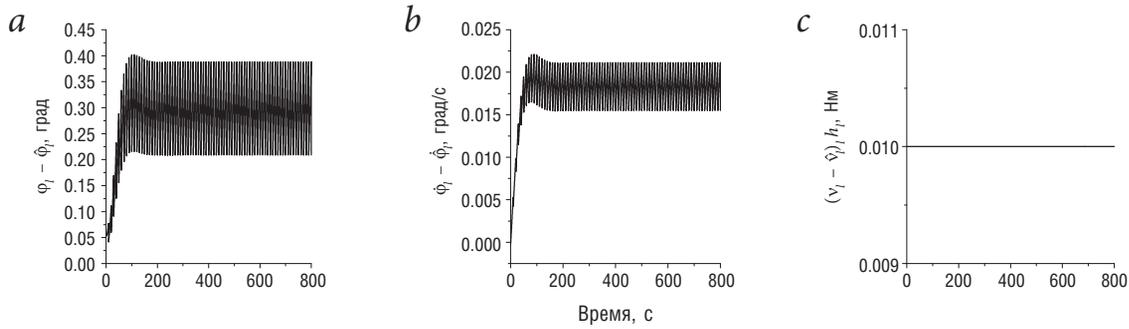


Рис. 11. Поведение невязок угла (а), угловой скорости (б), момента трения (с) без использования коррекции момента трения в подшипниках маховиков.

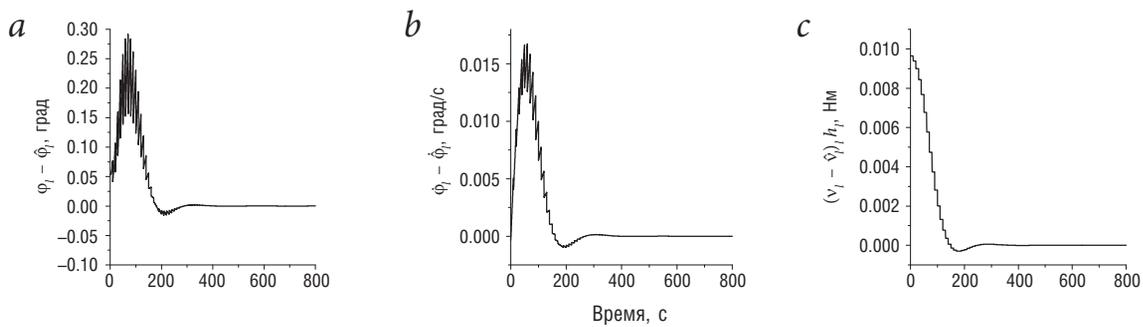


Рис. 12. Поведение невязок угла (а), угловой скорости (б), момента трения (с) при использовании коррекции момента трения в подшипниках маховиков.

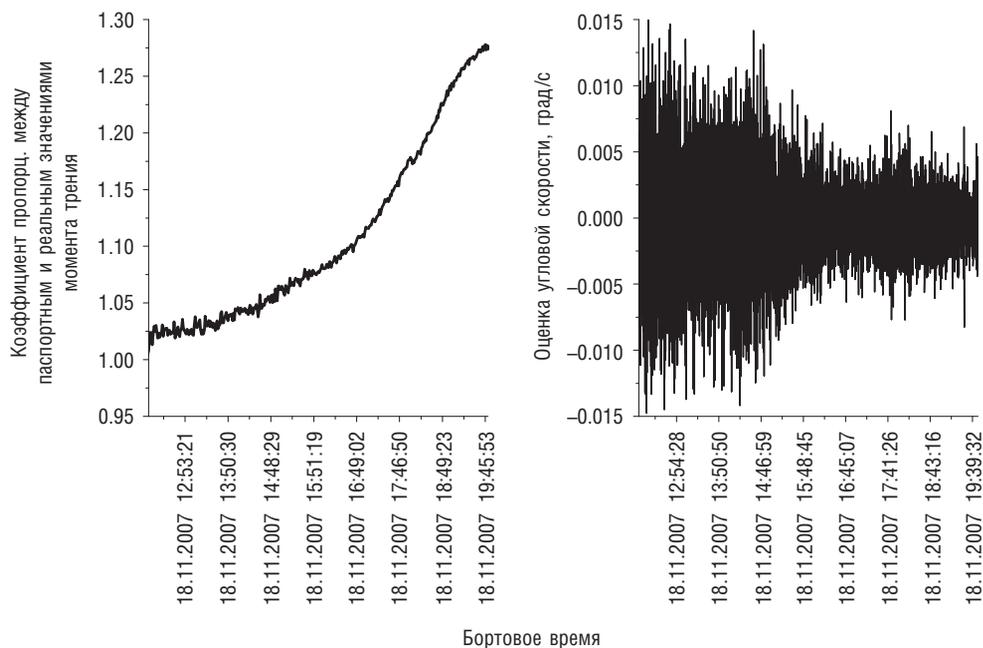


Рис. 13. Переходный процесс настройки бортовой модели в канале управления вокруг местной вертикали по данным телеметрии.

Результаты численного моделирования и натурных испытаний

Для иллюстрации полученных аналитических результатов было проведено математическое моделирование переходного процесса

настройки бортовой модели объекта управления. В процессе математического моделирования коррекция оценок с помощью измерений углов проводилась один раз в 30 с. На рисунках 11 и 12 представлено поведение невязок без использования коррекции момента трения в подшипниках маховиков ($W_{3,l} = 0$, рис. 11) и с ее использованием (рис. 12).

При выборе в уравнении (9) коэффициентов обратной связи $K_{1,l}$, $K_{2,l}$, обеспечивающих асимптотическую устойчивость для оценок вектора состояния, и с учетом сходимости, обеспечиваемой соответствующим выбором весовых коэффициентов $W_{1,l}$, $W_{2,l}$, $W_{3,l}$, можно констатировать, что поведение фактической угловой скорости и фактических углов рассогласования асимптотически устойчиво. Однако ввиду того, что момент трения в подшипниках маховиков не учитывается при формировании управляющего воздействия (9), возникает статическая ошибка по углу. Для устранения этой статической ошибки необходимо ввести в управляющее воздействие (9) обратную связь по оцениваемому моменту трения. В этом случае по мере уточнения момента трения с помощью адаптивного наблюдателя статическая ошибка по углу рассогласования будет стремиться к нулю, что значительно улучшит оценку параметров вектора состояния.

На *рисунке 13* демонстрируются результаты тестирования работы данного алгоритма управления при проведении летно-конструкторских испытаний. Здесь представлен переходный процесс настройки бортовой модели объекта управления в канале крена. Процесс проходит на фоне режима поддержания трехосной орбитальной ориентации. Из рисунка видно, что по мере уточнения значения коэффициента трения амплитуда колебаний оценки угловой скорости, вызванная параметрической неопределенностью коэффициента трения, уменьшается приблизительно в три раза.

Принципы построения перспективных автономных систем управления движением группировок КА

В настоящее время автономное управление групповым полетом космических аппаратов находится в центре внимания специалистов в области управления движением и навигации. Об этом свидетельствует огромный, неослабевающий поток научно-исследовательских работ по этой тематике, что связано с широкими возможностями использования группировки (формации) спутников в решении прикладных и научных задач. Это создание когерентных радиолокаторов с синтезированной апертурой для исследования Земли и дальнего космоса, системы глобальной космической связи, освещение отраженными световыми лучами заполярных районов Земли группировкой КА с солнечными парусами в зимнее время года и др.

Основной проблемой управления группировками КА является удержание каждого аппарата внутри формации, т.е. предотвращение векового ухода КА, связанного с различного рода возмущениями,

действующими на спутник в процессе полета. На низких околоземных орбитах такими возмущениями являются аэродинамическое сопротивление и несферичность Земли, на геостационарной орбите это прежде всего гравитационное влияние Солнца и Луны. Для парирования векового ухода каждого КА относительно других аппаратов планируется использовать силы солнечного давления, действующие на солнечный парус, который будет являться одним из основных элементов в конструкции каждого КА в группировке. Управляя ориентацией каждого из КА, можно изменять углы падения солнечного света на поверхность паруса, тем самым меняя проекции сил светового давления, действующие на каждый спутник.

Для коррекции положения каждого КА в группировке силами солнечного давления предлагается использовать терминальный алгоритм управления. На определенный временной промежуток (например полвитка) задается желаемое конечное положение каждого КА. Далее на основе начального и конечного положений КА бортовой моделью, содержащей упрощенную модель движения спутника и информацию о положении других КА, рассчитываются углы ориентации солнечного паруса относительно вектора светового потока, обеспечивающие движение КА из начального положения в конечное парирова в итоге вековой уход и избегая столкновений с другими КА.

Данный принцип управления был описан в монографии [21]. Там же описан алгоритм управления угловыми маневрами КА с двойным вращением. В основу управления угловым движением КА с большим вращающимся пленочным отражателем положена известная схема спаренных силовых гироскопов. Одним из гироскопов является вращающийся солнечный парус в виде большого мембранного дис-

ка с центральной жесткой вставкой (вставка, выполненная в виде вантовой конструкции, необходима для передачи момента импульса корпусу аппарата). Второй представляет собой вращающийся в противоположном направлении жесткий силовой гироскоп в подвесе Гука (далее по тексту – компенсирующий гироскоп) с регулируемыми углами поворота оси вращения ротора и регулируемой угловой скоростью его вращения. В последней главе данной монографии был представлен терминальный закон управления траекторными маневрами одного из группировки КА с большим солнечным парусом, находящимся на геостационарной орбите. Результаты численного моделирования, демонстрирующего работоспособность разработанного алгоритма приведены ниже (рис. 14–16).

Заключение

Приведенные в статье алгоритмы призваны продемонстрировать возможности адаптивного подхода в решении задач повышения надежности, продления ресурса и повышения качества управления КА. Их применение позволило продлить работу спутников связи серии «Ямал-200» на десятилетие несмотря на отказы гироскопических измерителей угловой скорости в 2006 г. Применение этого подхода в совокупности с организационными мероприятиями по наземному сопровождению полета МКС позволяет констатировать, что почти двадцатилетний период эксплуатации Международной космической станции продолжается практически без существенных замечаний. Представленные в статье алгоритмы далеко не исчерпывают весь арсенал и спектр решаемых с использованием адаптивного подхода проблем. «За кадром» остались алгоритмы сближения и причаливания транспортных и грузовых кораблей, обеспечивающих на протяжении почти двадцати лет бес-

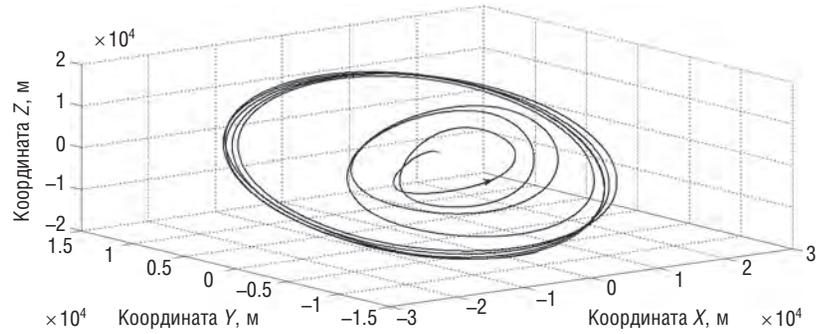


Рис. 14. Траектория движения КА в относительной системе координат.

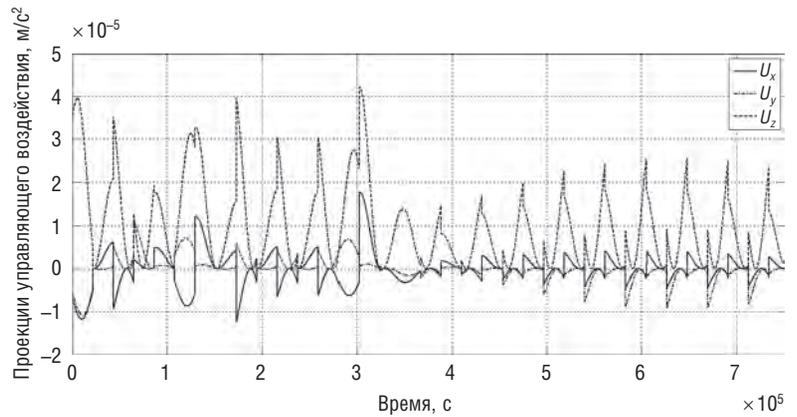


Рис. 15. Компоненты управляющего воздействия по осям X, Y и Z.

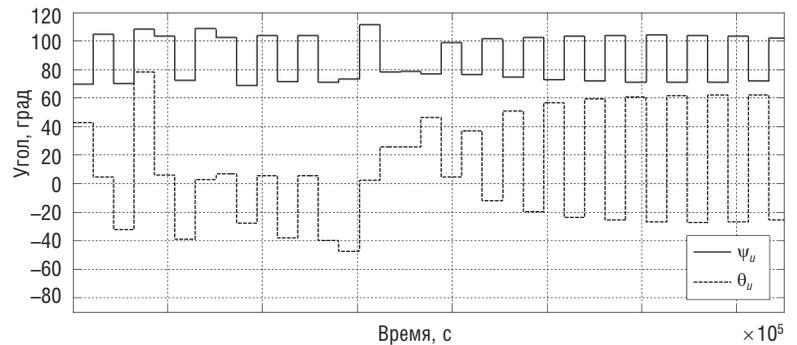


Рис. 16. Управляющие углы наклона плоскости солнечного паруса.

перебойную доставку на МКС грузопотока и смену экипажей, алгоритмы поиска и поддержания равновесной ориентации МКС с целью минимизации расхода топлива, а также другие алгоритмы, использующие адаптивный подход. В заключение необходимо дать некоторые общие комментарии о реализации алгоритма управления группировкой КА с вращающимися солнечными парусами. Прежде всего поставленная задача принципиально не может быть решена с помощью синтеза алгоритма управления по обратной связи от вектора состояния или от вектора измерений. Дело в том, что проекция управляющей силы солнечного давления на ось OX в направлении полета КА по геостационарной орбите к Солнцу отрицательна и не может менять знак на протяжении половины витка, а при

движении в обратном направлении от Солнца (следующие полвитка) эта проекция на ось OX всегда положительна. В силу вышесказанного для решения поставленной задачи был применен метод терминального управления в автономном варианте. Это частный случай управления с прогнозируемой бортовой моделью. Бортовая модель прогноза дви-

жения объекта управления должна корректироваться по информации, формируемой в измерительных каналах датчиковой аппаратуры, в состав должны входить солнечный датчик и аппаратура автономной навигации GPS или ГЛОНАСС.

Литература

1. **В.П. Легостаев, Е.А. Микрин**
Автоматика и телемеханика, 2013, 74(3), 15.
2. **Ф.А. Воронин, П.А. Пахмутов, А.В. Сумароков**
Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2017, №1(112), 109. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-109-122.
3. **Е.А. Микрин, В.В. Кульба, Б.В. Павлов**
Автоматика и телемеханика, 2013, 74(3), 15.
4. **Е.А. Микрин**
Бортовые комплексы управления космических аппаратов: Учеб. пособие, Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 245 с.
5. **П. Эйхкофф**
Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояния, Москва, Мир, 1975, 690 с.
6. **R.C.K. Lee**
Optimal Estimation, Identification, and Control, Ser. Massachusetts Institute of Technology (Cambridge Mass.), Research monograph, № 28, USA, Mass., Cambridge, MIT Press, 1964.
7. **C.S. Draper, Y.T. Li**
Principles of Optimizing Control Systems and an Application to the Internal Combustion Engine, USA, NY, New York, ASME, 1951, 160 pp.
8. **H.P. Whitaker, J. Yamron, A. Kezer**
Design of a Model Reference Adaptive Control System for Aircraft, Ser. Report (Massachusetts Institute of Technology. Instrumentation Laboratory), R-164, USA, Mass., Cambridge, MIT, Jackson & Moreland, 1958, 108 pp.
9. **В.Н. Бранец, В.Н. Платонов, А.В. Сумароков, С.Н. Тимаков**
Изв. РАН. Теор. сист. управл., 2008, №1, 127.
10. **Д.М. Климов**
Изв. АН СССР. МТТ, 1983, №4, 57.
11. **Г.Ш. Пуричиаишвили**
Изв. АН СССР. МТТ, 1989, №4, 17.
12. **А.В. Сумароков, С.Н. Тимаков**
Изв. РАН. Теор. сист. управл., 2008, №5, 131.
13. **Д.А. Ефимов, А.В. Сумароков, С.Н. Тимаков**
Изв. РАН. Теор. сист. управл., 2012, №5, 119.
14. **С.Н. Тимаков**
В Ракетно-космической технике. Труды. Сер. XII «Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем», вып. 1 «Спутник связи «Ямал». Бортовой комплекс управления. Новые решения», под ред. В.Н. Бранца, Королев, РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2002, с. 101–113.
15. **С.Н. Тимаков**
В Мат. Межд. конф. по крупногабаритным космическим конструкциям ICOLASS-93 (Новгород, 18–20 мая, 1993), Новгород, Изд. Новгородского политехнического института, 1993, с. 37–38.
16. **В.Н. Платонов, С.Н. Тимаков**
Гирокоспия и навигация, 1993, №2(2), 64.
17. **С.Н. Тимаков, К.А. Богданов, С.Е. Нефедов**
Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2014, №5(98), 40.
18. **С.Н. Тимаков, А.В. Жирнов**
Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2014, №3(96), 37.
19. **A. Zhirnov, S. Timakov**
В Proc. 65-th International Astronomical Congress IAC-14 (Canada, Toronto, 29 September – 3 October, 2014), C1.4.4 (<http://iafastro.directory/iaac/archive/tree/IAC-14/C1/4/IAC-14,C1,4,4,x24756.brief.pdf>).
20. **В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский**
Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела, Москва, Наука, 1973, 320 с.
21. **К.А. Богданов, А.В. Зыков, В.П. Легостаев, А.В. Субботин, А.В. Сумароков, С.Н. Тимаков**
Задачи управления движением космического аппарата с вращающимся солнечным парусом: монография, под ред. С.Н. Тимакова, Королев, РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2016, 116 с.

English

Experience and Perspectives of the Onboard Algorithms Creation of the Spacecraft Motion Control

Eugeny A. Mikrin

Academician, Professor,
S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
eugeny.mikrin@rsce.ru

Sergey N. Timakov

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
Sergey.Timakov@rsce.ru

Anton V. Sumarokov

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
anton.sumarokov@rsce.ru

Kirill A. Bogdanov

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
kirill.bogdanov@rsce.ru

Aleksei V. Zhirnov

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
post@rsce.ru

Aleksandr V. Zykov

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
Aleksandr.Zykov@rsce.ru

Abstract

The paper treats some aspects of spacecrafts onboard motion control algorithms compilation both historical and current. The advantages of adaptive approach applied now by the satellite-borne software developers are demonstrated on particular examples. The construction principles of the perspective autonomous systems for the motion control of a satellite group, equipped with rotating sun sails, by means of forces and moments created by light pressure are represented.

Keywords: onboard computing system, cluster, attitude control system, navigation system, adaptive observer, spacecraft orbital group.

*The work was financially supported by RFBR (projects 15-08-01795, 17-08-01635, 09-01-13513, 12-08-00254, 16-38-00458 and 16-38-00910).

Images & Tables

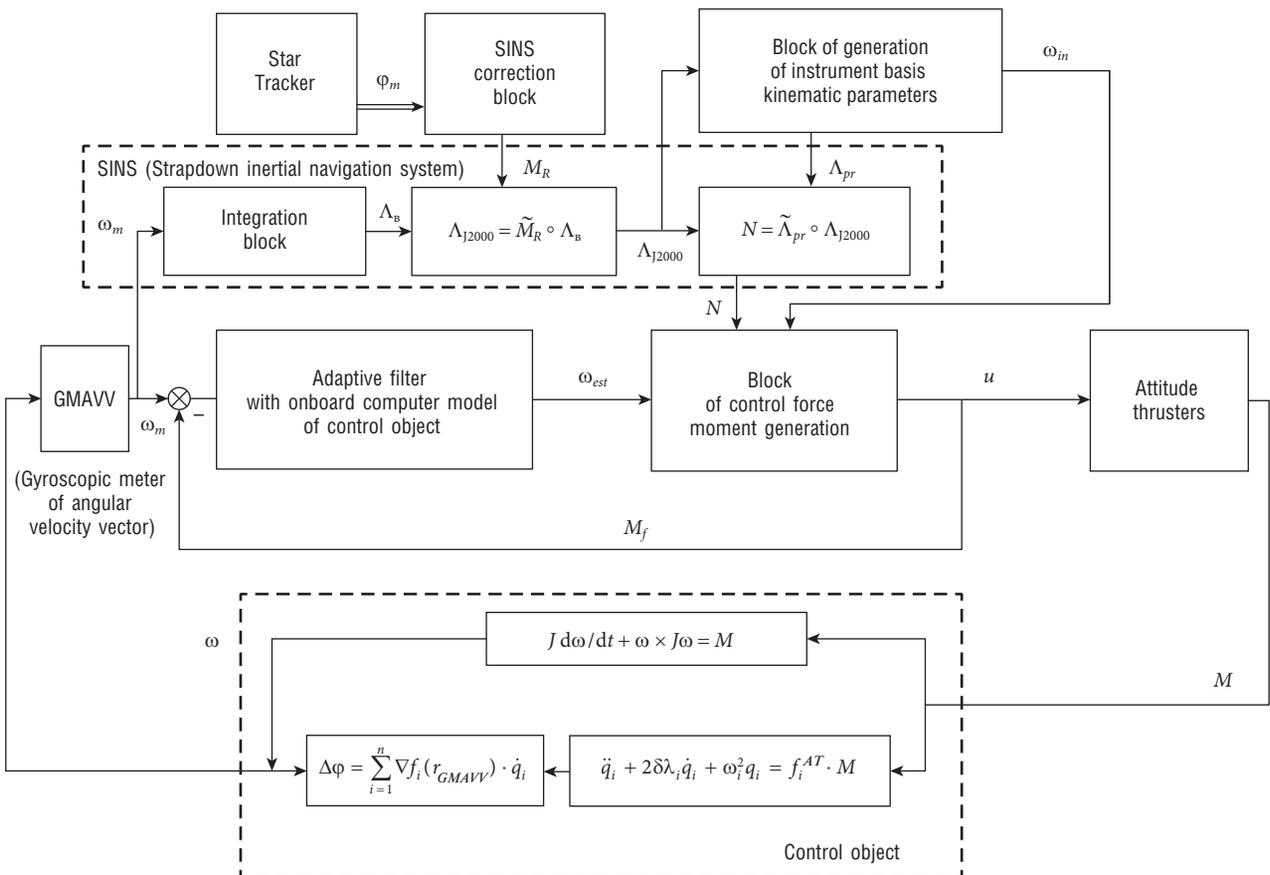


Fig. 1. Block-scheme of International Space Station (ISS) attitude control system.

Symbols: ω – the angular rate absolute value of ISS as solid body; ω_m – measurements of the ISS absolute angular rate; J – spacecraft inertia tensor; M – control moment of attitude thrusters; u – control signal to the attitude thrusters; ω_{est} – estimation of the spacecraft angular rate by the observer; M_f – onboard estimation of control moment; φ_m – measurements of angular misalignments in the measurement channels of star tracker; Λ_{J2000} – quaternion of rotation from inertial coordinate system J2000 to the reference system connected with the ISS; quaternion Λ_θ is determined by the following kinematic expression: $2\Lambda_\theta = \Lambda_\theta \circ \omega_{est}$; M_R – quaternion of rotation from inertial onboard coordinate system (ICS SINS) to the actual J2000 at the moment of angular misalignment measurements of the ISS coordinate frame with respect to the orbital coordinate frame; Λ_{pr} – quaternion of rotation from inertial coordinate frame J2000 to the instrumental basis which, for example, can be the orbital coordinate frame; N – command quaternion based on which the control action on the attitude control thrusters is formed; $\omega_{in} = [0; 0; \omega_0]^T$ – angular rate of instrumental coordinate frame, for example, the angular rate of the orbital coordinate frame movement in the inertial space; sign “ \circ ” denotes the operation of quaternion multiplication; sign “ \sim ” above the quaternion symbol denotes the conjugated quaternion; detailed description of the kinematic expressions in the quaternion form is given in [19]; $\Delta\varphi$ – elastic additive components to the angular rate of the spacecraft as solid body; δ – oscillations logarithmic decrement; λ_i – the i -th tone eigenfrequency of the construction’s elastic vibrations; $\omega_i = 2\pi\lambda_i$ – the i -th tone circular eigenfrequency of the construction’s elastic vibrations; q_i – the i -th orthogonal coordinate of each oscillation tone in the n -dimensional space; \dot{q}_i , \ddot{q}_i – the first- and second-order derivatives of q_i ; f_i – the i -th tone angular displacement of construction’s elastic vibrations at the places of the attitude control thrusters location (f_i^{AT}) and the angular rate sensors (f_i^{GMAVV}).

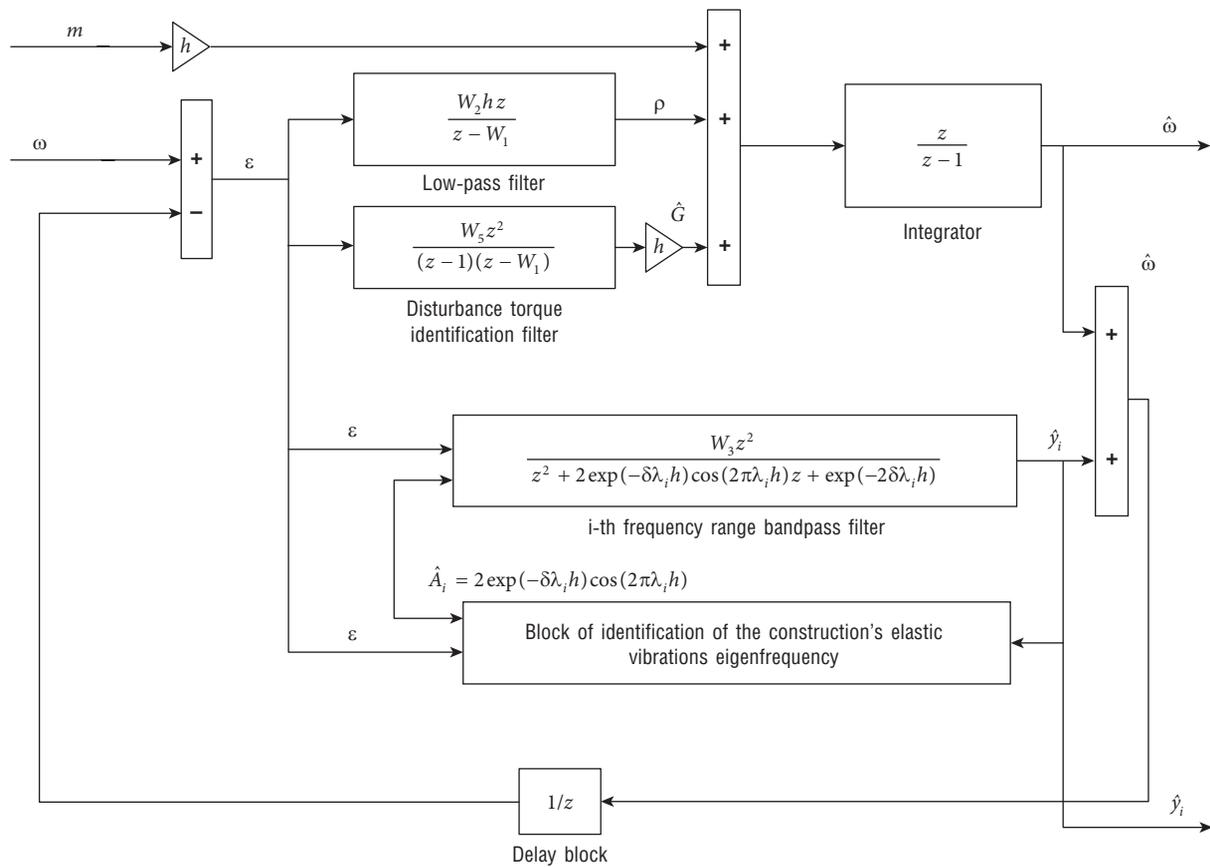


Fig. 2. Block-scheme of adaptive band filter.

Symbols: z – operation of z -transform; ω – measured angular rate; m – control acceleration; $\hat{\omega}$ – estimation of angular rate of a spacecraft as solid body; ε – misalignment; ρ – integral misalignment or misalignment passed through the low-pass filter; \hat{y}_i – the rate estimation of three dominated tones of the construction elastic oscillations; h – time-quantization period; \hat{G} – estimation of weakly varying perturbing acceleration; \hat{A}_i – the being estimated frequency function of the construction's elastic vibrations; λ_i – frequencies of construction's elastic oscillations; $\delta = 0.05$ – logarithmic decrement; W_k – weighting factors.

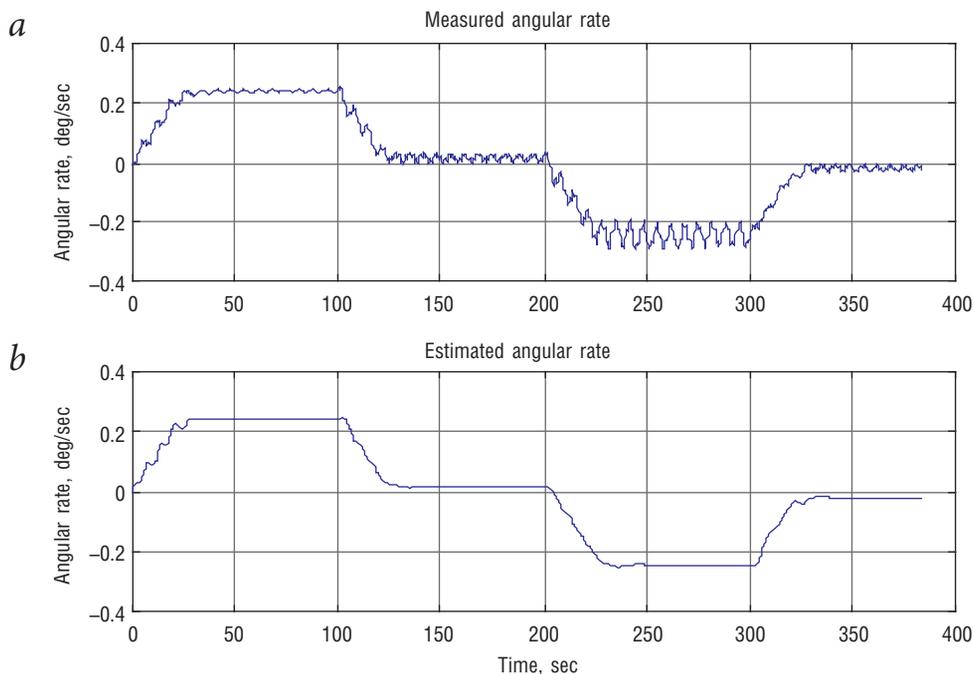


Fig. 3. The angular rate: a – measurements, b – estimation.

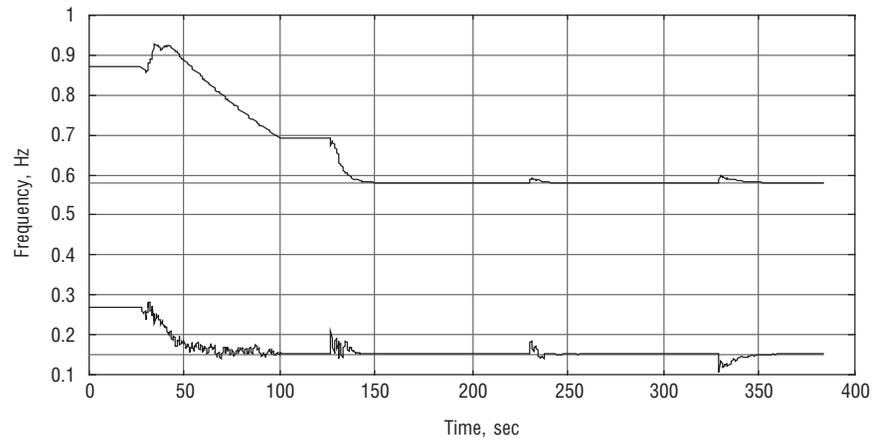


Fig. 4. Transient process of the construction's eigenfrequencies identification.

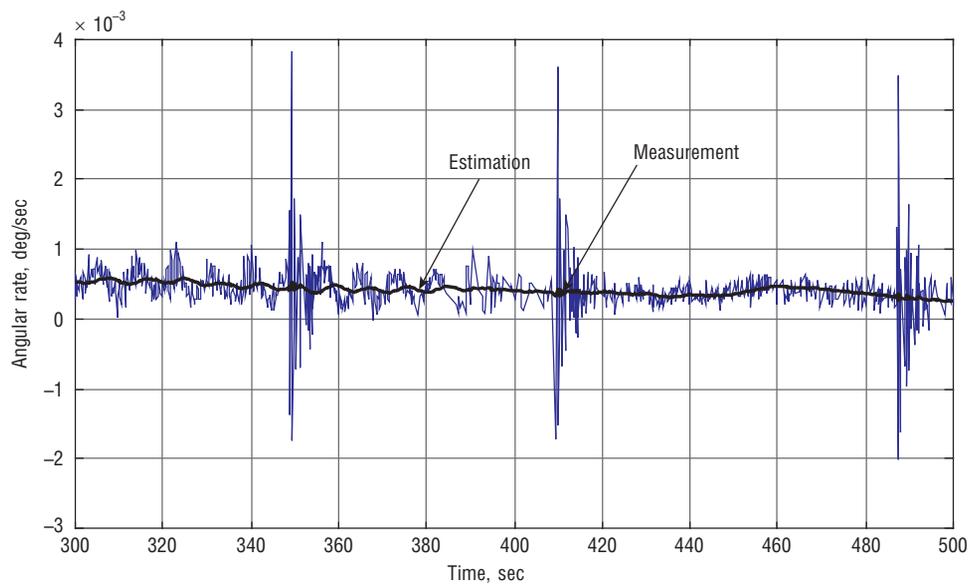


Fig. 5. Comparison of measurement and evaluation of the angular rate values in the roll channel.

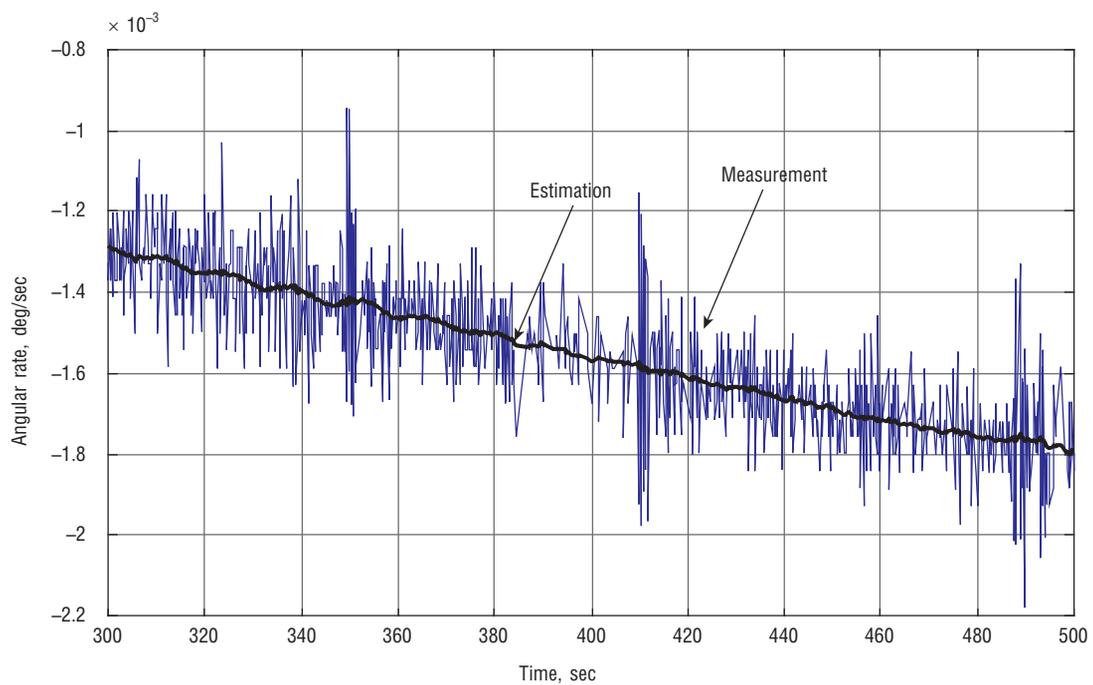


Fig. 6. Comparison of measurement and evaluation of the angular rate values in the yaw channel.

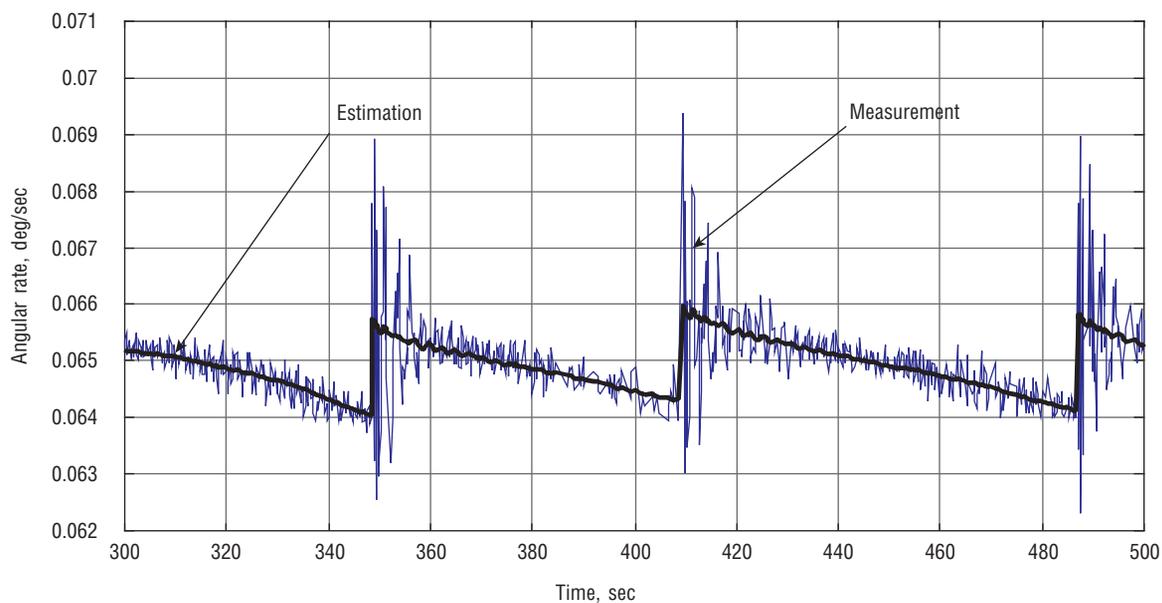


Fig. 7. Comparison of measurement and evaluation of the angular rate values in the pitch channel.

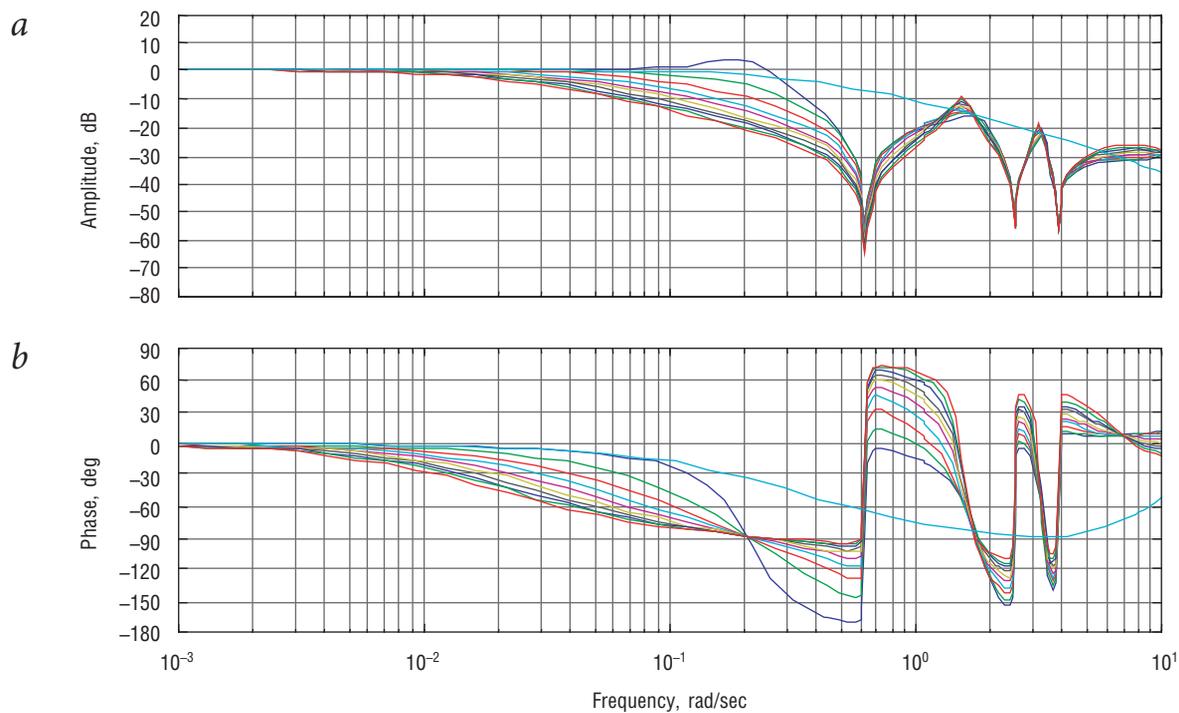


Fig. 8. Amplitude-frequency (a) and phase-frequency (b) characteristics of a bandpass filter for various parameters in comparison with the characteristics of a digital low-pass filter.

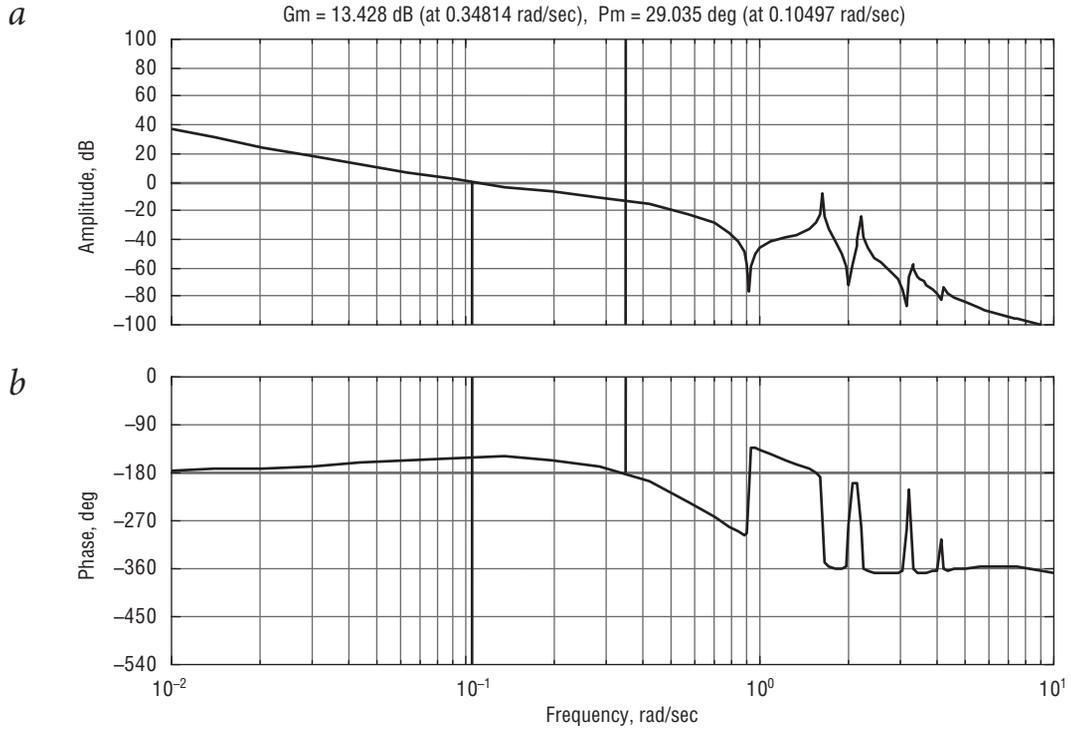


Fig. 9. Stability margin of the linearized automatic stabilizer with unconfigured bandpass filter: Gm – by amplitude (a), Pm – by phase (b).

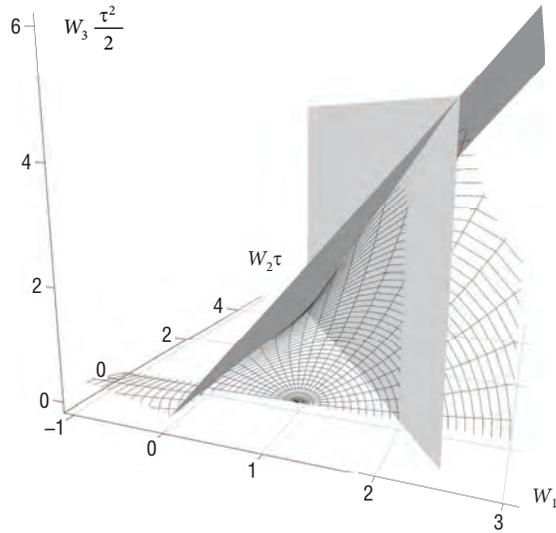


Fig. 10. Convergence domain in the space of weighting factors.

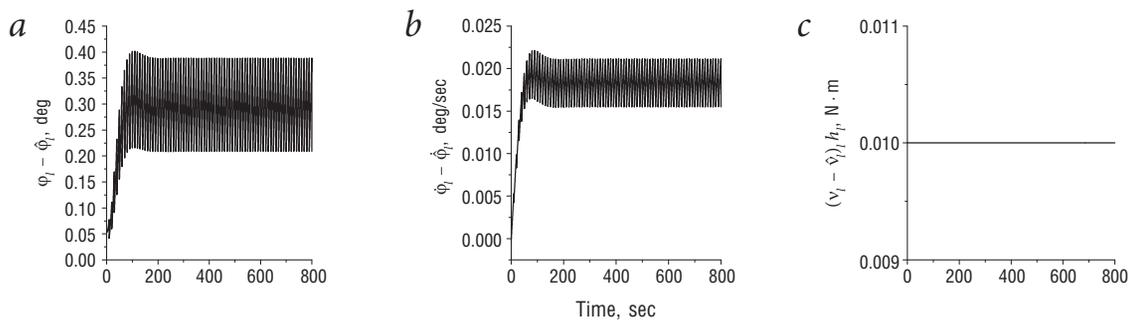


Fig. 11. Behavior of misalignments of the angle (a), the angular velocity (b) and the friction torque (c) without the use of the flywheel bearings friction moment correction in control loop.

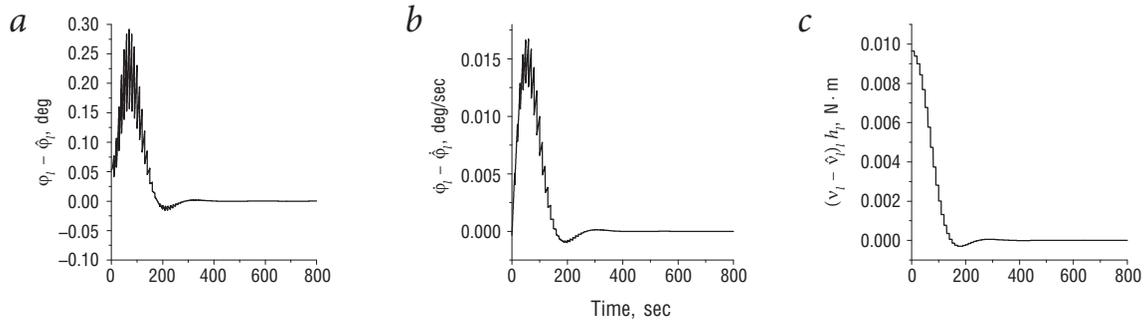


Fig. 12. Behavior of misalignments of the angle (a), the angular velocity (b) and the friction torque (c) with the use of the flywheel bearings friction moment correction in control loop.

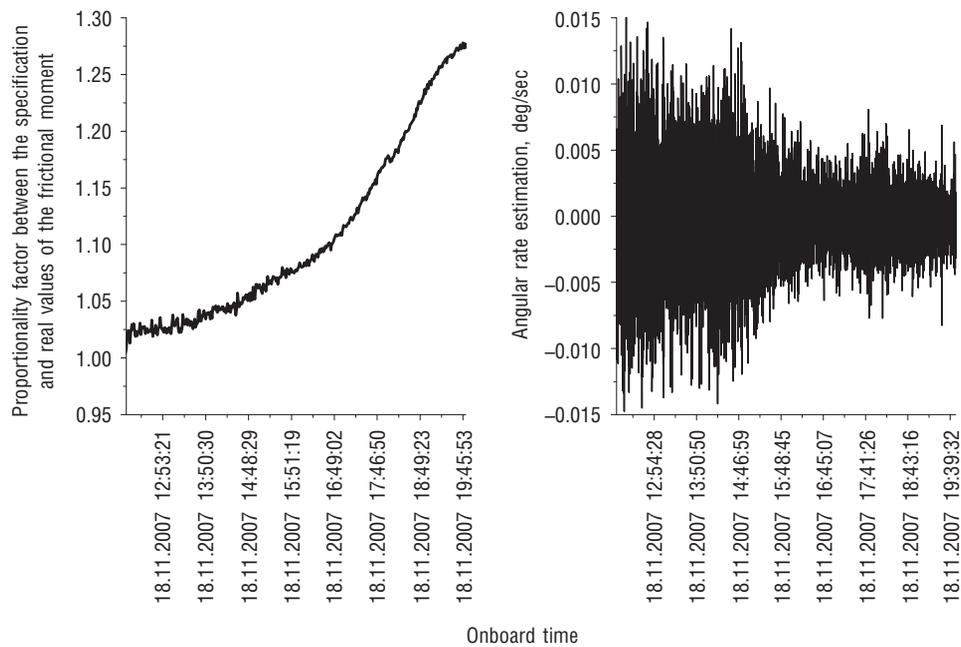


Fig. 13. The transient process of the onboard model adjustment in the control channel around the local vertical according to the telemetry data.

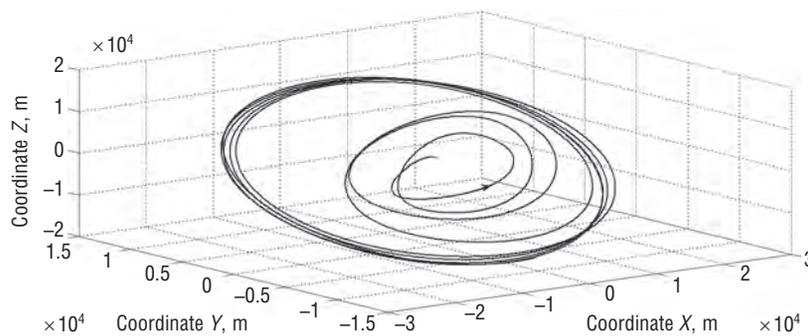


Fig. 14. Spacecraft flight trajectory in relative coordinates system.

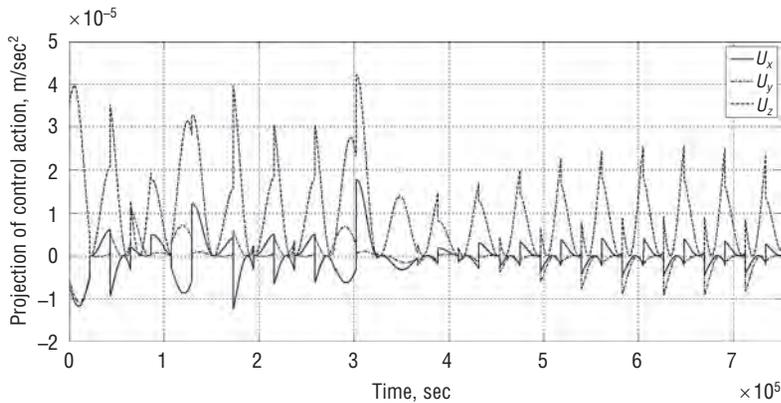


Fig. 15. Control action components on X, Y and Z axis.

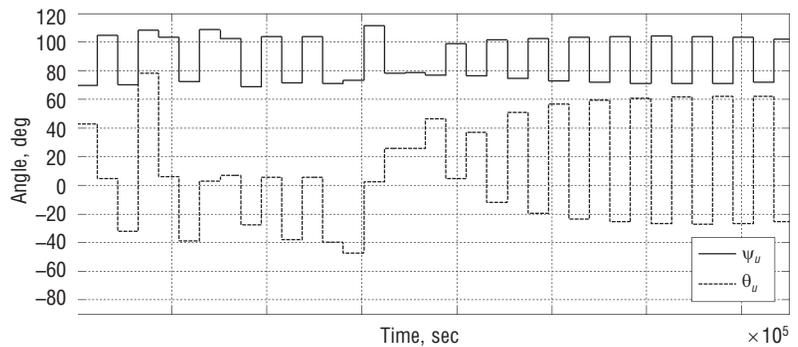


Fig. 16. Control angles of solar sail surface plane tilt.

References

1. V.P. Legostaev, E.A. Mikrin
Autom. Remote Control, 2013, 74(3), 331.
DOI: 10.1134/S0005117913030016.
2. F.A. Voronin, P.A. Pakhmurov, A.V. Sumarokov
Herald of the Bauman MSTU: Instrument Engineering, 2017, №1(112), 109 (in Russian).
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-109-122.
3. E.A. Mikrin, V.V. Kul'ba, B.V. Pavlov
Autom. Remote Control, 2013, 74(3), 348.
DOI: 10.1134/S0005117913030028.
4. E.A. Mikrin
On-Board Spacecrafts Control Systems: Tutorial [Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskikh apparatov: Ucheb. posobie], Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014, 245 pp. (in Russian).
5. P. Eykhoff
System Identification: Parameter and State Estimation, England, Chichester, Wiley, 1974, 555 pp.
6. R.C.K. Lee
Optimal Estimation, Identification, and Control, Ser. Massachusetts Institute of Technology (Cambridge Mass.), Research monograph, № 28, USA, Mass., Cambridge, MIT Press, 1964.
7. C.S. Draper, Y.T. Li
Principles of Optimizing Control Systems and an Application to the Internal Combustion Engine, USA, NY, New York, ASME, 1951, 160 pp.
8. H.P. Whitaker, J. Yamron, A. Kezer
Design of a Model Reference Adaptive Control System for Aircraft, Ser. Report (Massachusetts Institute of Technology. Instrumentation Laboratory), R-164, USA, Mass., Cambridge, MIT, Jackson & Moreland, 1958, 108 pp.
9. V.N. Branets, V.N. Platonov, A.V. Sumarokov, S.N. Timakov
J. Comput. Syst. Sci. Int., 2008, 47(1), 118.
DOI: 10.1134/S1064230708010152.
10. D.M. Klimov
Mech. Solids, 1983, №4, 57.
11. U.Sh. Purisamiashvili
Mech. Solids, 1989, №4, 17.
12. A.V. Sumarokov, S.N. Timakov
J. Comput. Syst. Sci. Int., 2008, 47(5), 795.
DOI: 10.1134/S1064230708050134.
13. D.A. Efimov, A.V. Sumarokov, S.N. Timakov
J. Comput. Syst. Sci. Int., 2012, 51(5), 732.
DOI: 10.1134/S106423071204003X.
14. S.N. Timakov
In Rocket-Space Technology. Proceedings. Ser. XII "Calculation, Design, Construction and Test of Space Systems", Iss. 1 "Communication satellite "Yamal". Onboard control complex. New solutions, [Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Trudy. Ser. XII "Raschet, proektirovanie, konstruirovaniye u ispytaniya kosmicheskikh sistem", vyp. 1 "Sputnik svyazi "Yamal". Bortovoye kompleks upravleniya. Noveye resheniya"], Ed. V.N. Branets, RF, Korolev, Korolev RSC "Energia" Publ., 2002, pp. 101–103 (in Russian).
15. S.N. Timakov
In Proc. Int. Conf. Bulky Spaces Structures ICOLASS-93 (RF, Novgorod, 18–20 May, 1993) [Materialy mezhdunarodnoy konferentsii po krupnogabaritnym konstruksiyam], Novgorod, Novgorod Politekhn. Inst. Publ., 1993, pp. 37–38 (in Russian).
16. V.N. Platonov, C.N. Timakov
Gyroscopy and Navigation, 1993, №2(2), 64 (in Russian).
17. S.N. Timakov, K.A. Bogdanov, S.E. Nefedov
Herald of the Bauman MSTU: Instrument Engineering, 2014, №5(98), 40 (in Russian).
18. S.N. Timakov, A.B. Zhirnov
Herald of the Bauman MSTU: Instrument Engineering, 2014, №3(96), 37 (in Russian).
19. A. Zhirnov, S. Timakov
In Proc. 65-th International Astronomical Congress IAC-14 (Canada, Toronto, 29 September – 3 October, 2014), C1.4.4 (http://iafastro.directory/iac/archive/tree/IAC-14/C1/4/IAC-14.C1.4.4.x24756.brief.pdf).
20. V.N. Branets, I.P. Shmyglevskiy
The Use of Quaternions in Solids Orientation Tasks [Primeneniye kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela], Moscow, Nauka Publ., 1973, 320 pp. (in Russian).
21. K.A. Bogdanov, A.V. Zykov, V.P. Legostaev, A.V. Subbotin, A.V. Sumarokov, S.N. Timakov
Problems of the Motion Control of a Spacecraft with a Rotating Solar Sail: Monograph, Ed. S.N. Timakov, RF, Korolev, Korolev RSC "Energia" Publ., 2016, 116 pp. (in Russian).

Управление полетами российских космических аппаратов

В.Е. Любинский, С.В. Соловьев, Н.В. Мишурова, А.М. Беляев

В настоящей статье указано место космонавтики в деятельности человечества. Кратко освещена роль С.П. Королева в ее становлении. Описаны основные особенности технологии управления полетами существующих космических аппаратов (КА). Обсуждаются особенности перспективных космических программ полетов КА и предъявляемых ими требований к технологии управления. Предлагаются основные направления совершенствования этой технологии.

Ключевые слова: космонавтика, управление космическим полетом, орбитальный комплекс, штатная эксплуатация.

За относительно короткое время (всего 60 лет) своего практического существования космонавтика стала неотъемлемой частью многоплановой деятельности человечества. Приобретение новых уникальных знаний в различных областях науки, создание новых технологий, решение на высоком уровне целого ряда таких серьезных задач, как, например, обеспечение глобальной связи, навигации, зондирования поверхности Земли, а также планомерное освоение внеземного пространства как возможной сферы распространения земной цивилизации в будущем – все это сделало космонавтику безусловно необходимой ветвью науки и техники.

Наша страна гордится тем, что она сыграла важную, первостепенную роль в становлении этой отрасли человеческой деятельности. Большая заслуга в этом принадлежит целому ряду исключительно талантливых личностей, к числу которых в первую очередь следует отнести академика С.П. Королева, главного конструктора первых в мире пилотируемых кораблей и автоматических аппаратов. Являясь в пятидесятых-шестидесятых годах прошлого столетия практически руководителем этого направления, обеспечивая создание первых уникальных пилотируемых и автоматических космических аппаратов (КА), он находил возможность обстоятельно заглядывать в будущее, чтобы направлять

развитие отечественной космической техники в нужную реальную сторону. Под его руководством разрабатывались первые проекты пилотируемых полетов к Марсу, исследования и освоения Луны человеком, сборки на околоземных орбитах крупных сооружений и орбитальных комплексов. Это делалось с целью выявить проблемы, связанные с выполнением этих задач, наметить пути их решения и спрогнозировать возможные сроки реализации перспективных проектов. Несомненно, он мечтал, что все это произойдет при его жизни и его участии.

И в настоящее время Россия занимает достойное место среди государств, продолжающих это дело. Пройдя первые этапы своего развития – накопление знаний, создание технологий космического полета, проведение поисковых исследований в различных областях науки, формирование направлений целевого применения созданных



ЛЮБИНСКИЙ
Валерий Евгеньевич
профессор,
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



СОЛОВЬЕВ
Сергей Владимирович
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



МИШУРОВА
Наталья Валерьевна
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева



БЕЛЯЕВ
Андрей Михайлович
Ракетно-космическая
корпорация «Энергия»
им. С.П. Королева

технологий и их совершенствование – российская космонавтика вступила в фазу перехода к практическому использованию (промышленному освоению) космоса.

Широкий спектр задач, решаемых сегодня космонавтикой, реализуется мировым сообществом с использованием пилотируемых кораблей и орбитальных станций, а также большого числа автоматических аппаратов различного назначения.

В процессе выполнения каждой космической программы создаваемые для этого космические аппараты проходят определенный жизненный цикл, включающий в себя в качестве основных этапов их разработку, изготовление, наземные испытания, летные испытания и эксплуатацию. Последние два завершающих этапа фактически определяют «отдачу» программы, то есть насколько окупаются вложенные в нее затраты труда и материальных средств.

Целью летных испытаний является подтверждение способности надежного решения КА задач, поставленных перед космической программой, в выполнении которой они используются, а также обеспечения безопасности их экипажей, если КА – пилотируемые. Летные испытания (ЛИ) пилотируемых КА в соответствии с существующей отечественной концепцией их осуществления в настоящее время проводятся следующим образом. ЛИ нового космического корабля на начальном этапе выполняются на его беспилотных образцах, а затем продолжают в пилотируемом варианте, как правило, совмещаясь в течение некоторого времени со штатной эксплуатацией корабля. ЛИ космического корабля, если его эксплуатация продолжается в течение длительного периода времени (это могут быть несколько серий одноразового, то есть рассчитанного на один полет, корабля либо длительно эксплуатируемый многоразовый

корабль), после его очередной модернизации могут выполняться сразу с участием экипажа. Такое решение зависит от результатов оценки степени риска в первых полетах, планируемых после проведения модернизации. ЛИ космических орбитальных станций проводятся на начальном, беспилотном, этапе их полета и продолжаются в процессе работы на них первых экспедиций. В ходе ЛИ КА проверяется качество и надежность работы его бортовых систем и выполнения космическим аппаратом всех режимов полета, реализация которых требуется при штатной эксплуатации.

Понятие «эксплуатация космических аппаратов и орбитальных комплексов» включает в себя следующие составляющие:

- выполнение целевой программы (достижение поставленных целей полета) с доставкой потребителям полученной информации и результатов проведенных исследований, экспериментов и технологических процессов;

- управление полетом, оценка работы бортовых систем КА, обеспечение требуемой надежности работы эксплуатируемой техники и безопасности экипажа КА;

- материально-техническое обеспечение пилотируемых космических орбитальных комплексов в ходе их полета, их обслуживание и ремонт, снабжение расходуемыми компонентами и необходимым оборудованием, удаление отходов и приборов, отработавших свой ресурс или неисправных;

- оценка эффективности технических решений, принятых на стадиях проектирования и доработки КА, получение информации, необходимой для подготовки рекомендаций по совершенствованию последующих КА;

- анализ технологии выполнения полета КА, подготовка предложений и рекомендаций по ее совершенствованию, по развитию средств и методов управления полетом, основанная на опыте эксплуатации данного КА.

В число компонент процесса эксплуатации орбитальных комплексов, (например российских станций «Салют», «Мир» и международной космической станции (МКС)) входит также выполнение транспортных операций (сближение, стыковка и спуск) кораблями, обеспечивающими доставку экипажей и грузов на станцию и их возвращение на Землю.

Одной из наиболее трудоемких и сложных составляющих процесса летных испытаний и эксплуатации космических аппаратов является управление их полетами, обеспечивающее надежность, безопасность полета и полноту достижения его цели.

При управлении полетом КА решается задача формирования оптимального плана полета и его



Рис. 1. Алгоритм процесса управления полетом.

безошибочной реализации, а в случае возникновения аномальных ситуаций – осуществления их парирования и продолжения полета с максимально возможной степенью выполнения его задач при заданном уровне безопасности экипажа.

В ходе управления полетом КА решаются следующие задачи:

- обеспечение движения КА по требуемой траектории;
- обеспечение надежного осуществления последовательности операций, необходимой для выполнения задания на полет;
- обеспечение безопасности экипажа КА, его здоровья и работоспособности;
- поддержание работоспособности КА;
- управление выполнением целевой (например научно-исследовательской) программы;
- обнаружение и парирование аномальных ситуаций, препятствующих решению перечисленных выше задач, ликвидация их последствий.

В ходе подготовки к управлению первым полетом нового КА обычно выполняются следующие работы.

1. Формирование концепции управления полетом данного КА, являющейся основой для дальнейшей разработки методов и средств управления полетом, а также для подготовки экипажа КА и наземного персонала.
2. Разработка наземной и бортовой документации по управлению полетом КА.
3. Обеспечение подготовки наземных средств управления полетом к летным испытаниям и эксплуатации КА.
4. Наземные испытания бортового комплекса автоматического управления, его отладка и проверка выполнения им функций управления полетом КА.

5. Подготовка наземного персонала и экипажа КА к управлению полетом.

Управление полетом космических аппаратов – сложный процесс (рис. 1), включающий в себя ряд логически связанных между собой компонентов:

- планирование полета, направленное на достижение заданной цели;
- обеспечение реализации разработанного плана, заключающееся в выработке в соответствии с этим планом и в выдаче на КА управляющих воздействий и сопутствующей им информации;
- контроль полета, включающий в себя наблюдение и оценку состояния и функционирования КА и его экипажа;
- принятие и выполнение решений по результатам контроля, требующих в ряде случаев корректировки плана полета.

В ходе управления полетом КА при выполнении основных компонентов этого процесса используется значительный объем информации, формирование которой, осуществляемое соответствующими звеньями, входящими в структуру системы управления полетом, принято называть информационным обеспечением управления полетом. Оно подразделяется на ряд видов:

- баллистико-навигационное обеспечение;

- командно-программное обеспечение;
- телеметрическое обеспечение;
- контрольно-диагностическое обеспечение;
- информационное обеспечение деятельности экипажа;
- методическое обеспечение деятельности экипажа;
- медицинское обеспечение;
- информационное обеспечение выполнения целевой программы.

Процесс управления полетом пилотируемых КА реализуется человеком-машинным комплексом, который представляет собой совокупность бортовых и наземных программно-технических средств, наземного персонала и экипажа КА. Этот комплекс принято называть автоматизированной системой управления космическим полетом (АСУ КП).

В состав АСУ КП пилотируемых космических аппаратов в настоящее время входят следующие три основных управляющих звена, каждое из которых способно выполнять все функции управления полетом или их часть:

1. Наземный комплекс управления (НКУ), включающий в себя Центр управления полетом (ЦУП), средства моделирования полета, средства обеспечения обмена информацией между НКУ и КА (наземные станции слежения и линии связи, соединяющие ЦУП со станциями слежения). В состав НКУ входит также спутниковая система контроля и управления, обеспечивающая, как и наземные станции, обмен НКУ с КА всеми видами информации. Каждая из упомянутых составляющих НКУ включает в свой состав, кроме технических средств, персонал, обслуживающий эти средства. В расположении ЦУП работает персонал, решающий информационную часть задач, связанных с выполнением компонент процесса управления полетом. Он образует так называемую Главную оперативную группу управления полетом КА,

в которую при управлении полетами пилотируемых и ряда автоматических КА входят представители ряда организаций, участвующих в выполнении конкретной космической программы. Главная оперативная группа управления полетом некоторых автоматических КА может быть целиком укомплектована специалистами, входящими в состав персонала ЦУП.

2. Бортовой комплекс автоматического управления (БКАУ), включающий в себя «интеллектуальную» часть в виде бортовой вычислительной системы (БВС) и коммутационно-исполнительную в виде приборов, преобразующих выходные сигналы БВС в релейные управляющие воздействия необходимого вида, выдаваемые на бортовые системы КА.

3. Экипаж КА со средствами управления бортовыми системами и отображения необходимой информации, персональными информационно-вычислительными средствами и средствами взаимодействия с НКУ и БКАУ.

АСУ КП в совокупности с космическим аппаратом (с его системами, агрегатами, механизмами и элементами конструкции), являющимся объектом управления, образует контур управления полетом. Структура контура управления полетом пилотируемого КА представлена на *рисунке 2*.

Все три управляющих звена (НКУ, БКАУ и экипаж) работают согласованно в соответствии с установленным распределением функций между ними, обмениваясь с объектом управления – КА и между собой необходимой информацией, в состав которой входят управляющие воздействия (УВ), телеметрическая информация (ТМИ), телевизионная информация (ТВИ), радиogramмы экипажу (РГ), сообщения экипажа (СЭ), цифровая информация (ЦИ) различного назначения и ряд других видов информации.

Структура контура управления полетом автоматических космических аппаратов отличается от приведенной на *рисунке 2* структуры отсутствием таких компонентов, как экипаж, бортовые средства отображения информации (СОИ), персональные ЭВМ и пульты космонавтов.

Решение ряда задач, ставящихся перед современной космонавтикой, требует применения определенной совокупности (комплекса) космических аппаратов, взаимодействующих в ходе полета с выполнением достаточно сложных совместных операций. К числу таких комплексов могут быть отнесены, например, российские орбитальные комплексы – станции «Салют» и «Мир» с транспортными кораблями «Союз» и «Прогресс», МКС с российскими кораблями «Союз», «Прогресс», американскими Shuttle, Dragon, Cygnus и др., евро-



Рис. 2. Структура контура управления полетом пилотируемого КА.

пейским ATV и японским HTV, а также китайская орбитальная станция «Тяньгун» и транспортные корабли «Шеньчжоу» и «Тянджоу». В обозримом будущем планируются разработка и реализация проекта лунной базы с транспортной системой Земля–околорунная станция–поверхность Луны, а также создание межпланетного экспедиционного комплекса, состоящего из межпланетного и посадочного кораблей.

Управление функционированием пилотируемых космических орбитальных комплексов является сложным многоплановым процессом, имеющим существенные особенности по сравнению с управлением полетом отдельных (автономных) космических аппаратов. Российская космонавтика приобрела значительный опыт в создании и применении эффективных методов выполнения этого процесса, который может быть положен в основу разработки методов управления работой перспективных космических комплексов.

Полеты космических аппаратов, являющихся элементами комплекса, могут проходить как по отдельности (в не соединенном друг с другом состоянии), так и в состоянии, когда они соединены вместе, образуя один сложный объект. Первый опыт полетов первого вида был получен в 1962 г., при выполнении одновременного полета двух пилотируемых кораблей «Восток» и в 1969 г. при одновременном управлении тремя пилотируемыми кораблями «Союз-6», «Союз-7» и «Союз-8», выполнявшими совместную программу.

Элементы, из которых состоят космические комплексы, как правило, представляют собой отличные друг от друга объекты управления. Кроме того, они могут быть созданы разными партнерами – как отечественными, так и международными. Все это влияет на методы управления полетом комплекса, организацию этого процесса, состав и характеристики используемых средств.

Принципы организации процесса управления полетом космического комплекса состоят в следующем.

Во-первых, основные операции управления полетом каждого элемента комплекса при управлении с земли должен выполнять отдельный коллектив специалистов (оперативная группа управления), хорошо знакомый с этим элементом и подготовленный к работе с ним.

Во-вторых, должны быть четко определены средства управления каждым из элементов комплекса. Если часть этих средств будет являться общей для нескольких элементов, должны быть установлены и соблюдены определенные правила их использования.

В-третьих, планирование полета комплекса должно проводиться на двух уровнях. Вначале разрабатывается план, общий для всех элементов комплекса, в котором увязываются во времени полетные операции, выполняемые каждым из них. Этим же планом определяются ресурсы системы управления полетом, выделяемые каждому элементу (например средства обмена информацией между центром управления и КА). На следующем, более низком, уровне формируются планы полета каждого элемента с соблюдением всех положений, установленных общим планом.

И в-четвертых, в программе полета комплекса могут присутствовать операции, в которых синхронизированно участвуют бортовые системы двух или более его элементов. Разработка этих операций проводится совместно специалистами по управлению элементами комплекса, участвующими в операции. В случае если управление элементами осуществляется из разных центров, то между ними должно быть организовано взаимодействие для согласования программы выполнения операции и выдачи управляющих воздействий.

Значительной спецификой обладает управление полетом КА в международных программах.

До настоящего времени в практике международного сотрудничества в области пилотируемой космонавтики с участием России реализовались следующие основные его виды.

1. На российский КА устанавливается целевая аппаратура партнера, которая работает по программе ее владельца. Российская сторона обеспечивает эту аппаратуру условиями, требуемыми для ее нормального функционирования, а программу, реализуемую с ее помощью, – необходимыми ресурсами. Партнер должен либо предоставить методику выполнения работ с его аппаратурой, либо самостоятельно

управлять этими работами, если такая возможность обеспечена. В ряде случаев с этой целью в состав экипажа КА может включаться космонавт – представитель партнера. Программа партнера интегрируется в план полета КА с соблюдением всех ограничений и правил планирования, установленных для нее и для данного КА. При этом в плане полета КА может появиться ряд специфических операций, связанных с ее выполнением. Ряд международных программ такого рода выполнялся на станциях «Салют» и «Мир».

2. С использованием КА, созданных двумя партнерами, отрабатываются сложные совместные операции в интересах перспективных программ. Такого рода сотрудничество в космосе осуществлялось в программах «Союз–Аполлон» (1975 г.), «Мир–Шаттл» (1994–1995 гг.) и «Мир–НАСА» (1995–2000 гг.), в ходе которых отрабатывались операции сближения и стыковки американских КА («Аполлон» и «Шаттл») с российскими, в первом случае – для создания в будущем системы спасения экипажей аварийных КА, во втором и третьем – для проведения на станции «Мир» ряда исследований американскими космонавтами, а также в целях обеспечения программы МКС, проект которой разрабатывался в 90-е гг.

3. В выполнении совместной программы используются КА различных партнеров, интегрированные в единый космический комплекс и функционирующие по единому плану. К такому виду программ принадлежит программа МКС, эксплуатация которой осуществляется в настоящее время совместно несколькими международными партнерами, включая Россию, США, государства, входящие в состав европейского космического агентства, Японию, Канаду и другие страны.

4. Взаимная помощь различных стран друг другу в обеспечении, при необходимости, полетов КА другой страны средствами своих наземных сегментов, например предоставление услуг связи через свои наземные станции, спутники-ретрансляторы и т.д. Такое сотрудничество имело место в программе станции «Мир», когда американская сторона предоставляла российской стороне возможность использования двух своих наземных станций слежения для обеспечения голосовой связи с экипажем. В программе МКС в настоящее время имеется возможность использования американского канала связи через спутниковую ретрансляционную систему TDRSS для передачи российской телеметрической, командно-программной, голосовой и телевизионной информации.

Партнерами по программе МКС были согласованы и успешно реализуются следующие основные

принципы эффективного совместного управления ее полетом.

Российская и американская стороны для управления своим сегментом станции используют собственные наземные и бортовые комплексы управления. При необходимости российская и американская стороны могут предоставлять друг другу возможность использования средств управления полетом, принадлежащих партнеру. При невозможности осуществить функцию, выполняемую сегментом одного из партнеров, эта функция выполняется сегментом другого партнера, если он обладает такой возможностью.

Характерной особенностью международных космических орбитальных комплексов, подобных МКС, с точки зрения управления их полетом является наличие так называемых мультисегментных (совместных) операций, то есть операций, в выполнении которых участвуют бортовые системы сегментов комплекса, принадлежащих различным партнерам. Разработка и отладка таких операций в части как совместного функционирования двух «бортов», так и в технологии управления ими из разных центров должны проводиться партнерами совместно, а в ходе их реализации должно осуществляться координирование действий сторон с достаточным широким обменом всей необходимой для этого информацией. Кроме того, выполнение какой-либо из сторон операций, влияющих на сегмент партнера, должно быть согласовано с партнером. В процессе совместного управления полетом МКС необходимо учитывать большое количество различных ограничений, требований и других факторов, касающихся МКС в целом.

Взаимодействие Главной оперативной группы управления полетом Российского сегмента МКС с партнерами предусматривает значительное количество процедур: совместную разработку планов полета, согласование программ выполнения совместных операций, телеконференции для обсуждения и решения текущих проблем и вопросов, согласование использования средств партнера, баллистических данных, обсуждение результатов моделирования полета и т.д.

Поскольку в обозримый период времени целый ряд перспективных космических программ, по-видимому, целесообразно осуществлять совместно, международным сообществом в технологии управления полетами по этим программам необходимо будет использовать и развивать ценный опыт, приобретенный в ходе выполнения программы МКС, работающей на орбите с 2000 г.

Автоматические КА (АКА) решают широкий круг народно-хозяйственных задач, в том числе

обеспечение услугами связи, получение разнообразных данных дистанционного зондирования, обеспечение навигационной информацией в глобальном масштабе, а также расширяется применение АКА для научных и фундаментальных исследований. В основном АКА создаются для решения одной или нескольких смежных целевых задач. Часть этих задач требует создавать орбитальные группировки АКА. Наиболее ярким примером орбитальной группировки является навигационная космическая система ГЛОНАСС, в состав которой в настоящее время входит 27 АКА.

АКА различного назначения эксплуатируются на самых разнообразных орбитах, в том числе низких околоземных, высокоэллиптических, геостационарных и т.д. АКА, предназначенные для решения научных задач, часто находятся на весьма сложных орбитах, а межпланетные АКА функционируют на отлетных и незамкнутых траекториях.

Перечисленные выше особенности и большое разнообразие АКА накладывает свой отпечаток и на технологию управления полетом АКА. В целом, по сравнению с пилотируемыми полетами эта технология отличается простотой как по разнообразности управляющих воздействий и выполняемых полетных операций, так и по объему информации о состоянии АКА. Общим, но менее разнообразным, является и укрупненный набор задач, которые решаются службой управления, а именно:

- планирование полета, включая планирование целевого применения;
- командно-программное управление;
- контроль состояния АКА и выполнения им программы полета;
- баллистико-навигационное обеспечение;
- обеспечение функционирования наземных средств управления.

Технические средства управления полетом АКА, входящие в НКУ, как правило, включают в свой состав ЦУП как основное интеллектуальное звено в системе управления, земные станции, обеспечивающие информационный обмен с АКА и систему передачи информации между различными элементами НКУ. Для обеспечения непрерывности функционирования АКА в состав НКУ включают резервные пункты управления, основная задача которых – управление полетом при форс-мажорных обстоятельствах, например природного или техногенного характера. Для этого они оснащаются минимально необходимым набором технических и программных средств управления. Для орбитальных группировок АКА на низких околоземных орбитах существует необходимость в установлении оптимального размещения и количественного состава земных станций для надежного и эффективного управления полетом.

Спутниковый контур управления в настоящее время в практике эксплуатации АКА не применяется, но в этом направлении существуют определенные наработки и предложения, которые существенно повышают возможности по передаче информации. Это позволяет утверждать, что в недалеком будущем для отдельных типов АКА, в первую очередь дистанционного зондирования Земли, возможно применение и таких технологий.

Особенности организация процесса управления АКА по сравнению с пилотируемыми полетами состоят в следующем.

Для каждого вида АКА, так же, как и для пилотируемых КА, выделяются две фазы жизненного цикла – летные испытания и штатная эксплуатация. Летные испытания проводятся, как правило, специалистами-разработчиками АКА, а после передачи АКА в штатную эксплуатацию управление полетом передается либо специализированной

организации, либо заказчику (владельцу) этих АКА, которые имеют собственные службы управления полетом.

Поскольку АКА обеспечивают выполнение многих технологических задач на земле, в процессе их эксплуатации недопустимы перерывы в работе по причинам, связанным с выполнением ими каких-либо непредвиденных полетных операций, вызывающим прерывание выполнения целевой задачи. То есть планирование полета ориентировано в первую очередь на обеспечение постоянного или требуемого по программе полета функционирования полезной нагрузки АКА. Если это невозможно, то реализуется схема резервирования за счет некоторого избытка АКА в орбитальной группировке. Так, например, в системе ГЛОНАСС для этой цели на орбите имеются резервные АКА.

При управлении группировками АКА его отличительной чертой является задача обеспечения совместного функционирования аппаратов в составе космической системы. При этом наряду с увеличенным объемом вопросов баллистико-навигационного обеспечения необходимо отдельно решать задачу поддержания структуры и взаимного положения орбитальной группировки или обеспечивать коллокацию КА в рабочей точке или в смежных рабочих точках на геостационарной орбите.

АКА связи выполняют роль инструмента для реализации коммерческих программ и получения дохода от их эксплуатации. Поэтому существует экономическая мотивация реализации или даже превышения проектных сроков штатного функционирования на орбите. Службы управления полетами подобных АКА должны осуществлять свою деятельность при технически обоснованном минимальном составе технических средств и персонала управления.

Обширная перспектива развития космонавтики требует непрерывного совершенствования технологии управления полетами создаваемых космических аппаратов в направлении обеспечения качества и надежности выполнения ставящихся перед ними задач и безопасности их экипажей. Эти работы в настоящее время ведутся с таким расчетом, чтобы их результаты опережали разработку перспективных КА. Их выполнение со значительным запасом времени по отношению к ожидаемой реализации перспективных космических программ необходимо для того, чтобы заранее выявить проблемы, требующие новых решений, и наметить пути их преодоления. Это позволит своевременно сформулировать ряд детальных требований к бортовым системам перспективных КА, отбору и подготовке их экипажей как звена системы управления полетом, а также к аппаратному и программному оснащению систе-

мы управления полетом. При этом формы реализации указанных требований могут быть достаточно глубоко проработаны за время, остающееся до начала практического осуществления проектов перспек-

тивных КА, и апробированы в наземных испытаниях, а также в ходе полетов КА, находящихся в эксплуатации.

Литература

1. В.Е. Любинский, В.А. Соловьев ОНТЖ «Полет», 2005, №6, 3.
2. В.А. Соловьев, В.Е. Любинский, Е.И. Жук Научн. Ж. Пилотируемые полеты в космос, 2012, №1(3), 15.
3. В.А. Соловьев, Л.Н. Лысенко, В.Е. Любинский Управление космическими полетами: Учеб. пособие в 2-х частях, Москва, Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 480 с., 432 с.
4. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева: 1946–1996, под ред. Ю.П. Семенова, Москва, Изд. РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 1996, 670 с.
5. В.Г. Кравец, В.Е. Любинский Основы управления космическими полетами, Москва, Машиностроение, 1983, 224 с.

English

The Russian Spacecrafts Flight Control

Valery E. Lubinsky

Professor,

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
valery.lubinsky@rsce.ru

Sergey V. Soloviev

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
Sergey.soloviev@scsc.ru

Natalia V. Mishurova

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
trigonella@mail.ru

Andrey M. Belyaev

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia
4a, Lenin Str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia
Andrey.Belyaev@sloc.ru

Abstract

The paper emphasizes the position that astronautics occupies in human activity. S.P. Korolev’s role in the establishing the space industry is briefly analyzed. The authors summarize the main features of the modern spacecrafts flight control technologies. The perspective space flights programs peculiarities and their requirements to the modern spacecrafts control technologies are discussed. The principal directions of the control technology improvement are suggested.

Keywords: astronautics, space flight control, orbital complex, regular operation.

Images & Tables

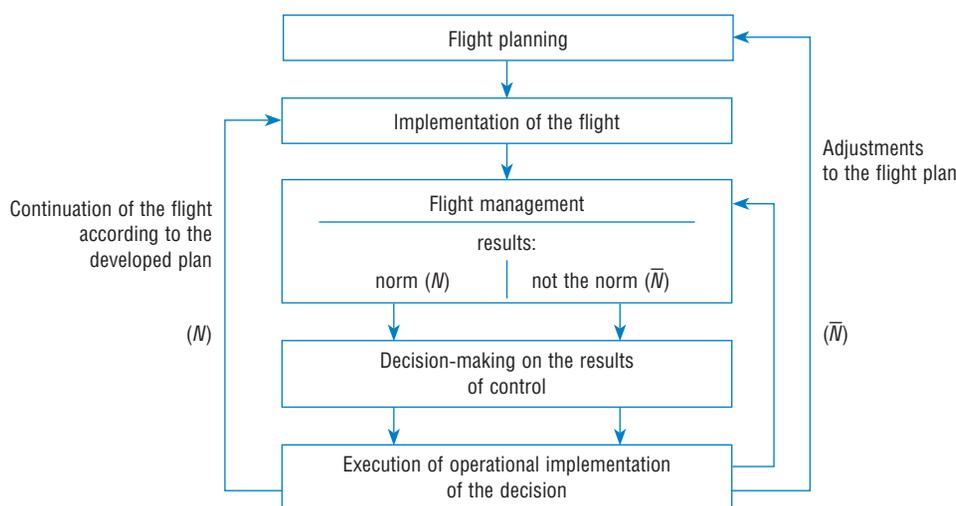


Fig. 1. Algorithm of the flight control process.

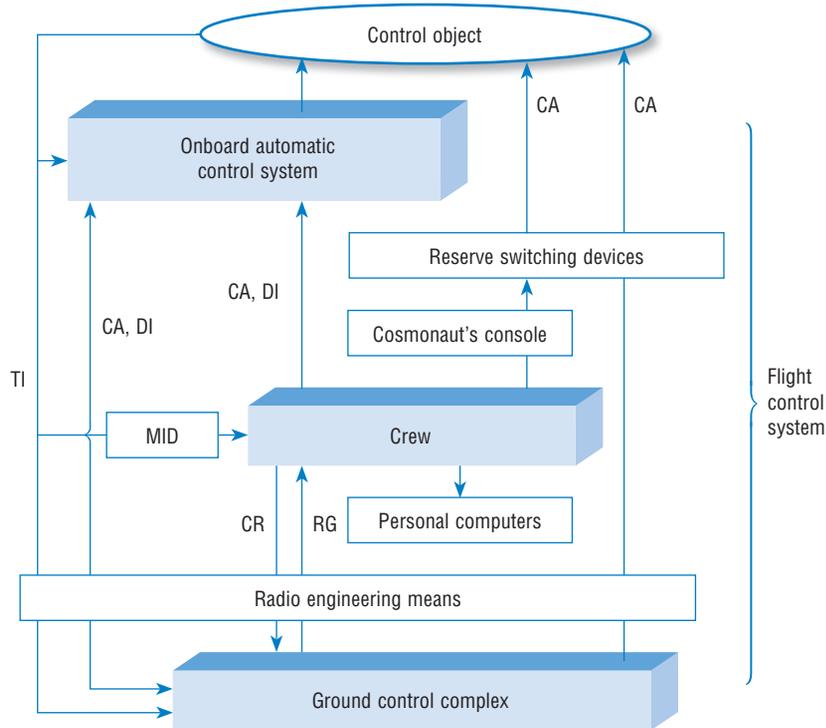


Fig. 2. The flight control circuit of the manned spacecraft.

References

1. V.E. Lyubinsky, V.A. Solovov
All-Russian Sci.-Techn. J. "Polyot" ("Flight"), 2005, №6, 3
(in Russian).
2. V.A. Soloviov, V.E. Lubinskiy, E.I. Zhuk
Sci. J. Manned Spaceflight, 2012, №1(3), 15
(in Russian).
3. V.A. Soloviov, L.N. Lysenko, V.E. Lubinskiy
Space Flight Control: Tutorial in 2 Vols [Upravlenie kosmicheskimi poletami: Ucheb. posobie v 2 chastyakh], RF, Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009, 480 pp., 432 pp. (in Russian).
4. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia": 1946–1996 [Raketno-kosmicheskaya korporatsiya "Energiya" imeni S.P. Koroleva: 1946–1996], Ed. Yu.P. Semenov, RF, Korolev, Korolev RSC "Energia" Publ., 1996, 670 pp. (in Russian).
5. V.G. Kravets, V.E. Lyubinsky
The Fundamentals of Space Flights Control [Osnovy upravleniya kosmicheskimi poletami], USSR, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 224 pp. (in Russian).

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» – 58 лет на службе космосу и Отчизне

Н.А. Тестоедов, В.Е. Косенко, Е.Н. Головенкин, В.В. Кудинов, Ю.В. Вилков, Ф.К. Синьковский

В статье представлены материалы по вопросам создания, становления и развития космической промышленности в Сибирском регионе Российской Федерации, истории создания автоматических космических аппаратов связи и телевидения, ретрансляции, навигации и геодезии в АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева».

Ключевые слова: космос, космические аппараты, связь, телевидение, ретрансляция, навигация и геодезия.

Эра мировой практической космонавтики началась 4 октября 1957 г. запуском СССР первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) ПС-1. Успешным запуском ПС-1, созданного учеными, конструкторами и рабочими, наша страна внесла крупнейший вклад в сокровищницу мировой науки и техники.

В 1970-е гг. академик М.Ф. Решетнев писал: «Человечество вышло в космос для того, чтобы изучить его, искать возможности для службы его землянам. Сегодня мы стоим на первой ступени его познания и главная задача – научиться использовать то, что уже постигли, на благо людей. Космическая связь, навигация, геодезия, метеорология – это то, что сегодня служит человечеству и без чего уже нельзя достойно жить. Полеты к ближним и дальним планетам, работа человека в космосе – это первые шаги в интересное будущее. Но служить космосу непросто – нужны самоотверженность, творчество, упор-

Так много сделано и пройдено!
Как мало еще достигнуто,
Как много еще предстоит осуществить!
С.П. Королев

ство, любовь к своему делу и вера в мечту» [1].

Прошло всего 60 лет с начала космической эры, а сколько сделано человечеством во имя познания, освоения и использования космического пространства автоматическими космическими аппаратами (АКА) разного класса и назначения! В настоящее время трудно найти область знаний и жизнедеятельности человека, где бы не использовались результаты создания, развития и эксплуатации отечественных автоматических космических аппаратов. Отечественные АКА обеспечивают непрерывную работу телевидения и радио, телефонной и телеграфной связи всех регионов России, обе-



ТЕСТОЕДОВ
Николай Алексеевич
член-корреспондент РАН,
профессор, Генеральный директор
компании «Информационные
спутниковые системы
им. академика М.Ф. Решетнева»



КОСЕНКО
Виктор Евгеньевич
профессор,
Информационные
спутниковые системы
им. академика
М.Ф. Решетнева



ГОЛОВЕНКИН
Евгений Николаевич
профессор,
Информационные
спутниковые системы
им. академика
М.Ф. Решетнева



КУДИНОВ
Владимир Васильевич
Информационные спутниковые
системы им. академика
М.Ф. Решетнева



ВИЛКОВ
Юрий Вячеславович
Информационные
спутниковые системы
им. академика
М.Ф. Решетнева



СИНЬКОВСКИЙ
Федор Константинович
Информационные
спутниковые системы
им. академика
М.Ф. Решетнева

спечивая связь с любым абонентом Земли, обладающим соответствующими наземными средствами. Наши АКА помогают ученым, капитанам кораблей, летчикам и штурманам с высокой точностью прокладывать трассы, изучать географию Земли, с высокой точностью определять местоположение любой точки, предсказывать погоду, спасать заблудившихся, терпящих бедствие на громадных просторах планеты.

Идеи размещения радиостанций на околоземных орбитах для установления радиосвязи на сверхдальних расстояниях высказывались давно – еще в годы Второй мировой войны, задолго до запуска в СССР под руководством С.П. Королева первого в мире искусственного спутника Земли, английский ученый и фантаст Артур Кларк предложил ставшую уже классической для мирового рынка телекоммуникаций схему радиовещания через геостационарные спутники.

Поэтому было вполне естественно, что даже первый «простейший» советский ИСЗ, созданный в Особом конструкторском бюро ОКБ-1 под руководством С.П. Королева, был оснащен радиопередатчиком для трансляции сигналов из космоса на Землю. И неудивительно, что эти сигналы, подобно сигналам гигантского общемирового будильника, «пробудили» человечество не просто к «полетам в космос», но к его научно-познавательному и технологическому «освоению» с использованием всех имеющихся в данный момент «информационных технологий».

В СССР работа по освоению космоса в интересах развития новых видов радиосвязи в рамках зарождающейся и бурно развивающейся ракетно-космической отрасли шла по нескольким направлениям.

Основными поначалу были три проекта, предлагавшиеся двумя главными предприятиями: проект более мощного высокоорбитального спутника «Молния» ОКБ-1 С.П. Ко-

ролева и проекты легких низкоорбитальных спутников «Стрела» и Пчела» ОКБ-586 М.К. Янгеля.

Сергей Павлович Королев как признанный лидер в создании реально летающих первых космических аппаратов (КА) был сторонником проведения масштабных долгосрочных работ широким фронтом и уже добился выдающихся успехов за счет запуска на ракетносителях (РН) типа Р-7, различных по назначению и составу довольно сложных герметичных КА, созданных полностью на основе имеющейся в СССР компонентной базе.

Основываясь на опыте создания своих первых ИСЗ, научных КА и кораблей-спутников с человеком на борту, ОКБ-1 в 1961 г. разработало проект КА массой около 1.6 т с запуском на 12-часовую высокоэллиптическую орбиту (ВЭО). Это был проект КА связи «Молния».

Следует отметить, что еще в 1958–1959 гг. С.П. Королев выступил инициатором создания в СССР новых производственно-научных площадок (ПНП) с заводами, конструкторскими бюро (КБ), научно-исследовательскими институтами (НИИ) в Поволжье, на Урале и в Сибири – в удаленных от центра регионах, которые могли бы сохранять существенный потенциал ракетно-космической отрасли в случае военных конфликтов и в то же время служили бы своеобразными точками роста в тех частях СССР, которые богаты энергетическими, металлургическими и иными сырьевыми ресурсами для самодостаточного развития. Очевидно, и это понимали все, что даже в условиях мощной плановой государственной централизованной экономики при этом потребуются значительные в масштабах государства первоначальные материальные и иные затраты и, в первую очередь, надо будет преодолеть кадровый дефицит. С.П. Королев умел заглядывать далеко вперед, видел за текущими трудностями огромные перспективы и глубоко осознавал колоссальные возможности, которые могут открыть для страны эти новые ПНП космической научно-производственной деятельности на Волге, Урале и Енисее.

Так в 1959 г. на базе «Красноярского машиностроительного завода» («Красмаша») началось формирование мощной сибирской ракетно-космической ПНП и ученик С.П. Королева, его заместитель 35-летний кандидат технических наук М.Ф. Решетнев был назначен начальником Сибирского филиала ОКБ-1 (с 1961 г. самостоятельное ОКБ-10) в закрытом городе Красноярске-26 (ныне Железногорск, Красноярского края).

В то же время прагматичные американцы уже к началу 1960-х годов стали активно искать и апробировать на орбитах новые технологии связи и навигации через малые КА, запускаемые более

легкими и дешевыми РН. Поэтому практически одновременно с работами по королевскому проекту «Молния» (ОКБ-1, Подлипки) Правительством СССР были поддержаны также проекты молодого, но тоже успешного и быстро развивающегося ОКБ-586 (главный конструктор М.К. Янгель, г. Днепрпетровск) – проекты по созданию легких и относительно недорогих РН типа «Космос» и разработке ряда малых КА под эти РН, в частности КА связи «Стрела» и «Пчела».

Проработки по этим легким конверсионным РН и новым типам КА в ОКБ-586 проводились с начала 1960-х, но, как и в случае с проектом «Молния» в ОКБ-1, продвигались не так быстро, как требовалось, чтобы не отстать от американцев и получить практическую выгоду для страны. В ОКБ-586 и на «Южном машиностроительном заводе» на Днепре успели создать лишь первую версию семейства РН «Космос» – на базе боевой баллистической ракеты средней дальности (БРСД) Р-12, ставшей к тому времени уже основой только зародившихся Ракетных войск стратегического назначения. Заниматься созданием более мощной и более актуальной для СССР РН легкого класса на базе ракеты Р-14, а тем более созданием принципиально новых низкоорбитальных КА связи типа «Стрела» и «Пчела» М.К. Янгелю и его КБ было довольно обременительно, так как это отвлекало силы и ресурсы от архиважных, сверхприоритетных для обороны страны разработок мощных межконтинентальных ракет типа Р-16, Р-36 и др.

Так, в начале 1960-х годов М.К. Янгель вслед за передачей изготовления своей БРСД Р-14 на «Красмаш» передал для дальнейшей разработки и реализации последующего развития в ОКБ-10 своему последователю М.Ф. Решетневу эскизные проекты новой РН, которая в дальнейшем получила обозначение «Космос-3», а наибольшую известность и за-

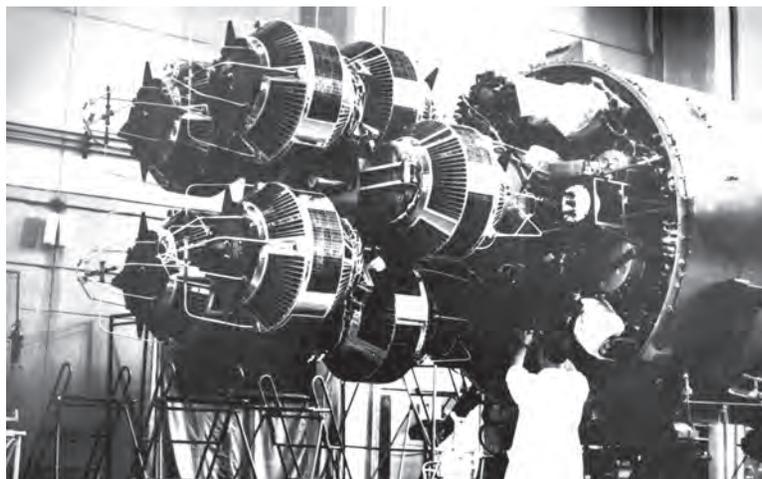


Рис. 1. Блок из восьми КА «Стрела-1М» при подготовке к запуску на РН «Космос-3М».

служенную славу самой надежной и экономичной РН легкого класса в мире приобрела под названием «Космос-3М». Одновременно были переданы и эскизные проработки по проектам двух новых малых КА связи, которые и были успешно реализованы, доведены до практического использования в ОКБ-10 под руководством М.Ф. Решетнева.

18 августа 1964 г. с временного, приспособленного стартового комплекса на космодроме Байконур первым же пуском нашей РН типа «Космос-3», изготовленной в Сибири, были успешно выведены на низкую орбиту три макетных образца КА «Стрела-1». Так, 18 августа 1964 г. навсегда стало праздником ОКБ-10 – днем рождения Сибирского спутникостроения. А уже через четыре дня с космодрома Капустин Яр на днепрпетровской более легкой РН «Космос» были запущены первые экспериментальные, реальные действующие КА персональной (ведомственной) связи типа «Стрела-1».

Конечно, это были относительно легкие и простые по функциональным возможностям КА, которые, тем не менее, очень скоро стали запускаться на РН «Космос-3», «Космос-3М» целыми блоками по 3–8 КА (рис. 1) одновременно и тем самым впервые в мире под руководством М.Ф. Решетнева было положено начало развитию малых космических аппаратов, многоспутниковых низкоорбитальных группировок, которые становятся особенно популярными в последнее время и рассматриваются едва ли не как самое передовое, новое направление развития спутниковой связи. А РН «Космос-3» получила путевку в жизнь и вскоре в модифицированном виде стала основной в легком классе, составляя в советской космонавтике базовую триаду средств выведения наряду с РН среднего класса типа Р-7 главного конструктора С.П. Королева и РН тяжелого класса «Протон» главного конструктора В.Н. Челомея.

По проекту, первоначально называвшемуся «Пчела», а реализованному под названием «Стрела-2», работы шли примерно в те же годы и первый запуск КА «Стрела-2» массой около 770 кг на той же РН «Космос-3» с Байконура состоялся в конце 1965 г.

Первые американские спутники связи типа «Телстар», «Реле», «Синком», запущенные в 1962–1963 гг., тоже были маломощны и невелики по массе, габаритам и возможностям (60–180 кг, менее 1 м диаметром), так что уже первыми своими запусками ОКБ-10 реально вошло в узкий круг передовых космических фирм в области прикладной космической деятельности. За счет более интенсивных запусков различных РН, включая «Космос-3», СССР начал сокращать отставание от США по количеству и типам запускаемых КА и вскоре вышел в лидеры, сохраняя первую позицию в мире. А реально работающие многоспутниковые группировки «Стрел» были введены в опытную эксплуатацию в 1965 г., и с тех пор четыре поколения сибирских низкоорбитальных спутниковых созвездий последовательно и непрерывно работали и продолжают работать сегодня.

Параллельно с созданием многоспутниковых низкоорбитальных группировок с 1964 г., в соответствии с упомянутой выше инициативой С.П. Королева, в Сибири началось освоение производства и более тяжелых спутников «Молния», переданных из ОКБ-1. Для молодого производства в Красноярске-26 это стало новым, качественным рывком в технологическом развитии, в организации производства по новым кооперационным связям (география поставок комплектующих элементов, узлов, приборов расширилась практически на весь Советский Союз). Однако огромная кропотливая работа над повышением эксплуатационных характеристик КА, доведение их до кондиций системного применения в соответствии с требо-

ваниями реальной радиосвязи – все это еще только предстояло пройти, набирая собственный опыт.

Таким образом, полвека назад с выводом на орбиту КА «Молния-1» перед молодым коллективом сибирского космического предприятия во главе с М.Ф. Решетневым открылась дорога в неисчерпаемую и постоянно востребованную область космических телекоммуникационных систем и систем связи. Судьбоносное решение С.П. Королева передать в Сибирь работы по производству КА «Молния-1» на этапе его летных испытаний подтвердило свою верность в кратчайшие сроки – менее чем за два года решетневцы серьезно доработали новый КА и осуществили его запуск.

Идея создания КА «Молния-1» принадлежала самому С.П. Королеву и заключалась в разработке КА, способного принимать сигнал с Земли и транслировать его в отдаленные уголки огромной страны, обеспечивая телевидением и радиосвязью почти всю территорию нашего Советского Союза.

В 1960-е гг. телевизор был настоящей редкостью, канал был только один, а передачи транслировались лишь в определенное время. В те годы в нашей стране имелось 100 мощных телевизионных станций, радиус действия сигнала которых не превышал 100 км, и еще 170 ретрансляционных станций, передававших его и вовсе не дальше 15 км. Всю территорию огромного государства они, конечно, охватить не могли. Потому большинство людей по всей стране, особенно в глубинке, узнавало новости лишь из газет, в лучшем случае – из коротких радиопередач. И не столько потому, что обзавестись телевизором было непросто. Телесигнал был доступен далеко не везде.

Замысел по созданию КА для обеспечения телевидения и радиосвязи был поистине грандиозен, и, конечно же, его реализация требовала большой работы. Воплощение задумки в жизнь начала команда С.П. Королева в ОКБ-1. В 1965 г. в ОКБ-1 был изготовлен и запущен первый КА для прохождения летных испытаний. Но С.П. Королев вскоре был вынужден оставить эту тематику, ибо его московскую команду ждали важные государственные задачи в области пилотируемой космонавтики, которой в СССР отводилась ведущая роль, поэтому работу по созданию «Молнии-1» он решил передать в Сибирский филиал, возглавляемый М.Ф. Решетневым (ныне АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева) (АО «ИСС»)).

Прибыв в Красноярск и познакомившись с закрытым городом, где работал Сибирский филиал, и с коллективом М.Ф. Решетнева, С.П. Королев окончательно уверился в правильности своего решения по выбору места и времени создания новой

организации и убедился, что не ошибся при назначении его руководителем.

Предчувствуя большое будущее, М.Ф. Решетнев и его молодая команда не испугались нового задания. Несмотря на то, что Михаил Федорович и сам приложил немало усилий, чтобы получить разработку москвичей, все-таки С.П. Королев выбрал именно его предприятие неспроста. Сергей Павлович высоко оценил его конструкторский талант и организаторское чутье, позволившее собрать под Красноярском молодой, энергичный и способный на многое коллектив разработчиков.

Доверие С.П. Королева сибирские спутнико-строители оправдали. Оценив результаты летных испытаний экспериментальной «Молнии», в рекордные сроки они доработали проект и создали усовершенствованные аппараты. Запустив на орбиту в мае 1967 г. свою первую «Молнию» и еще два КА в октябре того же года, сибиряки положили начало развитию спутниковых систем на ВЭО, чего еще в мире не было. И уже 2 ноября 1967 г. первая в своем роде система «Орбита» официально была введена в эксплуатацию. Возможность связаться с любым городом, почувствовать себя причастным к важнейшим событиям, узнавать о жизни в государстве и за его пределами с помощью телевизионных экранов стала реальностью для большей части населения страны. Это был настоящий прорыв в науке и технике того времени.

Космическая система, в составе которой работали КА «Молния-1» (рис. 2), позволяла осуществлять двухстороннюю круглосуточную многоканальную телефонную, фототелеграфную и телеграфную связь от Москвы до Владивостока. Она обеспечила возможность расширить телевидение на территорию всей страны, увеличив аудиторию Центрального телевидения на 20 миллионов человек. Работа системы осуществлялась не только в интересах гражданских потребителей, но также в интересах Министерства обороны и Правительства Советского Союза. Это было обусловлено уникальностью КА «Молния-1» как аппарата многоцелевого назначения – спектр выполняемых ею задач постоянно расширялся.

О том, какого высокого уровня была эта разработка, можно судить и по ее надежности. На тот момент, когда возникла необходимость увеличить гарантийный срок активного существования данных КА до трех–пяти лет, сибирские «Молнии» (рис. 2) уже продемонстрировали устойчивую работу на орбите по пять, а некоторые экземпляры и до девяти лет!

Создание «Молний» стало значительным шагом вперед в истории космической отрасли и Совет-

ского Союза, а сибирские спутнико-строители стали по праву считаться пионерами в освоении высокоэллиптической орбиты.

Проект «Молния-1» был одним из первых, над которым работали сибирские спутнико-строители. В нем они проявили свои способности исследователей, изобретателей и новаторов. И хотя в тот период времени, когда начала создаваться «Молния-1», в нашей стране и во всем мире больше интересовались пилотируемой космонавтикой, предприятие сделало упор на «умные» КА, приносящие практическую пользу стране и ее народу, значение которой и тогда, 50 лет назад, и сегодня сложно переоценить.

Но на этом достижении решетневцы не поставили точку в истории побед «Молнии». Одна из ее модификаций, получившая название «Молния-1С», по инициативе М.Ф. Решетнева впервые в отечественной спутнико-строительной практике была запущена на геостационарную орбиту. Этот запуск был «разведкой» и дал сибирякам успешный старт для использования орбиты, которая и по сей день остается наиболее эффективной и коммерчески востребованной областью космического пространства. «Молния-1С» на несвойственной ей орбите функционировала более трех лет, в течение которых все задачи этого запуска были решены.

В ОКБ-10, а позднее КБ прикладной механики (КБПМ) было создано целое семейство модификаций аппаратов типа «Молния»: «Молния-1», «Молния-1С», «Молния-1Т», «Молния-2», «Молния-3», «Молния-3К». Всего за полвека истории этой серии компания изготовила 96 спутников «Молния-1», а если считать все усовершенствованные версии – то более 150. Два космических аппарата «Молния-1» остались на Земле и позже были переданы в высшие учебные заведения в качестве наглядных пособий. Последний подобный спутник – «Молния-1Т» –

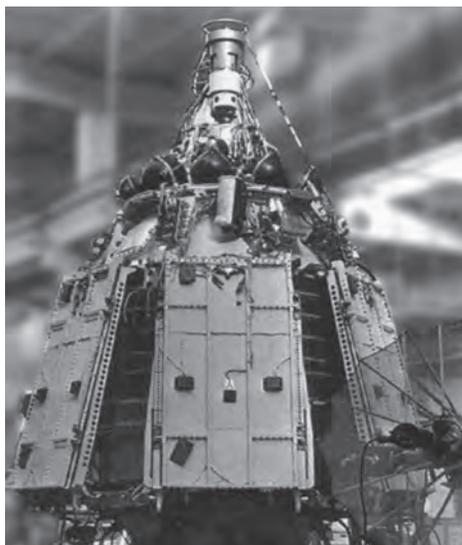


Рис. 2. КА «Молния-1» в сборочном цехе.

был выведен на орбиту 2 апреля 2003 г. Отслужив 10 лет на орбите, он переработал гарантированный срок активного существования в несколько раз и в 2013 г. был выведен из эксплуатации.

Отталкиваясь от опыта работы ОКБ-1, в ОКБ-10 (позднее – КБПМ, НПО ПМ) над КА «Молния-1» очень многому пришлось обучаться и преодолевать ранее не ведомые проблемы самим – проектантам и конструкторам, технологам и управленцам, участвующим в организации и обеспечении запусков и поддержании систем по ходу их эксплуатации, управления КА на орбитах. Началась и практически непрерывно стала вестись кропотливая работа по устранению слабых мест, ненадежных критичных элементов в КА, существенному усовершенствованию устройств исполнительной автоматики, механических систем и приводов, антенных систем, солнечных и аккумуляторных батарей, приборов ориентации и стабилизации, блоков управления системами, двигательных установок и др.

Серийность и стабильность, качество сборки и испытаний модифицированных КА «Молния-1» в Сибири, своевременность запусков с космодромов требовалось организовать таким образом, чтобы в системе «Орбита» всегда находи-

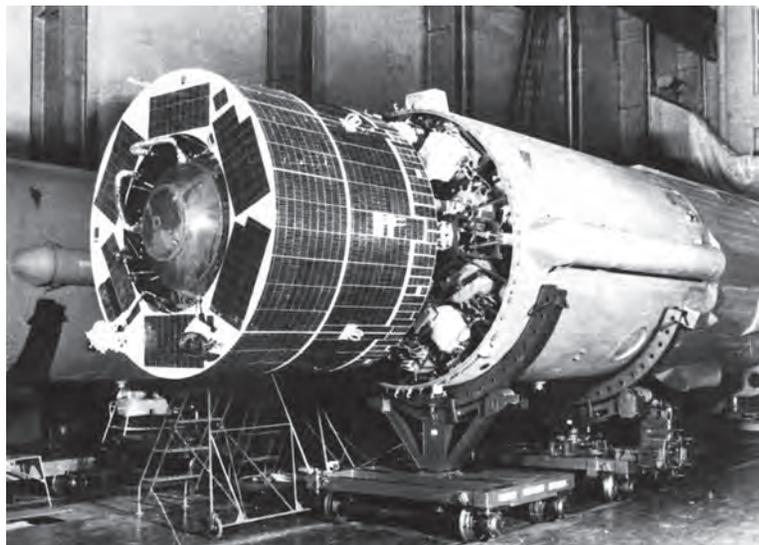


Рис. 3. КА «Сфера» при подготовке к запуску на РН «Космос-3».

лось необходимое количество работоспособных и синхронизировано длительно работающих КА. И это удалось сделать 50 лет назад – в подарок стране к 50-летию юбилею Великой Октябрьской социалистической революции. В мае – октябре 1967 г. запусками трех обновленных сибирских «Молний» была впервые в мире сформирована требуемая для непрерывной эксплуатации стабильная орбитальная группировка, обслуживающая все Северное полушарие. С тех пор и до настоящего времени на ВЭО не прекращается эксплуатация все более мощных и надежных, полностью себя окупающих сибирских КА связи, которые эффективно обеспечивают услуги связи в интересах как народного хозяйства, так и обеспечения обороноспособности страны.

Еще более значимым результатом работы решетневского КБПМ к концу 1960-х годов стало то, что впервые в СССР и в мире в те же годы, когда осваивались круговые и высокоэллиптические орбиты для задач спутниковой связи, были предприняты решительные шаги по созданию принципиально иных низкоорбитальных спутниковых систем навигации и геодезии. В этой области сибирские КА, создаваемые с 1963 г. при участии новой отечественной спутниковой кооперации по проектам «Циклон» и «Сфера» (рис. 3), были первопроходцами не только в СССР, но и (по проекту «Циклон») в мире: такой системы, которая не только обеспечивала бы военно-морской флот всепогодными навигационными определениями в Мировом океане, но и позволяла бы при этом проводить сеансы связи с «землей», не создали к тому времени и в США.

Навигационно-связные спутники «Циклон» массой около 800 кг имели оригинальные конструкции, узлы и многие другие технические и системные решения. Их запуски начались в ноябре 1967 г.,

так что это год начала не только регулярного распределительного вещания программ Центрального телевидения по спутниковой системе «Орбита» на сеть земных станций, но и начало внедрения спутниковой навигации в СССР.

Геодезические спутники «Сфера» массой около 750 кг были унифицированы с «Циклонами», и их запуски осуществлялись с 1968 г. в целях создания уточненной геодезической сети в интересах отечественных потребителей, прежде всего Минобороны.

Также на основе имеющихся наработок в короткие сроки в КБПМ были созданы два типа научных КА – суборбитальный «Вертикальный космический зонд» (1967 г., масса около 310 кг) для исследования высотных распределений характеристики верхней атмосферы Земли и «Ионосферная станция» (1970 г., масса около 750 кг) для комплексного радиозондирования ионосферы Земли (рис. 4).

Таким образом, к концу 1970-х гг. в районе географического центра Советского Союза на пересечении транспортных магистралей и вблизи энергетических, металлургических и других значимых производств был сформирован новый отечественный самодостаточный ракетно-космический кластер, в котором роль лидера и головного разработчика новой ракетно-космической техники играло КБПМ, возглавляемое главным конструктором М.Ф. Решетневым, а промышленные производства входили в состав завода «Красмаш» (директора П.А. Сысоев, Б.Н. Гуров, В.П. Котельников, В.К. Гупалов). На основе научных и инженерных разработок сибирские ракетно- и спутникостроители сумели в кратчайшие сроки сформировать на орбитах достаточно эффективные многоспутниковые группировки, разноорбитальные глобальные информационные спутниковые системы первого поколения, решающие важные прикладные и технологические (связь, телевидение, навигация, геодезия), а также научные (геофизика) задачи.

Таким образом, на мировую арену космической деятельности вышел созданный практически с нуля на новой территории под руководством М.Ф. Решетнева творческий коллектив, в котором значимую роль играли крупные, хотя и молодые по нынешним меркам специалисты – лидеры научно-технических направлений, такие как Г.М. Чернявский, Л.С. Пчеляков, Г.М. Соколов, А.И. Ушаков, Ю.К. Исаичев, А.Н. Васильев, Л.А. Мирошниченко, В.А. Раевский, А.Г. Козлов, К.Г. Смирнов-Васильев, Ю.М. Князькин, Ш.Н. Исляев, Г.Н. Писарев и многие другие, приехавшие в Сибирь в 1950–1960 гг. и плодотворно, с полной самоотдачей проработавшие на единственном для них предприятии долгие годы,

а большей частью, как их руководители, оставшиеся в Сибири навсегда.

При создании сибирских РН и КА связи, телевидения, навигации, геодезии, научного назначения в них аккумулировались самые передовые, высокотехнологичные наработки в области бортовых приборов, узлов, элементов, создававшихся многочисленными коллективами всего Советского Союза, в частности предприятий под руководством В.П. Глушко, А.М. Исаева, В.И. Кузнецова, В.П. Арефьева, Н.А. Пилюгина, В.П. Бармина, М.С. Рязанского, Н.С. Лидоренко, В.М. Федорова, Н.Г. Виноградова, В.А. Хрусталева, В.И. Курушина, Б.М. Коноплева, В.Г. Сергеева, Ю.С. Быкова, М.Р. Капланова, Ю.А. Быкова, А.С. Малышева, М.И. Борисенко, Н.Н. Несвита, П.В. Голубева, В.Г. Тараненко, А.Г. Иосифьяна и многих других.

Спутники Решетнева стали востребованы для решения различных прикладных задач в интересах советского государства и его граждан, был создан значимый собственный сибирский «космический» научно-технический, интеллектуальный задел, в местных вузах и техникумах началась подготовка собственных молодых кадров «космических» специальностей. С этого времени был набран такой темп обновления техники и технологий, который позволял создавать новый тип КА практически ежегодно, и эта «традиция» сохраняется, даже вопреки сменам властей, идеологий, экономических моделей и иным перетрубациям, до настоящего времени.

В 1970-е гг. КБПМ и с 1977 г. НПО ПМ сумели значительно расширить научно-производственное поле своей деятельности. Помимо развития спутниковой связи и телевидения через новые спутники на ВЭО через новые спутники «Молния-2» (запущены с 1971 г.) и «Молния-3» (с 1974 г.), которые обладали в разы большей пропускной способностью (радиочастотной емкостью в новых диапазонах частот), мощностью и долго-



Рис. 4. КА «Ионосферная станция» на ВДНХ СССР.

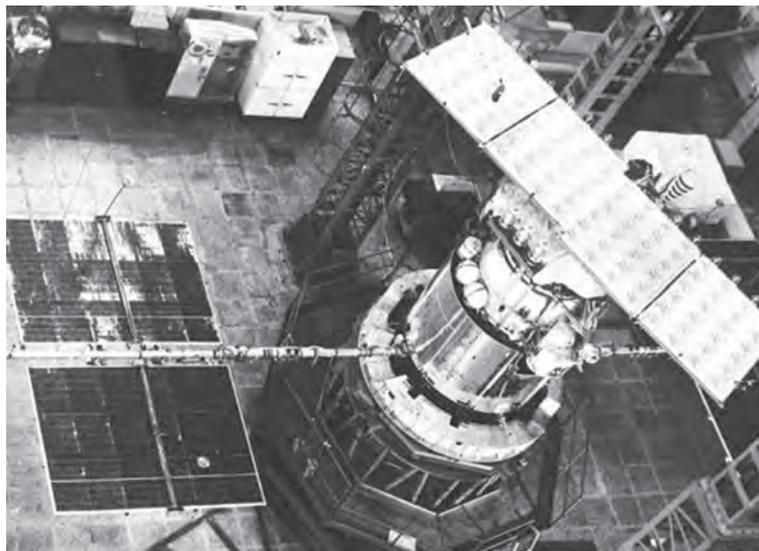


Рис. 5. КА «Экран» в цехе испытаний.

вечностью в сравнении с первыми «Молниями», продолжилось обновление систем связи на низких орбитах («Стрела-1М», «Стрела-2М»), навигации («Циклон-Б», «Цикада»).

За успехи в развитии спутниковых группировок первого поколения в 1974 г. предприятие было награждено высшей государственной наградой СССР – орденом Ленина.

А самое главное достижение в те годы – началось освоение принципиально важной для любой современной космической державы геостационарной орбиты (ГСО).

В 1974 г. для проведения первых в СССР экспериментов в области связи с КА на ГСО была создана специальная модификация КА типа «Молния-1С» («стационарная»), которая была запущена на новом для нас стартовом комплексе с помощью РН «Протон-К» и разгонного блока «ДМ».

Вслед за ней в конце 1975 г. на ГСО был выведен новый сибирский специализированный, полностью оригинальный по конструкционным и технологическим решениям, функционально более мощный многоствольный КА связи «Радуга».

Началось закрепление за СССР и практическое использование чрезвычайно важного для страны частотно-позиционного ресурса на ГСО, который в современном ин-

формационном обществе составляет большую часть национального достояния.

На тот момент успешно функционировали на ГСО только спутники производства США, а Европа лишь апробировала возможности спутниковой связи на экспериментальных КА.

Еще одним существенным шагом в развитии спутниковых телекоммуникаций на ГСО стало создание первой в мире системы непосредственного спутникового телевидения на базе сибирского КА «Экран». Как и КА «Молния-1» 10 лет назад, этот КА имел на борту всего один телевизионный ретранслятор, но мощность его была невиданной по тем временам – 300 Вт, а зона обслуживания, формируемая уникальной многоэлементной фазированной антенной решеткой, по сложному контуру охватывала почти всю северо-восточную территорию СССР. Тем самым достигалась возможность получения телевизионной программы непосредственно с КА, минуя мощные, как в системе «Орбита», наземные усилительно-передающие станции, на самую простую и относительно недорогую антенную систему с компактным, массовым в производстве приемником в самых удаленных от больших городов местах, вплоть до борта ледокола, идущего Северным морским путем. Это приоритетное достижение СССР реализовано в 1976 г. на геостационарных КА «Экран» (рис. 5), разработанных в КБПМ (НПО ПМ).

Для своего времени КА «Экран» был поистине «революционным», прорывным, и не случайно по результатам успешной многолетней эксплуатации этих КА в 1981 г. НПО ПМ было награждено высочайшей государственной наградой страны – орденом Трудового Красного знамени.

Конец 1980-х гг. для СССР был отмечен знаменательным событием мирового масштаба – Мо-

сковской олимпиадой. В этой связи в НПО ПМ по заказу Министерства связи был создан самый совершенный на тот момент многофункциональный многоствольный телекоммуникационный геостационарный КА «Горизонт». Первые спутники были запущены загодя – в 1978 г., чтобы к началу Олимпиады можно было отработать все нюансы их эксплуатации и сформировать в разных точках ГСО полноценную группировку из нескольких спутников.

«Олимпийский» заказ для всего коллектива НПО ПМ был чрезвычайно ответственен и почетен, поскольку спортивный форум такого уровня проводился в стране впервые и сроки запусков сместить на более поздние даты было невозможно, а еще более важно, чтобы спутники «Горизонт» безотказно обеспечивали все многообразные телевизионные трансляции и связь на всю планету.

Всего за 23 года на ГСО запущено 33 КА типа «Горизонт», они до начала XXI в. составляли основу отечественной гражданской телекоммуникационной спутниковой группировки. При этом КА «Горизонт» (рис. 6), даже несмотря на постепенное отставание от более новых зарубежных конкурентов по ряду показателей, эксплуатировались до начала XXI в., в том числе в интересах «Интерспутника» и на начальном этапе развития в системе «Ямал» Газпрома, а также сдавались в аренду зарубежным операторам спутниковой связи, тем самым открыв для СССР зарубежные рынки. При этом они работали настолько надежно, что сроки их функционирования значительно превышали расчетные, достигая 10–13 лет, и их функционирование на орбите охотно страховали отечественные и зарубежные страховщики, и тем самым в 1990-х гг. на сибирских «Горизонтах» при участии сибирских специалистов было положено начало отечественному рынку реального космического страхования.

Показательно, что КБ, возглавляемое М.Ф. Решетневым, в этот период не только полностью загрузило мощности на собственном спутниковом производстве в г. Красноярске-26, но и передало часть заказов на серийное производство в г. Омск на авиазавод (позднее – ПО «Полет»). Сибирская спутниковая кооперация получила дальнейшее развитие, а сибирские РН и некоторые спутники (включая геодезические и связные) получили нового (дополнительного) производителя.

Таким образом, в 1970-х гг. было реализовано второе поколение спутников связи на всех типах орбит, подготовлены условия для дальнейшего развития отечественного телекоммуникационного рынка и выхода на зарубежные.

В 1980-х гг. значительные успехи были достигнуты и в развитии спутниковой геодезии на низких

орбитах. Это было обеспечено созданием в НПО ПМ нового поколения геодезических КА типа «Гео-ИК». Этот КА намного превосходил по своим возможностям спутники первого поколения. Если с помощью первого поколения наших геодезических КА специалисты геодезических служб построили Всемирную геодезическую сеть и уточнили модель геопотенциала с заданными точностями, то КА второго поколения «Гео-ИК» с более современной, высокоточной радиогеодезической аппаратурой, выотомером и системой импульсной световой сигнализации послужили для решения более сложных геодезических задач: создания фундаментальной Всемирной астрономо-геодезической сети с точностью привязки ее опорных пунктов к центру масс Земли с заданной точностью на территории СССР, а также региональных сетей для Антарктиды, Европы, Северной Америки и Азии; дальнейшего уточнения параметров геопотенциала в превышениях геоида над общим земным эллипсоидом; уточнения параметров вращения Земли (неравномерности вращения и движения полюсов). Запуски и эксплуатация спутников «Гео-ИК» продолжались с 1982 по 1994 г. и в конечном итоге обеспечили выполнение поставленных задач.

На гражданских низкоорбитальных навигационных спутниках первого поколения типа «Цикада» в 1980-х гг. удалось разместить дополнительную полезную нагрузку – аппаратуру международного стандарта для формирования новой глобальной многоспутниковой системы спасания «КОСПАС»–SARSAT. В этой системе должны были использоваться разные КА и земные станции СССР, США, Франции и Канады. Первыми разместить такую аппаратуру (она была создана в Российском научно-исследовательском институте космического приборостроения – РНИИ КП) мы смогли на борту своего модернизированно-

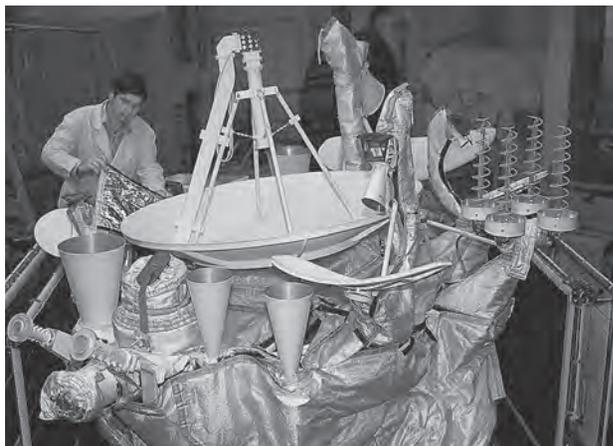


Рис. 6. Антенный блок КА «Горизонт».

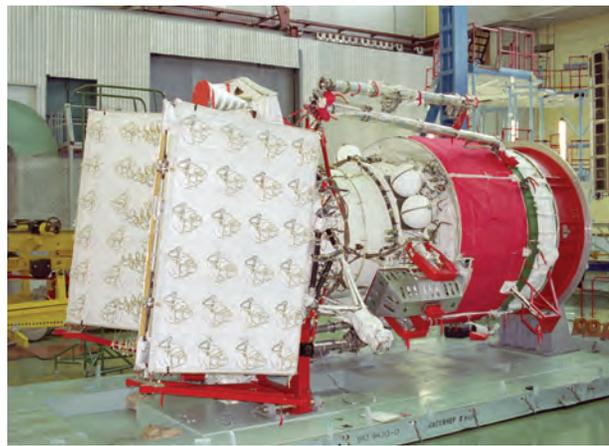


Рис. 7. КА «Экран-М».

го КА «Цикада-Надежда». Первый спутник «Цикада-Н», построенный при участии головного НПО ПМ в Омском ПО «Полет», был запущен в июне 1982 г., уже в сентябре он своевременно принял сигналы от аварийного радиобуя потерпевшего аварию легкомоторного канадского самолета и, передав их аварийно-спасательным службам Канады, помог спасению первых пострадавших. С тех пор система «КОСПАС»–SARSAT продолжает непрерывно функционировать, модернизируясь, пополняясь различными как зарубежными, так и отечественными КА, в том числе новыми КА НПО ПМ типа «Луч-5» и «Глонасс-М», и неся свою гуманитарную службу и в настоящее время.

А размещение дополнительных (попутных) полезных грузов стало теперь все более распространенной тенденцией, позволяющей совместить интересы и потребности различных участников космической деятельности наиболее рационально и взаимовыгодно на имеющихся спутниковых платформах.

На ВЭО продолжилось восполнение и обновление группировок за счет нового поколения КА типа «Молния-1Т» с существенно улучшенными характеристиками как обслуживающих систем, так и ретранслятора. В новых КА в принятом на предприятии стиле оптимально сочетались надежность и экономичность ранее апробиро-

ванных решений и разумная новизна ключевых целевых бортовых систем. Запуски этих КА на ВЭО начались в 1983 г. и продолжались до 2004 г.

На низких орбитах с целью развития ранее накопленного опыта эксплуатации первых поколений «Стрел» был создан КА нового поколения с существенно улучшенными эксплуатационными характеристиками, более рациональными решениями как по полезной нагрузке, так и платформе – КА нового поколения «Стрела-3». Они запускались с 1985 г. блоками по шесть КА на новом типе РН – «Циклон».

Новое поколение отечественных низкоорбитальных спутников связи пришло на смену семейству «Стрела-3» только в 2005 г.

На геостационарных орбитах продолжалось поддержание в расширенном виде всех ранее введенных услуг спутниковой связи и освоение новых задач. Так, в систему непосредственного телевидения начался ввод модифицированных КА «Экран-М» (рис. 7), которые обладали повышенной энергетикой и расширенным частотным диапазоном, рядом других принципиальных усовершенствований. Запуски КА «Экран-М» начались около 30 лет назад, а использование продолжалось и в XXI веке.

Также на ГСО продолжилось обновление группировки КА специальной связи. Так, в составе Единой системы спутниковой связи ЕССС-2 были начаты запуски КА нового поколения «Радуга-1» массой около 2300 кг с повышенной пропускной способностью каналов связи и обработкой сигналов на борту.

Однако наиболее инновационным техническим достижением СССР 1980-х гг. в области КА связи на ГСО в НПО ПМ считается освоение нового класса информационных задач – широкополосной ретрансляции информации, передаваемой по узким лучам при обменах большими потоками данных с мобильными объектами – наземными и орбитальными. Сходные по задачам КА-ретрансляторы в те

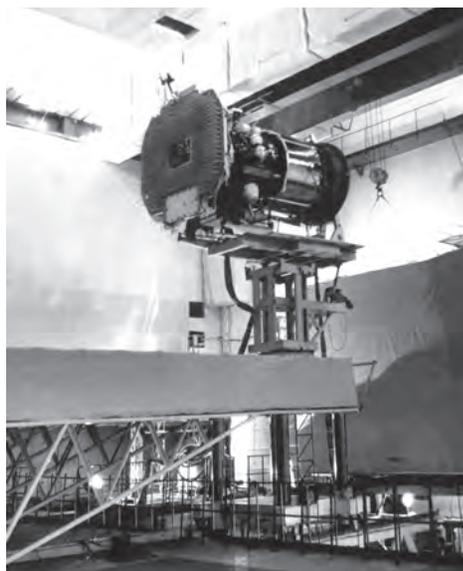


Рис. 8. КА «Поток» на радиотехнических испытаниях.



Рис. 9. КА «Луч» в выставочном зале Центрального музея связи им. А.С. Попова.

годы создавались только в США по заказу NASA для системы TDRSS, а в Европе и Азии самые передовые страны приступили только в XXI в.

Специалистами НПО ПМ для Глобальной космической командно-ретрансляционной системы (ГККРС) был разработан и запущен на ГСО в 1982 г. первый КА нового типа «Поток» (рис. 8) – тяжелый КА, на котором впервые использовалась бортовая вычислительная машина, способная управлять не только всеми служебными системами, но также и лучами ретрансляторов, обеспечивая высокоточное наведение их на спутники и земные станции. Для создания бортовых ретрансляторов, активных фазированных антенных решеток, бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) была привлечена новая кооперация самых высокотехнологичных предприятий СССР (НПО «ЭЛАС», г. Зеленоград, главный конструктор Г.Я. Гуськов, и многих других). Наличие на борту КА собственной достаточно мощной БЦВМ требовало дополнительных усилий по принципиальному обновлению всей архитектуры бортового и наземного контуров управления КА, но зато и значительно расширяло функциональные и иные характеристики, повышало интеллектуальность, гибкость, надежность управления, живучесть КА при нештатных ситуациях.

Еще одним принципиально важным нововведением на спутнике «Поток» было использование нового типа бортовой двигательной установки – мощных электроракетных двигателей (ЭРДУ). Именно с этого КА началось интенсивное продвижение отечественных ЭРДУ не только на последующие тяжелые геостационарные КА НПО ПМ, но и на многие другие отечественные и зарубежные КА. Собственные разработки подобных двигателей в США

и Европе на тот момент значительно отставали от СССР (ОКБ «Факел», г. Калининград, главный конструктор Р.К. Снарский).

Помимо приоритетных новинок в двигательных устройствах и полезных нагрузках, практически все бортовые системы этого КА получили научно-технологическое обновление и после успешной апробации на КА данной серии, эксплуатации в реальных условиях для решения стратегически важных задач, новинки в том или ином виде получили дальнейшее применение на последующих разработках НПО ПМ, включая самые новые КА.

В развитие работ по той же системе ГККРС в 1985 г. в НПО ПМ был создан и запущен на орбиту первый образец еще одного нового КА-ретранслятора, ставшего основоположником самостоятельного направления спутникостроения – КА «Луч» (рис. 9). Сразу бросающейся в глаза внешней отличительной особенностью этого КА от предыдущих отечественных разработок было оснащение КА крупногабаритными ажурными сетчатыми управляемыми антеннами: двухзеркальными диаметром 1.6 и 3 м, однозеркальной диаметром 4.5 м. Бортовыми антеннами такого габарита и качества в те годы могли оснащать свои КА

только в США. Антенны КА «Луч» работали в нескольких диапазонах и позволяли с высокой точностью узкими лучами отслеживать наземных и орбитальных потребителей для обмена между ними большими потоками информации. Отработанные на этих КА решения также позволили в дальнейшем подойти к созданию новых еще более сложных КА следующего поколения.

Этот спутник даже своим внешним видом впечатлял не только специалистов космической отрасли, но также и простых посетителей Центрального музея связи в Санкт-Петербурге, куда НПО ПМ передало натуральный образец КА типа «Луч».

Основным достижением 1980-х гг. в области спутниковой навигации в СССР стало начало работ по развертыванию на средневысоких наклонных круговых орбитах принципиально новой многоспутниковой орбитальной группировки ГЛОНАСС. Инициатором и главным исполнителем по этой системе было НПО ПМ, а главным конструктором – М.Ф. Решетнев. При огромной роли всех участников работ, РНИИ КП, Российского института радионавигации и времени, ПО «Полет» и целого ряда других предприятий новой спутниковой кооперации в рамках системы ГЛОНАСС предстояло создать уникальную по функционалам и самую сложную на тот момент спутниковую систему из 24 КА, синхронно работающих в точно заданных позициях по восемь КА в трех орбитальных плоскостях и оснащенных прецизионными бортовыми системами (атомными стандартами частоты и др.).

Как глобальная система навигации нового поколения система ГЛОНАСС должна непрерывно, всегда и повсюду, в любой точке Земного шара обеспечивать каждого из потенциальных потребителей сигналами высокоточного позиционирования, для чего каждый из КА в отдельности и все вместе в составе системы должны работать с вы-

сочайшей надежностью, точностью, согласованностью, так как любой сбой в работе отдельного КА приводит к ухудшению характеристик всей системы. К решению подобных задач в то время подошли только две страны в мире – США с системой Navstar/GPS и СССР с системой ГЛОНАСС. Спутники «Глонасс» могли запускаться сразу по три КА в блоке на одной РН типа «Протон», однако такие пуски не могли производиться слишком часто. Даже высокоразвитые страны объединенной Европы и быстро прогрессирующая КНР до сих пор не смогли развернуть подобные полноценные группировки собственных навигационных КА, хотя задачу такую поставили перед собой более 10 лет назад.

А в СССР при головной роли НПО ПМ 35 лет назад, к концу 1982 г., были разработаны и запущены на круговые орбиты высотой 20 тыс. км первые образцы спутников ГЛОНАСС (рис. 10).

Система ГЛОНАСС проходила очень трудную, многолетнюю отработку и развертывание в космосе, в конце 1989 г. в неполном составе прошла первый зачетный этап испытаний, но только в 1995 г. была полностью развернута и сдана в эксплуатацию, обеспечивая стратегический паритет с США в области глобальной спутниковой навигации. Однако затем система ГЛОНАСС пережила трудный период утраты своей целостности, но была возрождена и обновлена на базе КА НПО ПМ следующей модификации, созданных при преемнике М.Ф. Решетнева – генеральном конструкторе и генеральном директоре А.Г. Козлове.

Еще при жизни академика М.Ф. Решетнева НПО ПМ, несмотря на труднейшие для выживания наукоемких производств общеэкономические условия в России, в 1990-х гг. смогло достойно продолжить дело восполнения и обновления спутниковых группировок на всех типах освоенных орбит.



Рис. 10. КА «Глонасс-М»: стыковка блока из трех КА с разгонным блоком на космодроме.

В 1992 г. в НПО ПМ были созданы конверсионные образцы малых спутников связи коммерческого назначения и запущены на низкие орбиты первые образцы КА типа «Гонец-Д». В системе такого типа необходимо одновременное функционирование не менее 12 КА (в настоящее время предлагаются проекты уже со многими десятками и даже сотнями КА), но даже такой состав в то время для России сформировать оказалось затруднительно.

К сожалению, система «Гонец» в течение многих лет не получала должного финансирования и поддержки в развитии как орбитального, так и наземного потребительского сегмента. На новой технической базе орбитальная группировка была развернута до 12-спутникового состава лишь в конце 2015 г. с использованием существенно доработанных, с увеличенной пропускной способностью и сроком службы КА новой модификации «Гонец-М» при генеральном директоре АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева» члене-корреспонденте РАН Н.А. Тестоедове.

Также удалось создать в кратчайшие сроки при минимальных затратах и запустить на низкую орбиту в марте 1997 г. на новом РН типа «Старт» с новой площадки космодрома Свободный малый экспериментальный КА «Зея», созданный в НПО ПМ на базе платформы «Стрела-1М» – пример удачной конверсии и эффективного малого спутнико-строения.

Несмотря на резкий провал государственных инвестиций в новые космические разработки спутников связи, на геостационарные орбиты в 1990-х гг. НПО ПМ также были выведены новые модификации КА: «Галс» (рис. 11) для непосредственного телевидения (НТВ) в дополнение к системе «Экран» и «Экспресс» для всех видов связи взамен «Горизонтов». Спутники создавались в труднейших экономических условиях, когда считалось, что в России вообще невозможна реализация каких-то новых разработок. Это наложило негативный отпечаток на технические возможности этих КА и их рыночное применение, сказалось на надежности бортовых систем. Тем не менее в 1994 г. под руководством М.Ф. Решетнева были изготовлены и запущены на ГСО первые образцы новых гражданских КА «Галс» и «Экспресс», а управление ими велось из нового гражданского компактного, но эффективного Центра управления полетом на территории самого НПО ПМ.

Испытания и эксплуатация КА на орбите проходили сложно, однако, в целом, эти спутники отслужили достаточно длительные сроки и окупили себя, а также послужили созданию к концу 1990-х гг. технического задела для создания КА нового по-

коления и выхода с ними на рынок, обновления действующих орбитальных группировок КА связи.

Несмотря на почти полный обвал в 1990-х гг., заказов на спутники связи внутри России, благодаря огромному авторитету академика М.Ф. Решетнева и большим его личным усилиям в 1995 г. НПО ПМ впервые в отечественной практике получило заказ известного международного оператора «Eutelsat» на создание в содружестве с фирмой «Alcatel Space» и рядом других зарубежных партнеров тяжелого и самого мощного по тем временам геостационарного КА связи со знаменательным названием «Сибирско-европейский спутник» – SESAT (рис. 12). Этот заказ был поистине незаменимой поддержкой для удержания финансово-экономической устойчивости предприятия, но он же стал и огромным вызовом, испытанием состоятельности, готовности предприятия работать на уровне требований мирового спутникового рынка и конкурировать с лучшими зарубежными изготовителями спутников.

Сам М.Ф. Решетнев не успел увидеть запуск и результаты работы спутника SESAT в полете, однако приданный им импульс в реализации этого проекта и сформированная им в Сибири научно-производственная, образовательная, экспериментальная и социальная базы позволили коллективу, которому было присвоено его имя, довести проект до успеха в 2000 г.

В проекте SESAT впервые удалось совместить новую спутниковую платформу НПО ПМ с существенно улучшенными техническими характеристиками (прежде всего впервые гарантируемого 10-летнего срока службы) и модуль полезной нагрузки от фирмы «Alcatel Space». Требовалось не только согласовать всевозможные интерфейсы, но фактически увязать изначально противоречивые технологии и технические решения, объединить разные культуры и тра-

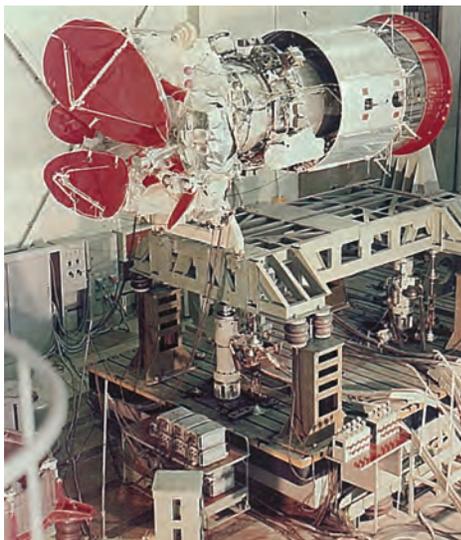


Рис. 11. КА «Галс» на вибрационном стенде.

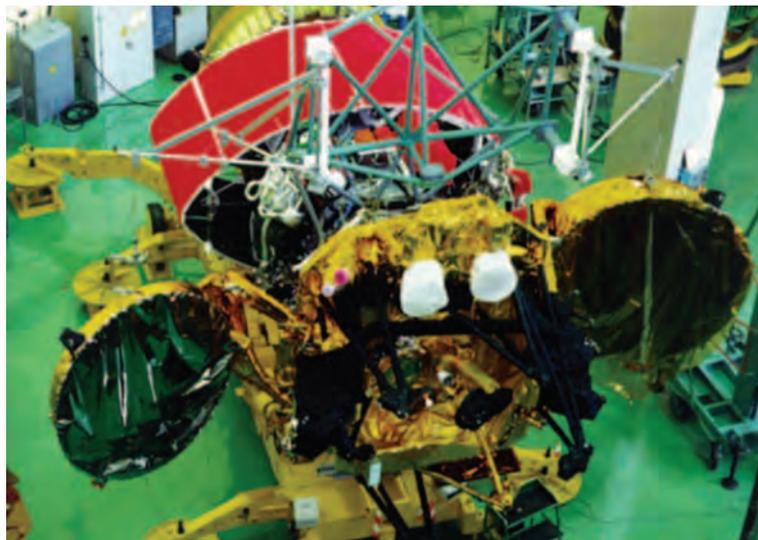


Рис. 12. КА «Sesat» в сборочном цехе.

диции производства, наконец, научиться согласованно и эффективно работать разнородные коллективы специалистов, говорящих на разных языках. В проекте SESAT всем участникам пришлось преодолеть множество трудных этапов, сложных препятствий (в какие-то моменты со стороны могло показаться, что проект не будет реализован), но участникам, за которыми стояла вся интеллектуальная и технологическая мощь, весь накопленный многолетний опыт НПО ПМ, удалось все преодолеть и безупречно ввести спутник в эксплуатацию на орбите, которая продолжалась не заданные 10 лет и даже не 15 лет, а продолжается до настоящего времени, т.е. более 17 лет. Этот поистине «прорывной» спутник не только вполне окупил себя, но и блестяще продемонстрировал на практике квалификацию наших кадров и наш потенциал, послужил получению НПО ПМ в 2000-х гг. новых заказов как в России, так и за рубежом.

В проекте SESAT были освоены на НПО ПМ и на смежных предприятиях новые подходы к организации работ, управлению рисками, страхованию, обеспечению качества КА по международным стандартам, на основании которых в 2000-х гг. удалось перейти к устойчивому производству самых современных

спутников нового поколения для обновления и развития гораздо более мощных информационных спутниковых систем всех типов и на всех типах орбит в интересах как отечественных, так и зарубежных потребителей.

В начале 2000-х гг. под руководством генерального конструктора и генерального директора, доктора технических наук, профессора А.Г. Козлова в НПО ПМ по заказу Государственного предприятия «Космическая связь» (ГПКС) в срочном порядке была создана серия КА «Экспресс-А» (рис. 13) для экстренного восполнения национальной геостационарной группировки КА, в которой КА типа «Горизонт» исчерпали свои ресурсы, а своевременная замена их новыми КА не была организована. Теперь же, оказавшись перед угрозой полной потери спутниковой инфраструктуры связи, государственный заказчик обратился к единственному реальному поставщику современных КА, поставил задачу – в сжатые сроки создать три КА «Экспресс-А» с зарубежными комплектующими на борту, т.е. использовать опыт сотрудничества НПО ПМ с «Alcatel Space» для паллиативного повышения технических характеристик «Экспрессов» за счет более мощной зарубежной полезной нагрузки. В июне 1997 г. был заключен контракт на поставки полезных нагрузок в НПО ПМ, а уже в октябре 1999 г. первый из созданных в НПО ПМ новых КА «Экспресс-А» был поставлен на космодром, но был потерян при аварийном пуске РН «Протон-К».

Однако уже в марте и июне 2000 г. два следующих КА были успешно выведены в космос. Также в 2002 г. был создан и запущен на ГСО еще один КА (взамен погибшего при первом пуске), который с тех пор продолжает работу в национальной спутниковой группировке до настоящего времени.

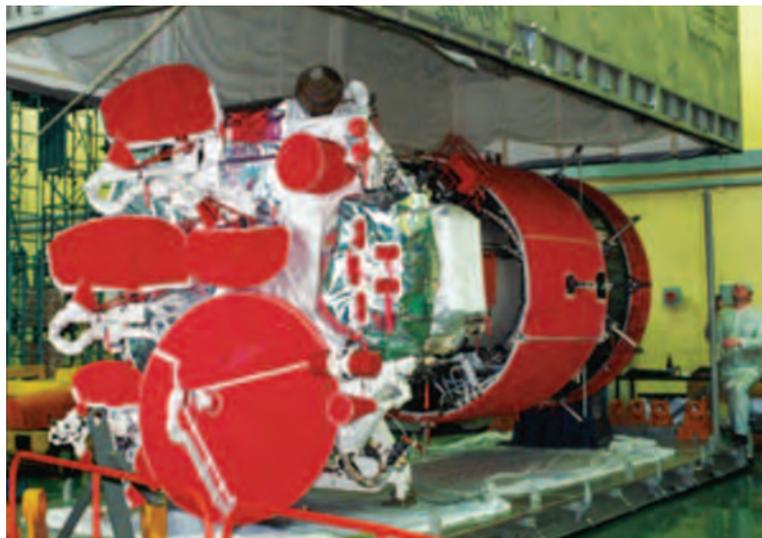


Рис. 13. КА «Экспресс-А». Подготовка КА к отправке на космодром.

В 2003 г. в интересах наращивания пропускной способности национальной гражданской группировки по заказу ГПКС был создан и выведен на ГСО первый КА новой серии тяжелых многофункциональных многодиапазонных спутников связи типа «Экспресс-АМ», в котором был использован и дополнен тот научно-технический задел и опыт, накопленный при успешной реализации проекта SESAT. Основное отличие этих спутников, запуски которых продолжались по жесткому графику с высоким темпом в 2004–2005 и в 2008–2009 гг., состояло в параметрах полезных нагрузок и их странах-изготовителях.

На смену КА этого поколения пришли еще более мощные КА типа «Экспресс-АМ5», «Экспресс-АМ6» класса HTS (в том числе с многолучевыми ПН нового Ка-диапазона) на базе платформы «Экспресс-2000» и менее мощные типа «Экспресс-АМ8» на базе платформы «Экспресс-1000». Запуски их выполнены в 2013–2015 гг., ведется изготовление КА среднего класса «Экспресс-80», «Экспресс-103» также на базе платформы «Экспресс-1000». Все указанные спутники подтверждают готовность АО «ИСС» к тому, чтобы полностью удовлетворить текущие и будущие национальные потребности в геостационарных спутниковых средствах связи, как это уже обеспечивалось в течение предыдущих 50 с лишним лет.

На высокоэллиптических орбитах восполнение и обновление группировок было продолжено запусками модифицированных КА типа «Молния-3К» в 2001–2005 гг., а затем и КА нового поколения «Меридиан» – в 2006–2014 гг.

В интересах развития спутниковой геодезии были созданы и запущены на низкие орбиты в 2011–2016 гг. КА нового поколения «Гео-ИК-2» массой около 1400 кг, оснащенные новой бортовой



Рис. 14. КА «Глонасс-К» в сборочном цехе.

целевой аппаратурой, в частности зарубежными радиовысотомерами «Садко».

На средневысоких орбитах для ускоренного восстановления и существенного обновления системы ГЛОНАСС НПО ПМ им. академика М.Ф. Решетнева инициировало создание модифицированного КА «Глонасс-М» с существенно улучшенными характеристиками и начало их серийное производство.

Запуски КА «Глонасс-М» НПО ПМ осуществляет с 2003 г., и всего за три года было изготовлено и выведено на штатные орбиты 19 таких КА.

В 2014 г. производство этих КА было прекращено, поскольку система ГЛОНАСС полностью сформирована и устойчиво работает, а часть изготовленных КА «Глонасс-М» может быть пока оставлена в резерве на Земле.

При этом параллельно на предприятии, получившем в 2008 г. статус АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева», под руководством генерального директора и генерального конструктора Н.А. Тестоедова продолжились работы по созданию КА навигации нового поколения на базе новой негерметичной платформы типа «Экспресс-1000», и в 2011 г. произведен запуск первого такого КА – «Глонасс-К» (рис. 14).

В настоящее время продолжается работа над модификациями КА «Глонасс-К» для последующего их использования совместно с КА предыдущего поколения. Таким образом, сохраняется принцип использования в такой сложной и большой группировке длительно работающих спутников разного типа, несущих на борту различные полезные нагрузки.

В целом, в результате напряженной работы АО «ИСС», АО «Российские космические системы» и многих других предприятий спутниковой кооперации по наращиванию орбитальной группировки доработанными спутниками повышенной надежности система ГЛОНАСС уже с 2011 г. полнофункциональна и последовательно дополняется в составе космического и наземного сегментов новыми средствами повышения точности, оперативности и других характеристик обслуживания потребителей, обеспечивает России стратегический паритет с США в области глобальной спутниковой навигации второго поколения.

Надежная работа системы ГЛОНАСС и стабильность формируемого ею навигационного поля позволяет успешно решать многие стратегически значимые для страны и международного партнерства задачи, включая контролируемые на уровне высшего руководства Российской Федерации задачи поддержания боеготовности Вооруженных Сил страны и таких гражданских задач, как обеспечение безопасности на транспорте «ЭРА-ГЛОНАСС», «Социальный ГЛОНАСС» и многих других направлений.

Созданная в первоначальном виде еще под руководством академика М.Ф. Решетнева и кардинально обновленная теперь под руководством члена-корреспондента РАН Н.А. Тестоедова навигационная спутниковая группировка, как и система ГЛОНАСС в целом, остается национальным достоянием России

и уже стала весомым вкладом страны в общемировую навигационную инфраструктуру, которая дополняется благодаря новым партнерам (и в некоторой степени конкурентам) – ЕС, КНР, Индии, Японии.

Знаменательно, что в дополнение к указанной среднеорбитальной собственной группировке ГЛОНАСС второго поколения для повышения качества спутниковой навигации в системе используются также спутники-ретрансляторы геостационарной группировки «Луч-5». Это КА-ретрансляторы нового поколения, построенные на базе модификаций той же платформы среднего класса «Экспресс-1000», что и КА «Глонасс-К», но продолжающие функционально линию КА с крупногабаритными сетчатыми управляемыми антеннами, начатую более 30 лет назад более тяжелыми КА «Луч».

Для обновления геостационарной группировки спутниковой связи и ретрансляции информации АО «ИСС» созданы спутники нового поколения «Радуга-1М» (запуски 2007–2013 гг.), а также «Поток-М» (запуски 2011–2015 гг.). Тем самым обеспечиваются текущие потребности связи в целях обеспечения безопасности страны. Для обеспечения дополнительных услуг широкополосной специальной связи разработан и запущен в космическое пространство КА нового поколения «Благовест».

Для восполнения и расширения геостационарной группировки коммерческой системы связи и вещания «Ямал» (оператор «Газпром космические системы»), в которой первые годы использовались сибирские спутники «Горизонт», а позднее – три КА среднего класса типа «Ямал-100», «Ямал-200», созданных ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» в кооперации с зарубежными фирмами, в АО «ИСС» были созданы и запущены в 2012–2014 гг. КА более тяжелого класса – «Ямал-300К» (платформа «Экспресс-1000») и «Ямал-401» (платформа «Экспресс-2000»).

На базе той же современной платформы «Экспресс-1000» для зарубежных заказчиков были изготовлены геостационарные КА связи среднего класса AMOS-5 (рис. 15), Telkom-3 (рис. 16), Kazsat-3, Lybid-1, а для ГПКС – КА НТВ, нового поколения «Экспресс-АТ1», «Экспресс-АТ-2».

Для развития низкоорбитальных группировок экспериментального, технологического и научно-образовательного назначения в АО «ИСС» были созданы и в 2008–2012 гг. запущены малые КА легкого класса нового поколения «Юбилейный» и «МиР» массой менее 70 кг.

На них прошли апробацию, получили летную квалификацию новые технические решения и технологии, которые позволяют в дальнейшем достаточ-



Рис. 15. КА «Amos-5».

но быстро и малозатратно создавать разнообразные низкоорбитальные группировки высоконадежных и легко масштабируемых КА различного класса (от мини- до микро-) и различного назначения, включая научные исследования, дистанционное зондирование Земли, связь и т.д., которые сочетают в себе достоинства как индустриального серийного, так и гибкого единичного производства.

В целом, более чем за полувековую историю развития отечественных спутниковых телекоммуникаций, навигации и геодезии в Сибири создано пять поколений глобальных информационных спутниковых систем, многократно перекрывающих Землю множеством лучей в различных диапазонах волн с различных орбит.

Не умаляя ни на йоту достижений и успехов предприятий ракетно-космической отрасли, в разное время занимавшихся и разрабатывающих в настоящее время автоматические космические аппараты, следует отметить, что за 58 лет существования предприятия п/я 80 – ОКБ-10 – КБПМ – НПО ПМ – АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» под руководством генеральных конструкторов – генеральных директоров Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской и Государственной премий, профессора, академика АН СССР М.Ф. Решетнева, лауреата Государственных премий СССР и РФ, доктора технических наук, профессора А.Г. Козлова, лауреата Государственной премии РФ и премий Правительства Российской Федерации, профессора, заслуженного деятеля науки, члена-корреспондента РАН Н.А. Тестоедова коллективом ученых и специалистов АО «ИСС» созданы и сданы «под ключ» различным заказчикам более 40 космических систем и комплексов, а это – более 1260 КА в интересах силовых



Рис. 16. КА «Telecom-3» на испытаниях.

ведомств и социально-экономического сектора нашей страны.

На их базе функционируют созданные АО «ИСС» совместно с партнерами:

- национальная спутниковая группировка, обеспечивающая глобальную связь и телевидение на всей территории Российской Федерации;
- национальная навигационная система «Глонасс», обеспечивающая глобальность и непрерывность навигационно-временного обеспечения потребителей не только на территории России, но и за ее пределами;
- многофункциональная космическая система ретрансляции «Луч-М», обеспечивающая связь в реальном масштабе времени наземных станций с низколетящими КА, которые в данный момент находятся вне зоны радиовидимости с территории Российской Федерации;
- многофункциональная система персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М», обеспечивающая связь абонентов в труднодоступных регионах Земли;
- три многофункциональные космические системы, созданные в интересах обеспечения национальной безопасности страны.

На сегодняшний день более 70% конкурентоспособных автоматических космических аппаратов Рос-

сийской Федерации создаются и получают «путевку в жизнь» в дважды орденосном АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева», возглавляемого продолжателем его дела членом-корреспондентом РАН Н.А. Тестоедовым (рис. 17).

Весь предыдущий опыт развития отечественных информационных спутниковых систем показывает, что на этом рынке космической деятельности непрерывно возникали и продолжают появляться все новые задачи, о которых первоначально не подозревали такие выдающиеся деятели, основатели важнейших направлений отечественной космонавтики, как С.П. Королев, М.К. Янгель и другие. Развивая идеи этих гигантов, их ученики и последователи, в том числе коллективы, возглавляемые М.Ф. Решетневым и его соратниками, смогли значительно продвинуть технику и технологии освоения и прикладного использования околоземного космического пространства. Одно только освоение геостационарной орбиты уже принесло человечеству такую значимую экономическую пользу, которая многократно превосходит экономическую отдачу от всех иных видов космической деятельности и многократно окупает затраты.

Благодаря мудрости и прозорливости С.П. Королева и М.К. Янгеля, их умению ставить государственные интересы выше личных на территории СССР, Российской Федерации сформировались новые научные школы космонавтики, которые при правильно согласованном взаимодействии и устранении ложной внутренней конкурентности добивались эффективного решения самых сложных задач и выводили страну на передовые позиции. С.П. Королев и М.К. Янгель находили для своих коллективов расширяющееся пространство решаемых задач, не сворачивали, а расширяли фронт принимаемых на себя работ. Идеи, методология и стиль рабо-



Рис. 17. Генеральный директор АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева» член-корреспондент РАН Н.А. Тестоедов.

ты, заложенный в нашей отрасли ее основателями и первопроходцами, при грамотном использовании их учениками, на долгие годы сохранили развитие космических предприятий даже в таких условиях, когда закрывались многие менее сложные и вполне доходные когда-то машиностроительные, приборостроительные и иные значимые предприятия.

На арену космической деятельности все активнее выходит уже не третье, а четвертое поколение специалистов – молодые люди, которые не знали и не могли знать С.П. Королева, М.К. Янгеля и даже М.Ф. Решетнева, но которые сохранили их веру в необходимость и важность для страны беззаветного служения космосу и своей Отчизне, сохранили стремление к преодолению новых, самых сложных и важных долгосрочных задач. А это значит, что вслед за некоторыми спадами в развитии отечественной космонавтики, разрывами в связях поколений будут приходиться еще новые волны научно-технического подъема, прорывы к новым созвездиям и орбитам.

Отличительной особенностью нашего времени является существенное влияние космонавтики как науки и отрасли промышленности на социально-экономическое развитие общества, ее воздействие на процессы получения новых знаний и дальнейшего развития средств производства. Совсем недавно только три страны – СССР, США и Франция – обладали полным набором космических технологий для создания ракет-носителей, автоматических космических аппаратов, необходимой наземной инфраструктуры. В настоящее время к нам присоединились Китай, Индия, страны Евросоюза. Обладание космическими технологиями сегодня – один из основных критериев экономического и научного развития государства.

Литература

1. *40 космических лет*, под ред. К.Г. Смирнова-Васильева, Красноярский край, Железногорск, НПО ПМ им. академика М.Ф. Решетнева, 2002, 311 с.
2. *Академик Михаил Фёдорович Решетнев*, под ред. А.Г. Козлова, Красноярский край, Железногорск, НПО ПМ им. акад. М.Ф. Решетнева, 2006, 304 с.
3. *Космические вехи: Сборник научных трудов, посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева*, под ред. Н.А. Тестоедова, Красноярск, ИП Суховольская Ю.П., 2009, 704 с.
4. **Н.А. Тестоедов, М.М. Михнев, А.Е. Михеев, А.К. Шатров, В.В. Двирный, В.В. Злотенко, Ю.А. Филиппов, В.В. Ильиных**
Технология производства космических аппаратов: Учебник для вузов, Красноярск, СибГАУ, 2009, 352 с.
5. **В.И. Ермоленко**
Мы были первыми: история создания навигационно-связной космической системы Военно-морского флота, Москва, Кучково Поле, 2014, 494 с.
6. *Интеграция в аэрокосмическом образовании региона: сборник материалов: посвящается 50-летию выпускающих кафедр института космической техники: летательных аппаратов, двигателей летательных аппаратов, систем автоматического управления и 25-летию базовой кафедры космических аппаратов*, под ред. И.В. Ковалева, Красноярск, СибГАУ, 2015, 239 с.
7. **В.А. Раевский, Н.А. Тестоедов, М.В. Лукьяненко, Е.Н. Якимов**
Основы проектирования активных систем ориентации и стабилизации аппаратов связи на геостационарной орбите: Учебное пособие для вузов по специальности 24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами», Красноярск, СибГАУ, 2016, 493 с.
8. **В.А. Раевский, Н.А. Тестоедов, М.В. Лукьяненко, Е.Н. Якимов**
Основы проектирования пассивных систем ориентации и стабилизации автоматических космических аппаратов связи, навигации и геодезии: Учебное пособие для вузов по специальности 24.05.06 «Системы управления летательными аппаратами», Красноярск, СибГАУ, 2016, 410 с.
9. **Н.А. Тестоедов, В.Е. Косенко, Ю.Г. Выгонский, А.В. Кузовников, В.А. Мухин, В.Е. Чеботарев, В.Г. Сомов**
Космические системы ретрансляции: Монография, под ред. А.В. Кузовникова, Москва, Изд. «Радиотехника», 2017, 448 с.
10. **М.А. Быховский**
Пионеры информационного века. История развития теории связи, Сер. «История электросвязи и радиотехники», выпуск 4, Москва, Техносфера, 2006, 376 с.

English

Joint-Stock Company “Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems” – 58 Years in the Service of Cosmos and Fatherland

Nikolai A. Testoyedov

RAS Corresponding Member, Professor,
Director-General of the Joint-Stock Company
“Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., 662972, Russia
testoedov@iss-reshetnev.ru

Vladimir V. Kudinov

Joint-Stock Company
“Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., 662972, Russia
kudinov@iss-reshetnev.ru

Viktor Ye. Kosenko

Professor, Joint-Stock Company
“Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., 662972, Russia
kosenko@iss-reshetnev.ru

Yuri V. Vilkov

Joint-Stock Company
“Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., 662972, Russia
yuri_vilkov@iss-reshetnev.ru

Evgeniy N. Golovyonkin

Professor, Joint-Stock Company
“Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., 662972, Russia
gne@iss-reshetnev.ru

Fyodor K. Sinkovsky

Joint-Stock Company
“Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg., 662972, Russia
sfk@iss-reshetnev.ru

Abstract

The paper provides some materials on the creation, formation and development of the space industry in Siberia region of the Russian Federation, on the history of the unmanned spacecraft creation for communications, broadcasting, data-relay, navigation and geodesy in the Joint-Stock Company “Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems”.

Keywords: space, spacecraft, communications, broadcasting, data-relay, navigation and geodesy.

Images & Tables

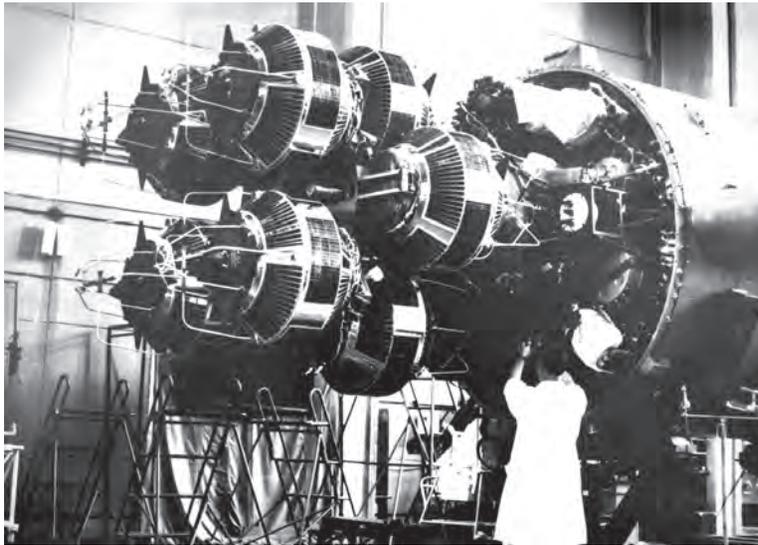


Fig. 1. The block, consisting of eight "Strela-1M" spacecrafts (SC), in launch preparation on the "Kosmos-3M" launch vehicle (LV).

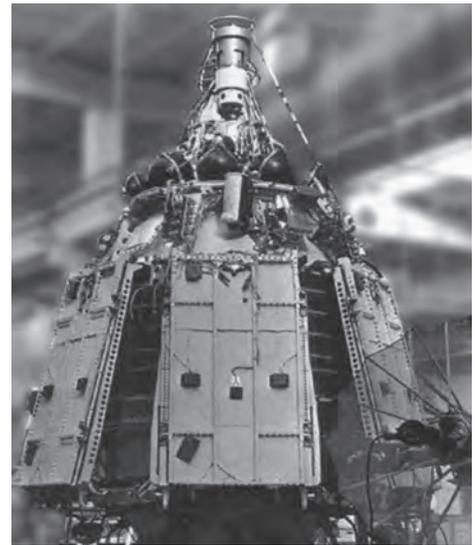


Fig. 2. The SC "Molniya-1" in the assembly room.

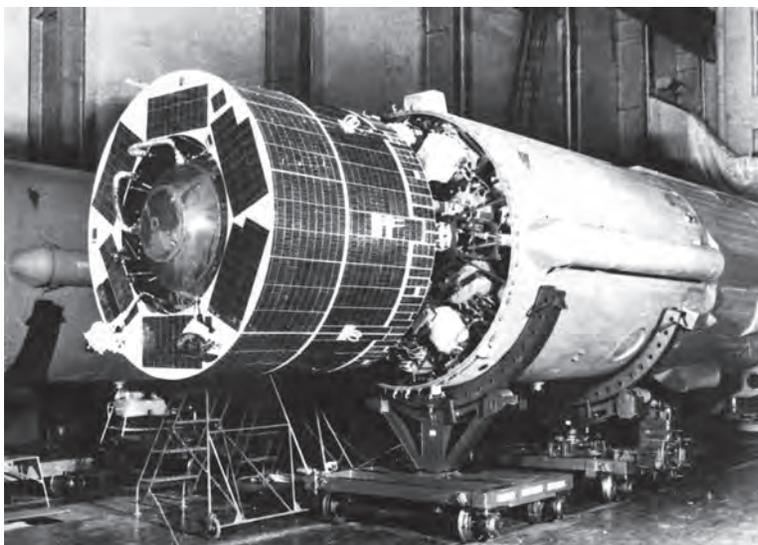


Fig. 3. SC "Sfera" in launch preparation on the LV "Kosmos-3".



Fig. 4. SC "Ionosfer'naya stantsiya" ("Ionospheric station") on VDNKh USSR exhibition.

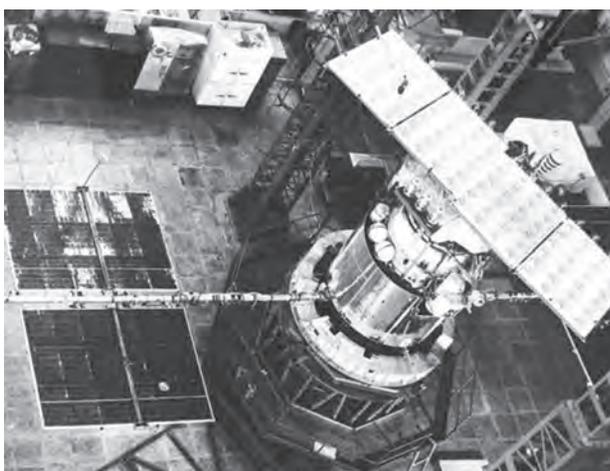


Fig. 5. SC "Ekran" in the test room.

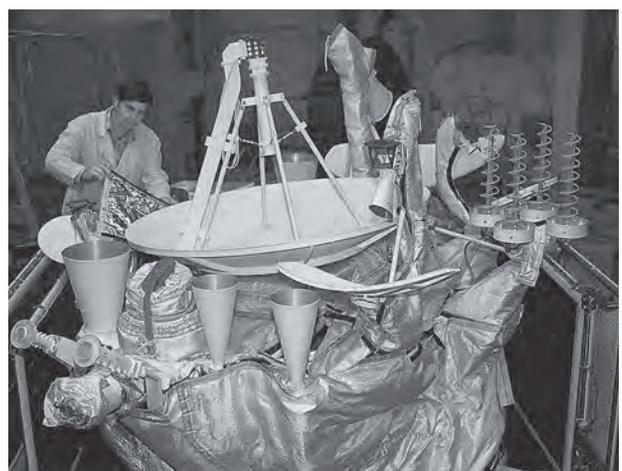


Fig. 6. Aerial assembly of SC "Gorizont".

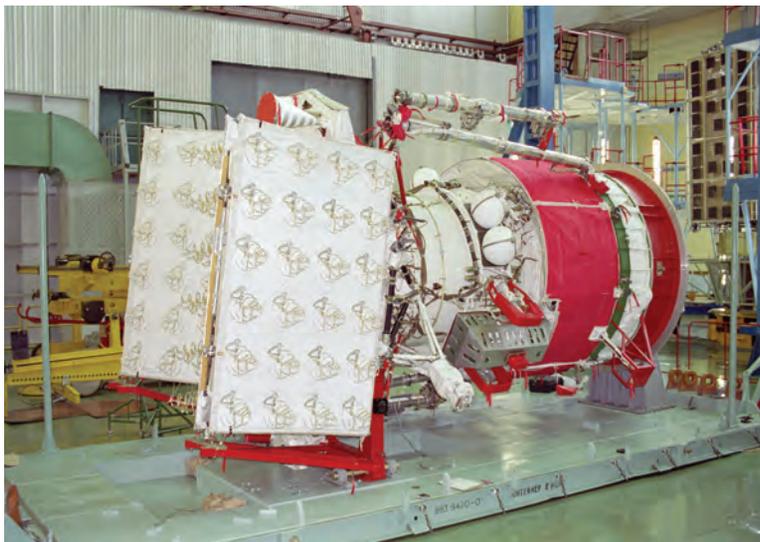


Fig. 7. SC "Ekran-M".

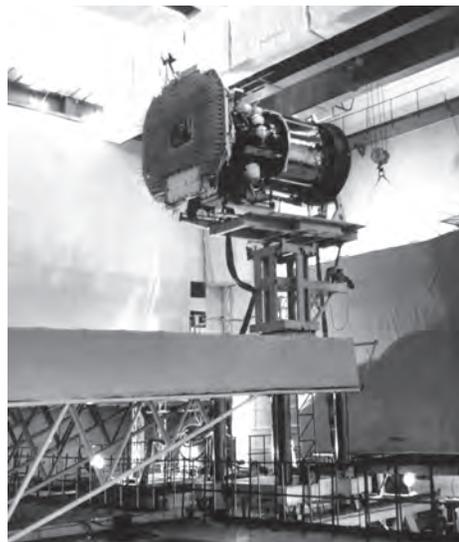


Fig. 8. SC "Potok" during the radio technical tests.



Fig. 9. SC "Luch" in the exhibition hall of A.S. Popov Central Museum of Communications.



Fig. 10. SC "Glonass-M": docking of a block of three spacecrafts with an upper stage at the cosmodrome.

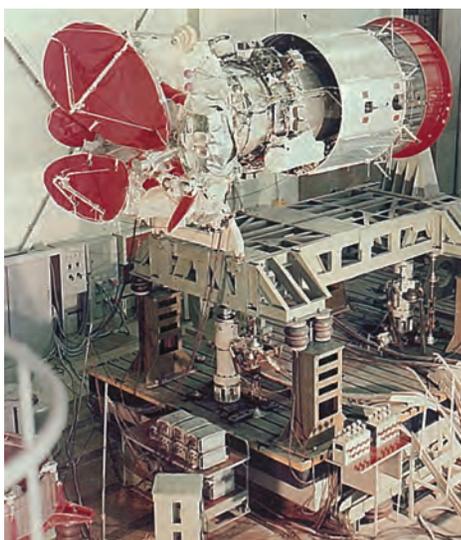


Fig. 11. SC "Gals" on the vibration stand.

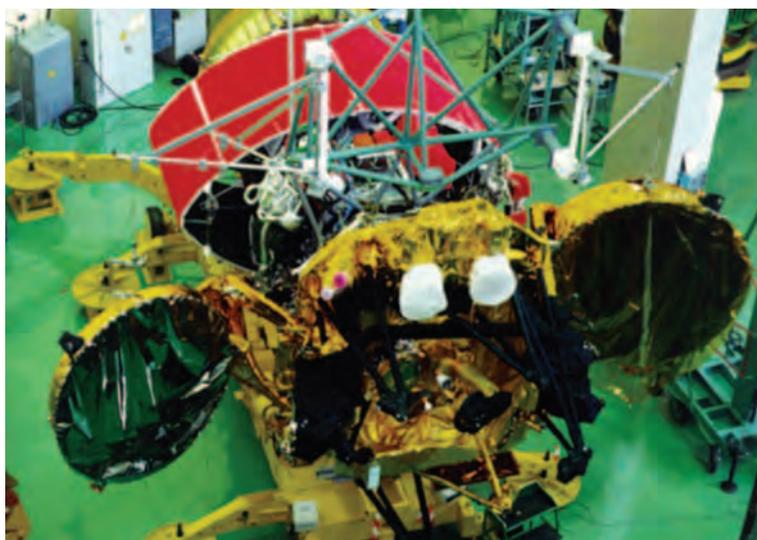


Fig. 12. SC "Sesat" in the assembly room.

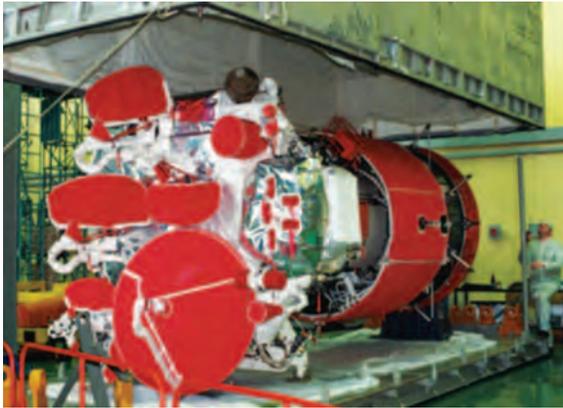


Fig. 13. SC "Ekspress-A". The spacecraft preparation for shipment to the cosmodrome.



Fig. 14. SC "Glonass-K" in the assembly room.



Fig. 15. SC "Amos-5".



Fig. 16. SC "Telecom-3" during the tests.



Fig. 17. N.A. Testoyedov, RAS Corresponding Member, Director-General of the Joint-Stock Company "Academician M.F. Reshetnev "Information Satellite Systems".

References

1. *40 Space Years [40 kosmicheskikh let]*, Ed. K.G. Smirnov-Vasilev, RF, Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, Reshetnev RPA AM Publ., 2002, 311 pp. (in Russian).
2. *Academician Mikhail Fedorovich Reshetnev [Akademik Mikhail Fedorovich Reshetnev]*, Ed. A.G. Kozlov, RF, Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, Reshetnev RPA AM Publ., 2006, 304 pp. (in Russian).
3. *Space Milestones: Coll. Sci. Papers Dedicated to the 50th Anniversary of Academician M.F. Reshetnev ISS JSC [Kosmicheskie vekhi: Sbornik nauchnykh trudov, posvyashchenny 50-letiyu sozdaniya OAO "ISS" imeni akademika M.F. Reshetneva]*, Ed. N.A. Testoyedov, RF, Krasnoyarsk, SEE Yu.P. Sukhovolskaya Publ., 2009, 704 pp. (in Russian).
4. *N.A. Testoyedov, M.M. Mikhnev, A.E. Mikheev, A.K. Shatrov, V.V. Dvirnyy, V.V. Zlotenko, Yu.A. Filippov, V.V. Ilin Spacecraft Production Technology: Textbook for Universities [Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov: Uchebnik dlya vuzov]*, RF, Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009, 352 pp. (in Russian).
5. **V.I. Ermolenko**
We Were the First: History of the Navy Navigational and Communication Space System Creation [My byli pervymi: istoriya sozdaniya Voenno-morskogo flota], RF, Moscow, Kuchkovo Pole Publ., 2014, 494 pp. (in Russian).
6. *Proc. "Integration of the Regional Aerospace Education: 50th Anniversary of the Graduation Departments of the Institute of Space Technology: Aircraft Department, Aircraft Engines Department, Automatic Control Systems Department, and the 25th Anniversary of the Basic Department of Space Vehicles" [Integratsiya v aerokosmicheskoy obrazovanii: Sbornik materialov: posvyashchaetsya 50-letiyu vypuskayushchikh kafedr Instituta kosmicheskoy tekhniki...]*, Ed. I.V. Kovalev, RF, Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2015, 239 pp. (in Russian).
7. **V.A. Raevskiy, N.A. Testoyedov, M.V. Lukyanenko, E.N. Yakimov**
Basics of the Active Systems Design for the Communication Apparatus Orientation and Stabilization in the Geostationary Orbit: Textbook for Universities Education Program 24.05.06 "Aircraft Control Systems" [Osnovy proektirovaniya aktivnykh sistem orientatsii i stabilizatsii apparatov svyazi na geostatsionarnoy orbite: Uchebnoe posobie dlya vuzov...], RF, Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2016, 493 pp. (in Russian).
8. **V.A. Raevskiy, N.A. Testoyedov, M.V. Lukyanenko, E.N. Yakimov**
Basics of the Passive Systems Design for the Orientation and Stabilization of Automated Spacecrafts of Communication, Navigation and Geodesy: Textbook for Universities Education Program 24.05.06 "Aircraft Control Systems" [Osnovy proektirovaniya passivnykh sistem orientatsii i stabilizatsii avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov svyazi, navigatsii i geodezii: Uchebnoe posobie dlya vuzov...], RF, Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2016, 410 pp. (in Russian).
9. **N.A. Testoyedov, V.E. Kosenko, Yu.G. Vygonskiy, A.V. Kuzovnikov, V.A. Mukhin, V.E. Chebotarev, V.G. Somov**
Space Retransmission Systems: Monograph [Kosmicheskoye sistema retranslyatsii: Monografiya], Ed. A.V. Kuzovnikov, RF, Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017, 448 pp. (in Russian).
10. **M.A. Bykhovskiy**
Pioneers of the Information Age: History of the Communication Theory Development, Ser. "History of Telecommunications and Radio Engineering" [Pionery informatsionnogo veka. Istoriya razvitiya teorii svyazi, Ser. "Istoriya elektrosvyazi i radiotekhniki"], Iss. 4, RF, Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006, 376 pp. (in Russian).

Дистанционное зондирование Земли и геоинформационные системы*

В.Н. Копенков, В.В. Сергеев, В.А. Сойфер, А.В. Чернов

Рассматривается роль и место космического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в геоинформационных системах. Приводятся этапы развития ДЗЗ и геоинформатики, краткий обзор российских средств получения, приема и обработки космических снимков. Описаны специфика и задачи обработки данных ДЗЗ, включая гиперспектральные данные, а также опыт использования данных ДЗЗ и геоинформатики для решения практических задач управления территорией Самарской области.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геоинформационные системы, космические аппараты, обработка изображений, большие геоданные.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 16-29-09494 и 16-29-11683).

Введение

Жизнь современного человека и общества невозможно представить без геоинформационных систем. Мы видим пробки по Яндекс.Картам, вызываем такси и получаем прогнозы прибытия транспорта на свою остановку через мобильные приложения, смотрим в Интернете космические снимки и удивляемся их высокой детальности и разрешению. Туристы записывают навигационные треки, чтобы не заблудиться, и потом выкладывают их в социальные сети. По общим оценкам около 80% производимой и потребляемой современным человеком «неразвлекательной» информации имеет координатную составляющую.

Геоинформационные системы (ГИС) накапливают, обрабатывают и предоставляют пользователям пространственно-координированные сведения об объектах, расположенных на земной поверхности. Язык, традиции, задачи геоинформатики, с одной стороны, берут начало из классической картографии, а с другой стороны – из теории построения компьютерных информационных систем, баз данных, пространственного моделирования.

Основная форма представления информации из ГИС – цифровые карты. Они создаются на основе различных информационных источников: традиционных картографических материалов, геодезических измерений и т.д. Важнейшим источником данных для ГИС являются изображения, получаемые в результате космического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Получение таких изображений стало возможным в результате развития практической космонавтики, одним из основоположников которой является академик С.П. Королев.

Этапы развития дистанционного зондирования Земли и геоинформатики

Дистанционные методы применяются в исследованиях Земли довольно давно. Первые исследования

**КОПЕНКОВ****Василий Николаевич**

Самарский национальный
исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

**СЕРГЕЕВ****Владислав Викторович**

профессор,
Самарский национальный
исследовательский университет
им. академика С.П. Королева

**СОЙФЕР****Виктор Александрович**

академик, профессор,
президент Самарского национального
исследовательского университета
им. академика С.П. Королева

**ЧЕРНОВ****Андрей Владимирович**

директор Поволжского центра
космической геоинформатики
(Геоинформспутник)

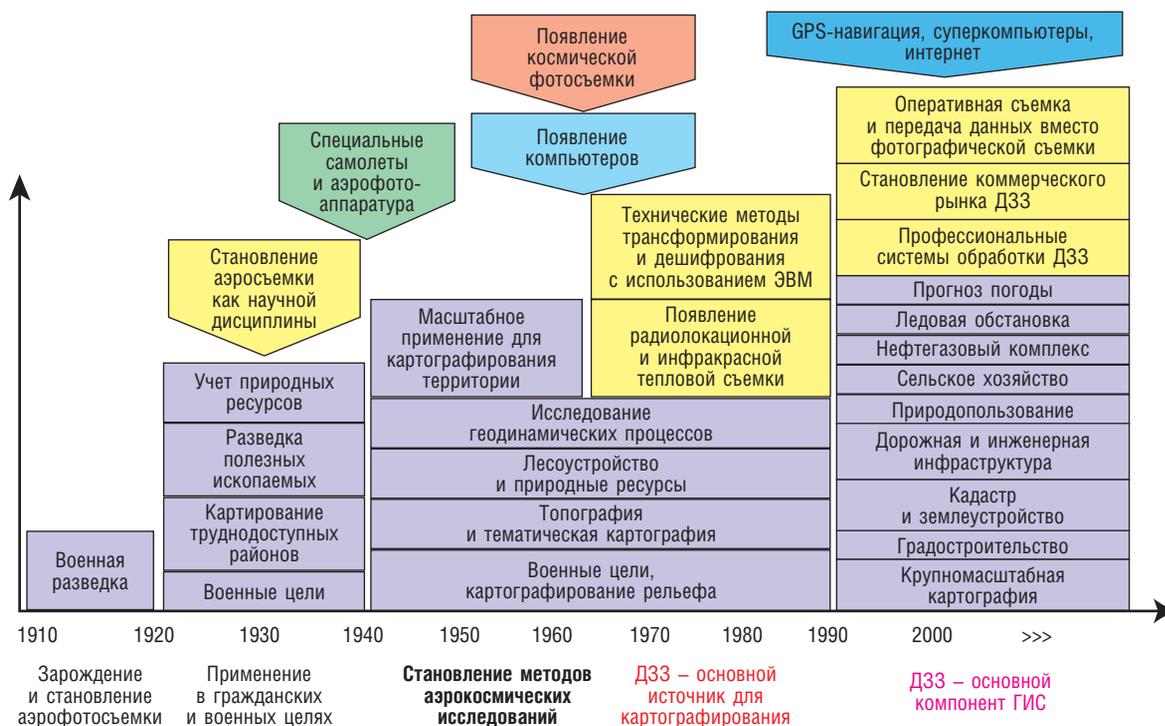


Рис. 1. История развития дистанционного зондирования Земли.

географических объектов и процессов с применением технических средств воздухоплавания ведутся с начала XIX в. С изобретением фотографии возникла наземная фото-теодолитная съемка, при которой по перспективным фотоснимкам составлялись карты горных районов. В середине XIX столетия впервые были совмещены средства воздухоплавания и фотографии – в 1858 г. была получена первая фотография с воздушного шара небольшой деревеньки под Парижем [1].

Появление и развитие авиации обеспечило целенаправленное применение воздушного фотографирования больших территорий и отдельных объектов на земной поверхности. Особое развитие воздушная съемка получила во время Первой мировой войны 1914–1918 гг., когда она применялась главным образом для целей разведки.

Период развития дистанционного зондирования с 1920 по 1960 г. связан с применением аэрофотосъемки в гражданских целях – сначала в народном хозяйстве для целей простого наблюдения, а несколько позже и в научных исследованиях [2].

Третий период (начало 1960–1980 гг.) можно по праву называть самым значимым, так как он увенчался появлением принципиально нового метода – космического зондирования Земли, изменившего представление о дистанционных методах ее изучения. Четвертый период (с начала 1990 гг. до настоящего времени) является во многом революционным в становлении ДЗЗ как основной информационной базы ГИС. Он характеризуется развитием компьютерных технологий, которые сделали возможным преобразовывать данные ДЗЗ в цифровой вид для последующей обработки в ГИС, что дало им возможность стать основным источником пространственной информации о Земле, а также появлением персональных станций приема космической информации, позволяющих любому пользователю лично принимать данные из космоса и профессионально их обрабатывать. Это стало огромным шагом в научно-техническом прогрессе и развитии дистанционного зондирования в целом. Общая схема этапов развития ДЗЗ представлена на рисунке 1 [1–3].

История развития космических методов ДЗЗ свидетельствует о том, что новые достижения науки и техники сразу же используются для совершенствования технологий получения космоснимков. В настоящее время отчетливо проявляются следующие тенденции развития космического ДЗЗ.

- Космические снимки, оперативно размещаемые в Интернете, становятся наиболее востребованной видеоинформацией о местности – как для

специалистов-профессионалов, так и для широких слоев населения.

- Разрешение (детальность) и метрические свойства космических снимков открытого доступа быстро улучшаются. Получают распространение орбитальные снимки сверхвысокого разрешения – метрового и даже дециметрового, которые успешно конкурируют с аэрофотоснимками.

- Развитие всепогодной радиолокации превращает ее в прогрессивный метод получения метрически точной пространственной геоинформации, которая начинает эффективно комплексироваться с оптическими технологиями аэрокосмического зондирования.

- Быстро формируется рынок разнообразной продукции аэрокосмического зондирования Земли. Неуклонно увеличивается число коммерческих космических аппаратов, функционирующих на орбитах, – как отечественных, так и зарубежных.

Развитие ДЗЗ тесно связано с развитием ГИС. Можно выделить несколько этапов развития ГИС в СССР и России. ГИС появились в 1960 г. как средство представления географических объектов с использованием компьютерных баз данных. В 80–90-х гг. преобладали настольные, в основном однопользовательские, ГИС. Основной их задачей было воспроизводство бумажных карт с меньшими затратами, чем ручным способом, на основе обработки аэрофотоснимков, сканирования (дигитализации) и распознавания старых бумажных карт. Это было время больших государственных картографических фабрик, больших сканеров и плоттеров, военных заказов [1, 4].

Основной прорыв в развитии географических информационных систем произошел с появлением персональных компьютеров в начале 90-х гг. ГИС быстро адаптировались к этой новой, более дешевой платформе, и цена систем начала падать по мере того, как число пользователей и организаций, которые могли бы позволить себе приобрести ГИС, увеличивалось. Начиная примерно с 1995 г., в Россию, во-первых, пришло зарубежное программное обеспечение: MapInfo, ARC/INFO, Intergraph и др. Во-вторых, стали появляться неплохие отечественные продукты: Панорама (Карта 2000), Ингео (Альбея), GeoGraph, Zulu. В-третьих, в цифровую форму стали массово переводиться основные архивы топографических карт и планов. В-четвертых, стали доступны высокодетальные космические снимки. Образовался рынок геоинформационных услуг, разработчики начали создавать цифровые карты, наносить на них тематические слои со своими объектами, решать задачи интеллектуального

анализа геоданных. Началась эпоха цифровых карт, в основном менее подробных, чем топографические бумажные карты, но более ориентированных на потребителей и решение конкретных прикладных задач. По мере накопления баз пространственных данных стали появляться сетевые программные решения для конечных пользователей, основанные на технологии «клиент–сервер». Пионерами в этом отношении выступали муниципалитеты (в первую очередь, отделы архитектуры), земельные комитеты, организации нефтегазового комплекса. Однако «аналитическая геоинформатика», глубокий анализ геоданных оставался в руках профессионалов, и главной сложностью оставался дефицит «хороших» данных в цифровом виде. Поэтому основной задачей ГИС по-прежнему являлось формирование пространственных данных и их «правильное» визуальное представление согласно утвержденным классификаторам.

Приблизительно в 2005 г. начался новый этап развития ГИС. Во-первых, появились глобальные веб-сервисы: GoogleMaps, Яндекс.Карты, 2ГИС и др.; новые геопортальные технологии стали вытеснять клиент-серверные решения. Во-вторых, появилось много «открытых» и «полуоткрытых» геоданных (GPS- и ГЛОНАСС-измерений, данных из социальных сетей, космических снимков и покрытий из них), а основные архивы бумажных карт уже были переведены в цифровой вид. В-третьих, значительную роль стал играть коммерческий рынок ДЗЗ. В настоящее время частные компании осуществляют запуски собственных спутников с последующей продажей снимков, а также занимаются предоставлением лицензий на право приема информации со своих космических систем. Это дало огромный толчок к появлению большого разнообразия предлагаемых космических снимков. Стало возможным зака-

зять снимки на любую интересующую территорию практически любого пространственного разрешения и в любом требующемся спектральном диапазоне. Иными словами, ниша задач описания и визуального анализа местности (для чего раньше использовались традиционные бумажные карты) оказалась занята глобальными веб-сервисами и небольшими тематическими решениями на их основе, а «фокус» специализированных ГИС переместился от простого ввода данных, поиска и визуализации в сторону аналитических решений – для бизнеса, органов власти.

Космические аппараты и наземная инфраструктура ДЗЗ в СССР и России

Космические аппараты ДЗЗ.

В августе 1961 г. летчик-космонавт СССР Г.С. Титов впервые выполнил фотографирование Земли с пилотируемого космического корабля «Восток-2», что считается началом эры космического ДЗЗ. Но при этом еще 12 апреля 1957 г., за полгода до запуска Первого искусственного спутника Земли, главный конструктор ОКБ-1 С.П. Королев подписал и направил на согласование президенту Академии наук СССР М.В. Келдышу письмо в Совет Министров СССР с предложением о возможности создания ориентированного спутника Земли с целью фотографирования земной поверхности [5]. С 1958 г. С.П. Королев предложил своему соратнику Д.И. Козлову заняться темой дистанционного зондирования. 27 сентября 1962 г. на орбиту был выведен первый серийный космический аппарат серии «Зенит-2» – спутник «Космос-9». Срок активного существования «Зенит-2» на орбите составлял всего четверо суток, но по тому времени это было большим достижением. Глубокий анализ информации, полученной с помощью фотоаппаратуры космических аппаратов «Зенит-2», привел к идее о реализации четырех основ-

ных направлений создания космических аппаратов ДЗЗ:

- обзорного типа с максимально возможным захватом местности и приемлемым уровнем разрешения;
- детального и высокодетального типа с максимально возможным разрешением и приемлемой шириной захвата местности;
- картографического типа с получением стереоснимков с высокими измерительными свойствами и высокоточным определением элементов внешнего ориентирования космического аппарата в момент съемки;
- для решения социально-экономических задач с получением многозональных и спектральнозональных снимков различного уровня разрешения.

В 60–70-е гг. спутники «Зенит» были модернизированы, что позволило создать автоматические картографические ракетно-космические комплексы. В 1964 г., начиная с космического аппарата (КА) № 14, серийное производство и работы по созданию автоматических низкоорбитальных средств ДЗЗ по указанию С.П. Королева окончательно были переданы в филиал № 3 ОКБ-1 (г. Куйбышев), возглавляемый Д.И. Козловым, и на куйбышевский завод «Прогресс». Всего в рамках летных испытаний и штатной эксплуатации было проведено 76 успешных запусков КА «Зенит-2» и 179 успешных запусков «Зенит-4». В 1974 г. на базе филиала было создано самостоятельное предприятие – Центральное специализированное конструкторское бюро (ЦСКБ), а в 1996 г. на базе ЦСКБ и завода «Прогресс» Указом Президента России создан Государственный научно-производственный ракетно-космический центр (РКЦ) «ЦСКБ-Прогресс» (в настоящее время – РКЦ «Прогресс»).

Из воспоминаний Г.Е. Фомина, заместителя генерального конструктора, начальника проектного отделения по разработке КА: *«В результате модернизации разрешение космических аппаратов обзорного типа повышено в 3–4 раза по сравнению с прототипом «Зенит-2», разрешение космических аппаратов детального типа повышено в 2,5 раза по сравнению с прототипом «Зенит-4». Срок существования на орбите увеличен в 7 раз, при этом реализован режим экономичного полета с минимальным расходом невосполняемых запасов рабочего тела и электроэнергии в периоды, неблагоприятные для наблюдения или, по стратегическим соображениям, не требующие наблюдения. Повышена общая надежность и живучесть космических аппаратов. В период эксплуатации космических аппаратов семейства «Зенит» их запуски переведены на надежный унифицированный носитель 11А511У,*

применяемый и для запуска пилотируемых и грузовых космических кораблей... Основы построения систем управления движением отечественных КА были заложены в 1950–1960 годы под руководством С.П.Королева и Б.В.Раушенбаха в процессе создания первых спутников» [5].

С 1985 г. начинается использование спутников, изготавливаемых на основе серийных космических аппаратов «Метеор-3», получивших обозначение «Ресурс-01». На этих спутниках бортовой информационный комплекс, осуществляющий зондирование, включал в себя сканеры МСУ-СК и МСУ-Э, дополнительно устанавливались сканер среднего разрешения МСУ-С и радиолокатор «Траверс», позволявшие получать снимки географических и геологических объектов более высокого качества. Для расширения круга решаемых задач, улучшения характеристик и увеличения объема получаемой информации в 1987 г. был запущен космический аппарат «Ресурс-Ф2», позволивший проводить плановое многозональное фотографирование поверхности Земли в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах.

Основными характеристиками цифровых космических снимков являются спектральное, радиометрическое, пространственное и временное разрешения. Спектральное разрешение показывает, с какой детальностью участки спектра электромагнитных волн регистрируются сенсором, радиометрическое определяет диапазон различимых на снимке яркостей, а временное устанавливает, с какой периодичностью один и тот же сенсор может снимать заданный участок земной поверхности.

В современной России в последние годы запущены космические аппараты ДЗЗ со следующим спектральным разрешением:

- Ресурс-П: 0.9 м – панхроматические снимки (оттенки серого); 3, 12, 60, 120 м – мультиспектральные снимки; 25–30 м – гиперспектральные.

- Канопус-В: 2.1 м – панхроматические; 12 м – мультиспектральные, 200 м – снимки ближнего ИК-диапазона.

- Метеор-М: 60, 120, 1000 м – мультиспектральные снимки.

- Электро-Л: 1000, 4000 м – мультиспектральные снимки.

Спутники Ресурс-ДК, Ресурс-П, Канопус-В предназначены для получения высокодетальных данных ДЗЗ в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра в режиме реального времени для осуществления экологического мониторинга, инвентаризации природных ресурсов, поиска полезных ископаемых, крупномасштабного картографирования.

Цель спутников Метеор-М, Электро-Л – оперативное получение информации о состоянии облачного покрова и подстилающей поверхности Земли, сбор гидрометеорологических данных и измерений, гелиогеофизические исследования и экологический мониторинг.

Планы Роскосмоса предполагают существенное увеличение орбитальной группировки Российских космических аппаратов ДЗЗ. Развитие космической системы ДЗЗ из космоса в соответствии с параметрами Федеральной космической программы России на 2016–2025 гг. представлено в *таблице 1*.

Гиперспектральная аппаратура. Одним из самых перспективных и быстро развивающихся направлений космической съемки является использование гиперспектральной аппаратуры.

Спектральный диапазон от 0.4 до 2.5 мкм является типовым для современных гиперспектрометров. Именно в этом спектральном диапа-

Таблица 1. Планы запуска Российских спутников ДЗЗ на 2017–2025 гг.

Год	Космические аппараты, планируемые к запуску
2017	«Канопус-В-ИК», «Метеор-М» № 2.1, «Канопус-В» № 3, «Канопус-В» № 4
2018	«Метеор-М» № 2.2, «Электро-Л» № 3, «Канопус-В» № 5, «Канопус-В» № 6
2019	«Артика-М» № 1, «Ресурс-П» № 4, «Кондор-ФКА» № 1
2020	«Метеор-М» № 2.3, «Ресурс-П» № 5, «Кондор-ФКА» № 2
2021	«Метеор-М» № 2.4, «Ресурс-ПМ» № 1, «Артика-М» № 2, «Электро-Л» № 4, «Обзор-Р» № 1
2022	«Ресурс-ПМ» № 2, «Электро-Л» № 5
2023	«Артика-М» № 3, «Метеор-М» № 2.5, «Ресурс-ПМ» № 3, «Обзор-Р» № 2
2024	«Метеор-М» № 2.6, «Артика-М» № 4, «Ресурс-ПМ» № 4
2025	«Артика-М» № 5, «Кондор-ФКА-М» № 1

зоне сосредоточены спектры большинства наблюдаемых из космоса поверхностей, в частности полосы поглощения, обусловленные химией поверхностей, а также спектры поглощения атмосферных компонентов. Специфика гиперспектральных сенсоров состоит в том, что они формируют изображения, в которых для каждого пикселя присутствует его детальное описание на всем регистрируемом спектральном диапазоне – так называемая *спектральная сигнатура*, или спектральная подпись. Для гиперспектрального сенсора важно не количество измеряемых спектров, а узкий диапазон (порядка 5–10 нм) и последовательность («непрерывность») измерений. То есть сенсор с 20 каналами считается гиперспектральным, если он покрывает диапазон 500–700 нм, при этом ширина каналов 10 нм, а сенсор с 20 отдельно расположенными каналами, покрывающими видимую область спектра, ближнюю, коротковолновую, среднюю и длинноволновую ИК-области, считается мультиспектральным [6].

Среди Российских космических аппаратов гиперспектральная аппаратура установлена на спутниках серии «Ресурс-П»:

- «Ресурс-П1», дата запуска – 25 июня 2013 г.;
- «Ресурс-П2», дата запуска – 26 декабря 2014 г.;
- «Ресурс-П3», дата запуска – 13 марта 2016 г.

Задачи, решаемые группировкой:

- создание и обновление карт масштаба 1:10 000;
- экологический мониторинг;
- оперативный мониторинг чрезвычайных ситуаций;
- решение проблем сельского и лесного хозяйства;
- мониторинг социально-экономической инфраструктуры территории.

Обработка гиперспектральных данных в ГИС проводится на всех уровнях, начиная с визуализации

и простых манипуляций повышения качества и заканчивая тематической обработкой. Гиперспектральные данные по отношению к панхроматическим и мультиспектральным имеют две основные особенности: критически большой объем данных и наличие исчерпывающей информации о значении отражательной способности в широком диапазоне длин волн. Первая особенность обуславливает постановку таких задач обработки данных, как сокращение размерности при сохранении информативности и построение вычислительно эффективных алгоритмов. Вторая особенность – наличие исчерпывающей спектральной характеристики пикселя; формирует особый класс задач, связанных с классификацией спектральных сигнатур пикселей изображения.

Наземная инфраструктура приема и обработки данных ДЗЗ. Средством постоянного и регулярного получения космических снимков является наземный комплекс приема и обработки данных ДЗЗ, предназначенный для получения, обработки и хранения, а также распространения данных дистанционного зондирования Земли [7].

На территории России расположено более 30 таких наземных комплексов. Первая часть из них расположена и функционирует на предприятиях, ассоциированных с государственной корпорацией «Роскосмос», вторая – у коммерческих структур, третья – на базе университетов.

Типовой наземный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций:

- формирование заявок на проведение съемки земной поверхности, планирование сеансов связи с космическим аппаратом;
- прием данных;
- предварительную обработку данных, выделение массивов целевой и служебной информации;
- демодуляцию, декодирование, радиометрическую коррекцию, фильтрацию, преобразование динамического диапазона, формирование обзорного изображения и выполнение других операций цифровой первичной обработки;
- каталогизацию, архивацию информации и ее последующую передачу потребителю;
- геометрическую коррекцию и геопривязку изображений с использованием данных о параметрах углового и линейного движения космических аппаратов и/или опорных точек на местности;
- лицензионный доступ к данным, получаемым со спутников ДЗЗ;
- анализ качества полученных изображений с использованием экспертных и программных методов.



Рис. 2. Функциональная схема работы наземного комплекса приема и обработки данных.

В состав базовой конфигурации комплекса входят (рис. 2):

- антенная система (прием сигналов с борта спутника);
- приемно-обрабатывающий тракт (расшифровка и трансформация принятого сигнала до уровня, пригодного для дальнейшей обработки программными средствами);
- программное обеспечение (формирование заявок на проведение съемки, планирование сеансов связи, обработка и корректировка данных в соответствии с индивидуальными особенностями спутника);
- лицензии на работу с конкретными спутниками (обеспечивают доступ потребителя к данным и возможность их обработки).

В Самарском университете с 2007 г. функционирует Центр приема и обработки космических снимков. На крыше научного корпуса размещены три антенны, радиус «покрытия» которых составляет более 2000 км, пользователи заказывают снимки на территорию от Санкт-Петербурга до Каспия и Казахстана. Центр может принимать снимки с 10 космических аппаратов, сейчас наиболее востребованными являются снимки Spot 6/7 с разрешением 1.5 м и радиолокационные снимки Radarsat-2. За 10 лет функционирования накоплен архив в несколько терабайтов данных, создан и используется региональный банк данных космических снимков (РБКС) Самарской области. Региональный банк космических снимков (рис. 3) явился основой реализации множества конкретных прикладных про-

ектов. К примеру, создана единая цифровая картографическая основа и адресный план Самарской области, где представлены все населенные пункты, детализированные «до дома», с различными характеристиками, например численностью населения по группам возрастов или годам постройки здания. Создан геопортал Самары и геопортал Самарской области, где можно посмотреть открытую для населения часть информации.

В целом, российские наземные комплексы и программное обеспечение для их обработки находятся на мировом уровне. К примеру, комплексы Унискан, программное обеспечение Photomod, ScanEx ImageProcessor поставляются и успешно функционируют более чем в 80 странах мира.

Специфика и задачи обработки данных ДЗЗ

Требования к спектральному и пространственному разрешению данных. Для решения практических задач в идеале нужно иметь самые подробные и актуальные данные на максимально большую территорию. Но при внешне кажущемся

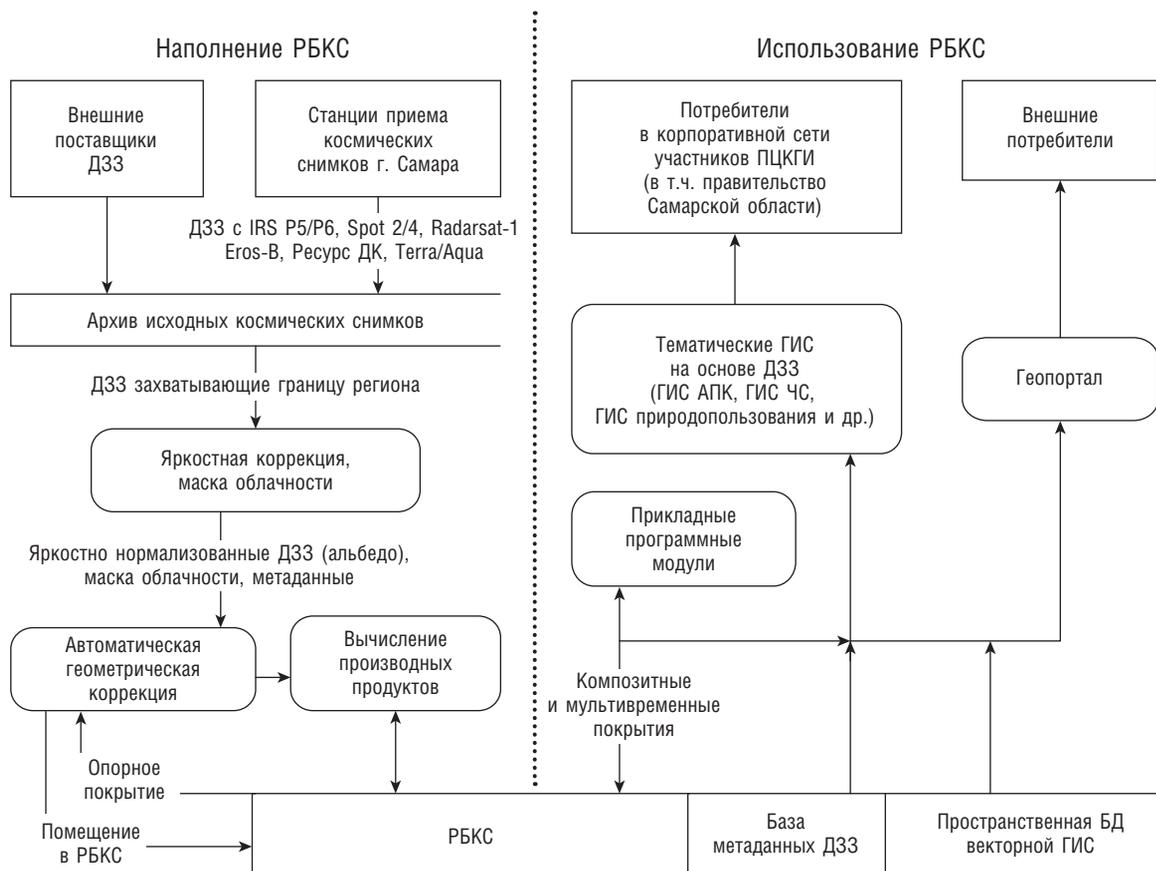


Рис. 3. Общая схема программного обеспечения ведения регионального банка космических снимков (РБКС), ПЦКГИ – Поволжский центр космической геоинформатики, АПК – агропромышленный комплекс, ГИС ЧС – ГИС для анализа чрезвычайных ситуаций.

громадном выборе космоснимков недорого получить полное покрытие даже среднего по площади региона России снимками разрешения 1–10 м в настоящее время нелегко.

Выделим три основных типа использования данных ДЗЗ для мониторинга и анализа территории региона.

1. Фиксирование объектов и их границ и периодических изменений в их составе. Чаще всего это делается с помощью обновления цифровых карт или составления детальных ортопокрытий. Если принять де-факто сложившиеся требования к ведению цифровых карт и разработке градостроительной документации соответствующего уровня, то достаточно разрешения данных 0.5–1 м на города и сельские населенные пункты и 2–5 м на межселенную территорию. Период обновления информации может составлять 3–5 лет.

2. Мониторинг сезонных и межсезонных изменений. Для осуществ-

вления такого типа мониторинга необходимо иметь 3–5 покрытий в год мультиспектральными космическими снимками. Большинство задач такого типа можно решить на основе мультиспектральных снимков разрешения 5–30 м (от RapidEye до бесплатного Landsat). Предъявляются высокие требования к постоянству радиометрических характеристик, наличию ближнего ИК-диапазона, требуется широкий захват (вся территория региона за один три пролета) с возможностью автоматической привязки без опорных точек и сравнительно низкая стоимость получения данных.

3. Недельный и ежедневный мониторинг. Предъявляются требования постоянства радиометрических характеристик, большого количества спектральных каналов, широкий захват (вся территория региона за один пролет). К сожалению, доступа к многоканальным ежедневным данным такого типа разрешения (30–100 м) на территории России практически нет. Большинство ГИС-приложений основывается на ежедневных бесплатных снимках Terra/Aqua с разрешением 250–1000 м.

Отдельную позицию занимает использование радиолокационных данных ДЗЗ, которые можно получать независимо от погодных условий, что крайне важно для задач оперативного реагирования на



Рис. 4. Обработка аэрокосмических изображений для ГИС. ЦМР – цифровая модель рельефа.

ситуацию. Для них важнейшим критерием является оперативность выполнения заказа и периодичность повторной съемки.

Отметим еще раз, что с точки зрения практического применения основное достоинство космических снимков – возможность постоянного мониторинга больших территорий. Цифровые карты городов и регионов успешно создаются и обновляются с использованием аэрофотоснимков с самолетов, а для небольших фрагментов все чаще применяется аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Предварительная обработка, геометрическая и радиометрическая коррекции. Рисунок 4 иллюстрирует процесс обработки аэрокосмических изображений для ГИС, условно разделенный на стадии: бортовой обработки, наземной предварительной обработки, тематической обработки и векторизации (т.е. превращения в цифровую карту, размещенную в базе данных ГИС). Указанные стадии обработки аэрокосмических изображений являются достаточно очевидными и часто используются в научной и технической литературе [8].

Радиометрическая коррекция состоит в устранении искажений яркостей снимка. Задачи радиометрической коррекции следующие:

1. Калибровка значений яркостей, зарегистрированных датчиками спутника.
2. Устранение влияния атмосферы: поглощения и рассеяния, атмосферной дымки, разницы в длине

оптических путей в центре и по краям изображения.

3. Взаимная калибровка различных детекторов одной ПЗС-линейки.

4. Коррекция яркостей пропущенных пикселей или строк изображения.

Наиболее неопределенным и сложным этапом является устранение влияния атмосферы. Постоянство радиометрических характеристик снимков и радиометрическая коррекция особенно важны при обработке серий разновременных изображений, например для построения сезонной кривой развития вегетации на участках территории.

Любой снимок, полученный со сканера спутника, имеет различные геометрические искажения, связанные с условиями получения двумерного изображения трехмерной сцены. Основными геометрическими искажениями, наиболее сильно влияющими на точность привязки, являются следующие:

1. Искажение, вызванное рельефом. Поскольку сенсор сканирует территорию поперек трассы пролета, то верхние и боковые части объектов наклонены к краям полосы

наблюдения, а в надире, непосредственно под сенсором, искажения отсутствуют.

2. Искажение, вызванное вращением сканирующей оптики. Так как сенсор сканирует вдоль каждой строки изображения, расстояние от сенсора до Земли увеличивается по направлению от центра к краям полосы наблюдения; сканирующее зеркало вращается с постоянной скоростью, поэтому сенсоры сканируют более широкую территорию на краях, что выражается в сжатии изображения в точках, далеких от надира, и называется тангенциальным искажением масштаба.

Геометрические искажения космических снимков корректируются с использованием информации двух видов. Первый вид информации – орбитальные данные о параметрах внешнего (координаты космического аппарата и углы наклона) и внутреннего ориентирования (положение плоскости изображения, фокусное расстояние и др.). Точность привязки по таким данным обычно лежит в диапазоне от 4 до 50 м в зависимости от космического аппарата. Второй вид информации – трехмерные координаты известных опорных точек. Точность привязки снимков по таким данным значительно выше – 1–2 пикселя; она чаще используется для снимков сверхвысокого разрешения, но требует ручной обработки. Для геометрической коррекции и ортотрансформирования обычно используют преобразования с помощью рациональных функций. При этом точность используемой информации о рельефе местности по высоте для небольших углов съемки (до 15°) должна быть не хуже четырехкратной требуемой точности привязки. После получения ортофотоплана его преобразуют в какую-либо географическую проекцию.

Тематическая обработка данных ДЗЗ. После выполнения всех предварительных операций (радиометрической, геометрической кор-

рекции, преобразования в заданную географическую проекцию) возможна дальнейшая тематическая обработка и анализ космических снимков. Особенностью тематической обработки является извлечение из изображений лишь той части информации, которая интересует группу специалистов в области природопользования, геологии, градостроительства и т.д. (в отличие от предварительной обработки, выполняемой «для всех»), и использование специфических критериев качества обработки. Очень часто тематическая обработка осуществляется не в автоматическом, а в интерактивном режиме, т.е. с привлечением опыта и профессиональных знаний человека-оператора. Именно на этой стадии в обработке может быть использована дополнительная информация из ГИС. Например, это могут быть векторные карты, описывающие территорию в период времени, предшествующий зондированию, и позволяющие выявить на изображениях свежие изменения. Собственно, основной целью тематической обработки и векторизации как раз и является формирование или обновление «слоев» геоданных, интересующих конкретную группу пользователей, в базе данных ГИС.

Тематическое дешифрирование – отрасль научного знания и методология исследования закономерностей строения геосферы (геологическое строение, поверхностные и грунтовые воды, почвенный покров, растительность, ландшафты, антропогенные объекты), решающая задачи информационного обеспечения изучения территории путем анализа данных ДЗЗ [4, 8]. Основным принципом тематического дешифрирования является комплексный подход, выражающийся в совместном изучении структуры искомого объекта, представленной в виде признаков дешифрирования, и системы факторов, оказывающих влияние на его строение, эволюцию и функционирование. Процедура дешифрирования делится на последовательные логические этапы, основными из которых являются распознавание, интерпретация и принятие решений. На этапе распознавания путем анализа объектно-ориентированных свойств материала дистанционного зондирования (признаков дешифрирования) решается задача установления изображенных предметов, явлений или их свойств. Этот наиболее формализуемый этап сейчас получил широкое распространение в программах обработки растровых изображений.

К сожалению, топографическое и объектное дешифрирование автоматическими методами, которые используются в большинстве случаев, не дают полноценного описания, классификации, выявления структуры объектов земной поверхности. Приемы тематического дешифрирования, позволя-

ющие достичь более подробного уровня описания с учетом иерархической структуры и взаимосвязей компонентов природной среды, более узкоспециализированы и предполагают вовлечение априорных данных в обработку эмпирических. Это отражается на универсальности методического обеспечения работ подобного типа. Как показывает опыт, время от создания конкретной методики до ее реального применения на практике занимает несколько лет. Основными тормозящими факторами являются индивидуальные особенности дешифровочных признаков для конкретного региона, с одной стороны, и узкая специализация интерпретаторов – с другой.

Отнесение объекта к какой-либо классификационной группе происходит по набору нежестких правил, вытекающих из свойств и характеристик обрабатываемого дистанционного изображения. Интерпретация использует логические категории, основанные на коррелятивных связях между компонентами ландшафта. Принятие решений в тематическом дешифрировании связывается в основном с процедурой выделения текущего объекта. При этом для выделения объектов (разделения космического снимка на области по признаку однородности) и классификации объектов в большинстве случаев необходимо последовательно решить ряд задач, таких как:

- выделение контуров на космическом снимке;
- локализация и определение границ объектов;
- сегментация изображения на области;
- классификация и распознавание областей;
- выявление изменений областей на космическом снимке.

Математические методы обработки и анализа данных ДЗЗ. Эффективное решение задач обработки и анализа космических изображений должно быть основано на передовых математических методах и вычислительных алгоритмах. Научные коллективы Самарского университета и Института систем обработки изображений (ИСОИ) РАН обладают примерно сорокалетним опытом исследований и разработок в области методов, информационных технологий и программных систем анализа и распознавания космических изображений Земли. В частности, ими были созданы, исследованы и внедрены в практику:

- параллельно-рекурсивные методы и алгоритмы локальной цифровой обработки и распознавания изображений ДЗЗ;
- алгебро-арифметические методы синтеза быстрых алгоритмов дискретных ортогональных преобразований и спектрального анализа двумерных сигналов;

– методы и алгоритмы локальной цифровой обработки изображений ДЗЗ, основанные на принципах теории распознавания образов;

– методы и информационные технологии компьютерного моделирования видеоинформационного тракта систем ДЗЗ;

– информационные технологии интеллектуального компьютерного анализа и хранения гиперспектральных данных ДЗЗ;

– методы, алгоритмы и информационные технологии компрессии, защиты и верификации данных ДЗЗ;

– информационные технологии создания региональной инфраструктуры геопространственных данных;

– методы и информационные технологии анализа данных ДЗЗ для решения различных прикладных геоинформационных задач регионального уровня.

Многие из перечисленных фундаментальных научных результатов были получены при поддержке РФФИ.

Опыт использования данных ДЗЗ и ГИС в Самарской области

Разработанные сотрудниками Самарского университета и ИСОИ РАН методы, алгоритмы и геоинформационные технологии уже более 20 лет внедряются в практику регионального и муниципального управления [9, 10]. Разработано и установлено более 30 видов различных приложений, более чем на 1000 рабочих местах только в органах власти сейчас ежедневно используются компоненты региональной ГИС (табл. 2).

Разумеется, для решения этих задач недостаточно функций глобальных веб-ресурсов типа Яндекс.Карты и GoogleMaps, не хватает точности, актуальности и полноты представленных в них данных, поэтому требуется разработка профильных тематических ГИС и методов дистанционного зондирования.

В качестве одного из примеров приведем схему существующего

Таблица 2. Топ 10 предметных областей использования региональной ГИС Самарской области в органах власти

№ п/п	Предметная область	Потребители	Вид задач
1	Градостроительство	Региональный Минстрой, управления градостроительства городов и районов	Разработка генеральных планов, правил землепользования и застройки, выдача разрешительной документации
2	Управление недвижимостью	Кадастровая палата, управления земельных ресурсов городов и районов, региональное Минимущества	Ведение государственного кадастра недвижимости, предоставление земельных участков, контроль за использованием земель
3	Сельское хозяйство	Региональный Минсельхоз, агрохимслужба, агрономы в районах	Контроль субсидий, мониторинг сельхозземель
4	Природопользование	Региональный Минлесхоз	Обнаружение незаконной хозяйственной деятельности в границах памятников природы, ведение лесного и водного реестров, согласование размещения земельных участков
5	Охотопользование	Департамент охоты и рыболовства	Выдача разрешений на охотугодья, расчет охоторесурсов
6	Транспорт	Департамент транспорта Самары	Транспортное моделирование, диспетчеризация общественного транспорта
7	ЖКХ	Компании, эксплуатирующие инженерные сети	Ведение реестра объектов, задачи гидравлического расчета, обнаружение и локализация аварий
8	Экономика	Региональное Минэкономики	Ведение ГИС инвестора с инвестиционными площадками и иными ресурсами
9	Дороги и безопасность	ОблГАИ, региональный Минтранс	Расчет концентраций мест дорожно-транспортных происшествий, согласование процедур по ремонту и реконструкции дорожной сети
10	Информатика и связь	Региональный Департамент информационных ресурсов, технологий и связи	Создание и ведение базовых данных и региональной инфраструктуры пространственных данных

процесса контроля субсидий сельхозтоваропроизводителям в сфере управления сельским хозяйством, реализуемого с помощью ГИС агропромышленного комплекса (АПК) Самарской области (рис. 5).

1. Два раза в год по результатам озимого и ярового сева сельхозтоваропроизводители декларируют данные о засеянных культурах в привязке к полям на цифровой карте, автоматически формируют и подписывают отчеты.

2. Региональный Минсельхоз проверяет отчеты на соответствие площадей и предоставляет денежные субсидии.

3. На основе снимков среднего разрешения определяется на-

личие и уточненные границы посевов в пределах полей.

4. На основе ежедневно получаемых космических снимков с применением методов машинного обучения [11] определяется тип посевов (яровые, озимые, пары, неиспользуемые земли и пр.) и выделяются «подозрительные» поля, для которых выявленный тип посевов отличается от декларируемых данных (рис. 6).

5. На «подозрительные» поля выезжают инспекторы земельного контроля с мобильным приложением, установленном на планшете, и если действительно обнаружены расхождения, составляются соответствующие акты, сельхозтоваропроизводители возвращают субсидии и платят штрафы.

В результате применения такой схемы в Самарской области в последние три года значительно возросла дисциплина в области использования субсидий фермерами.

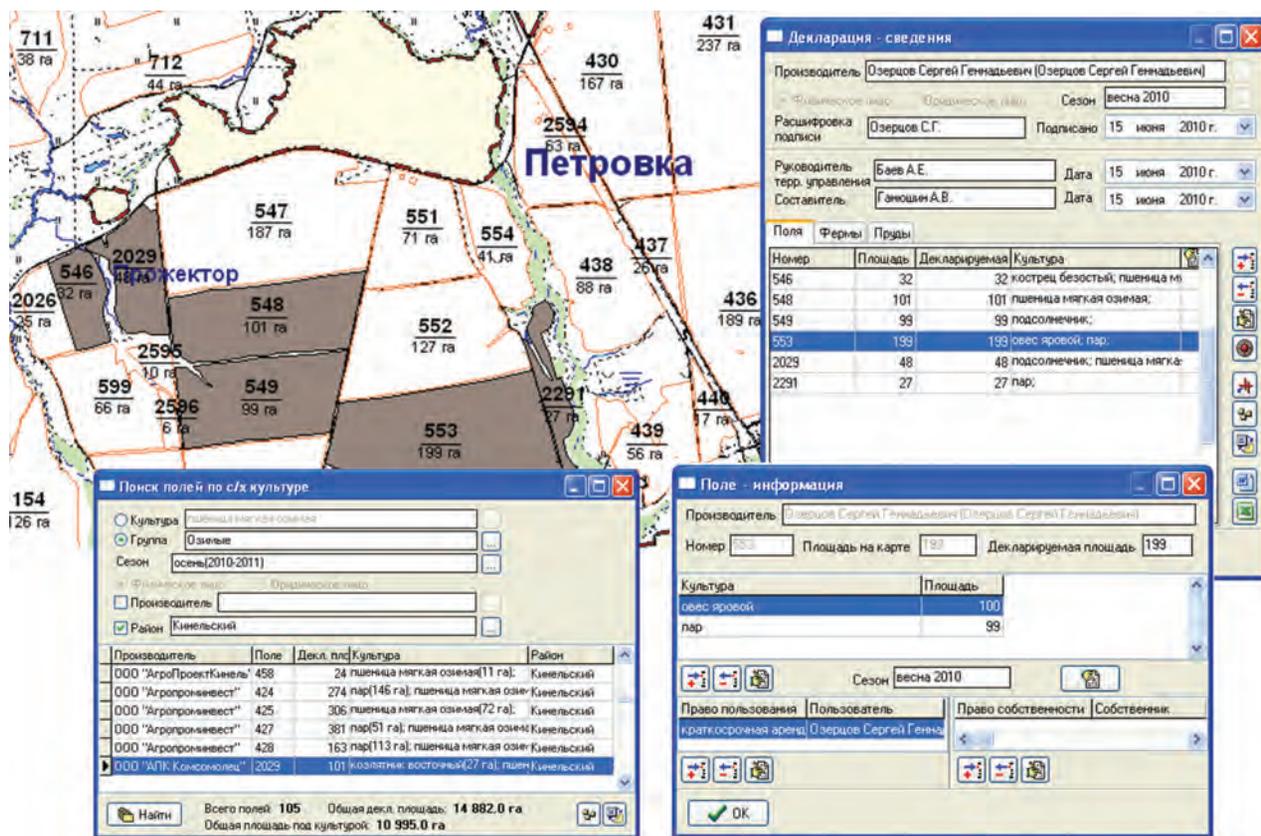


Рис. 5. Данные ГИС АПК.



Рис 6. Обнаружение озимых культур по космическим снимкам.

С другой стороны, в ГИС АПК сельхозтоваропроизводители используют данные космического мониторинга для оценки состояния посевов, выделения границ земель с замедленной растительностью, что позволяет сэкономить удобрения и перейти к «точному» земледелию.

Заключение

Космических аппаратов ДЗЗ и космических изображений с каждым годом становится все больше. Уже более десятка стран проявляют заметную активность на рынке данных дистанционного зондирования. Объем рынка геоинформатики и ДЗЗ увеличивается примерно в 1.3 раза быстрее, чем рынок информационных технологий в целом.

В ближайшей перспективе (3–5 лет), по моему мнению, отрасль обработки и использования космических изображений будет развиваться в следующих основных направлениях.

1. Повышение разрешения, точности привязки космических снимков, количества спектральных

диапазонов. Качественный рост в области радиолокационных данных из-за ее всепогодности.

2. Удешевление производства спутников ДЗЗ, уменьшение размера – создание группировок микро- и наноспутников, позволяющих снимать любой участок поверхности в ежедневном режиме с разрешением 2–5 м.

3. Переход от предоставления пользователям «сырых снимков» к предоставлению через Интернет-сервисы ортопокрытий и результатов их обработки (DaaS и SaaS), переход к облачному хранению данных и облачным вычислениям, повышение степени автоматизации обработки данных.

4. Интеграция ДЗЗ с другими методами получения информации о территории – снимков с БПЛА, геоданных, фотографий и видео из

социальных сетей, цифровых карт и источников «больших геоданных» – переход к пониманию дистанционного зондирования в широком смысле.

5. Создание и развитие тематических сервисов и продуктов – превращение ДЗЗ и ГИС из инструмента мониторинга в инструмент управления территорией.

6. Использование информационных технологий обработки сверхбольшого объема данных ДЗЗ (BigRemoteSensingData).

Говоря о перспективах, следует отметить, что ГИС и ДЗЗ – это громадная индустрия, в которую в ближайшем будущем будут вовлечены миллионы людей во всем мире. Эта технология будет применяться практически во всех сферах человеческой деятельности – от решения глобальных проблем, таких как загрязнение территорий и прогнозирование опасных природных явлений, до решения частных задач повседневной жизни каждого человека.

Авторы выражают благодарность РФФИ за финансовую поддержку более чем по 20 проектам, выполненным нашим коллективом, начиная с 1993 г.

Литература

1. **М.С. Горяйнов**
Автореф. диссерт. канд. ист. наук, ИИЕТ им. С.И. Вавилова РАН, Москва, 2006, 22 с.
2. **Ю.Ф. Книжников, В.И. Крацова, О.В. Тутубалина**
Аэрокосмические методы географических исследований: Учебник для студ. учреждений высш. проф. образования, Москва, Изд. Центр «Академия», 2004, 336 с.
3. **В.П. Глушко**
Развитие ракетостроения и космонавтики в СССР, Москва, Машиностроение, 1981, 208 с.
4. **У.Г. Рис**
Основы дистанционного зондирования, Москва, Техносфера, 2006, 336 с.
5. **М.В. Гашиков, Н.И. Глумов, Е.В. Гошин, А.Ю. Денисова, А.В. Кузнецов, В.А. Митекин, В.В. Мясников, В.В. Сергеев, В.А. Соيفер, В.А. Федосеев, В.А. Фурсов, М.А. Чичева, П.Ю. Якимов**
Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли: Монография, под ред. В.А. Соифера, Самара, Новая техника, 2015, 237 с.
6. *Российские космические системы. Орбитальная группировка КА ДЗЗ.* (<http://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/orbitalnaya-gruppirovka-ka-dzz/>).
7. **И. Москаленко**
ArcReview, 2005, №3(34). (https://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1742&SECTION_ID=47).
8. **Б.А. Дворкин, М.А. Элрдова**
Геоматика, 2010, №3, 19.
9. **А.В. Чернов**
Земля из космоса: наиболее эффективные решения, 2010, №7, 19.
10. **А.В. Чернов**
Управление развитием территории, 2013, №4, 52.
11. **Н.С. Воробьева, В.В. Сергеев, А.В. Чернов**
КО, 2016, 40(6), 929.
DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-929-938.
12. **А.Н. Кирилин, Г.П. Аниаков, Р.Н. Ахметов, Д.А. Сторож**
Космическое аппаратостроение: Научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», под ред. А.Н. Кирилина, Самара, Изд. дом «АГНИ», 2011, 280 с.

English

Earth Remote Sensing and Geoinformation Systems

Vasily N. Kopenkov

Samara National Research University
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
vkop@geosamara.ru

Vladislav V. Sergeev

Professor,
Samara National Research University
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
vsereg@geosamara.ru

Viktor A. Soifer

Academician, Professor,
President of Samara National Research University
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
soifer@ssau.ru

Andrey V. Chernov

Director of Non-Commercial Partnership
«Povolzhsky Center of Space Geoinformatics» (Geoinformsputnik)
39B, Lukacheva Str., Samara, 443068, Russia
chernov@geosamara.ru

Abstract

This paper examines the role and place of the Earth Remote Sensing (ERS) in geoinformation research. The stages of remote sensing and geoinformatics development are presented. A brief overview of Russian resources for capturing, receiving and processing space images is given. The specificities and tasks of the ERS data processing, including the hyperspectral data, as well as experience in the use of remote sensing data and geoinformation for solving the practical problems of managing the territory of the Samara region, are considered.

Keywords: remote sensing, geoinformation systems, space vehicles, image processing, big geodata, hyperspectral equipment.

*The work was financially supported by RFBR (projects 16-29-09494 and 16-29-11683).

Images & Tables

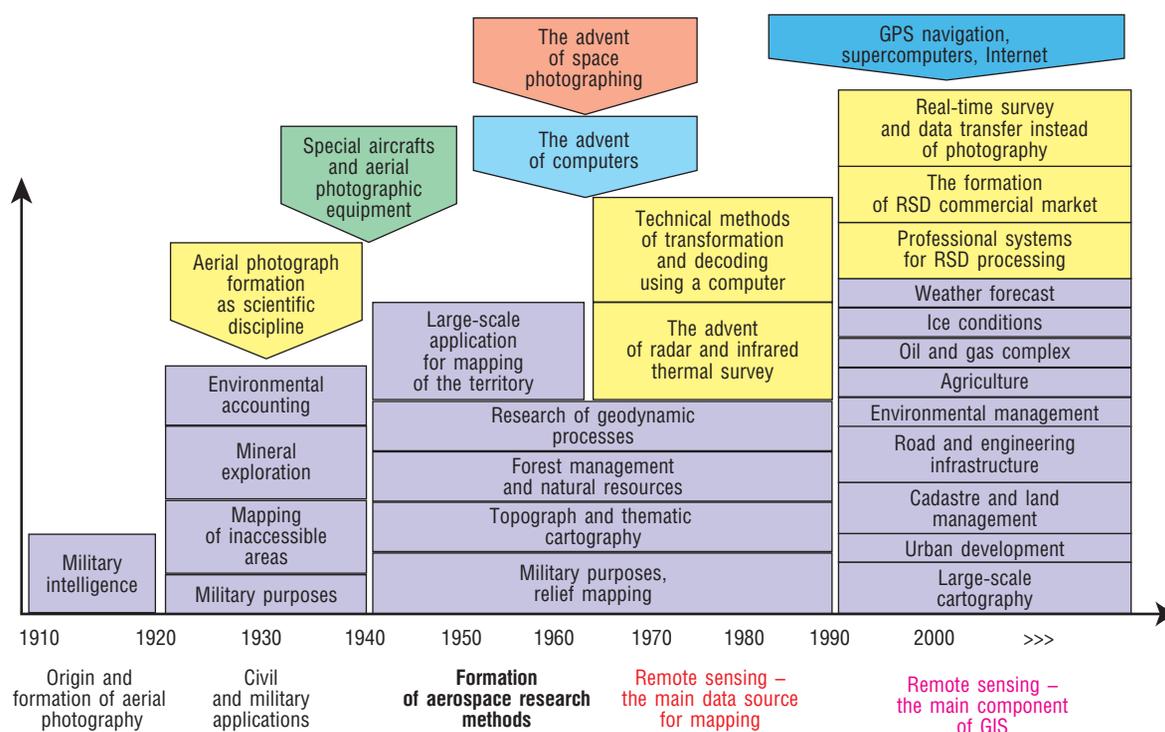


Fig. 1. History of Earth remote sensing.

Table 1. Plans for launches of Russian Earth Remote Sensing satellites for 2017–2025

Year	Spacecrafts scheduled for launching
2017	“Kanopus-V-IK”, “Meteor M” № 2.1, “Kanopus-V” № 3, “Kanopus-V” № 4
2018	“Meteor M” № 2.2, “Elektro-L” № 3, “Kanopus-V” № 5, “Kanopus-V” № 6
2019	“Arktika-M” № 1, “Resurs-P” № 4, “Kondor-FKA” № 1
2020	“Meteor M” № 2.3, “Resurs-P” № 5, “Kondor-FKA” № 2
2021	“Meteor M” № 2.4, “Resurs-PM” № 1, “Arktika-M” № 2, “Elektro-L” № 4, “Obzor-R” № 1
2022	“Resurs-PM” № 2, “Elektro-L” № 5
2023	“Arktika-M” № 3, “Meteor M” № 2.5, “Resurs-PM” № 3, “Obzor-R” № 2
2024	“Meteor M” № 2.6, “Arktika-M” № 4, “Resurs-PM” № 4
2025	“Arktika-M” № 5, “Kondor -FKA-M” № 1

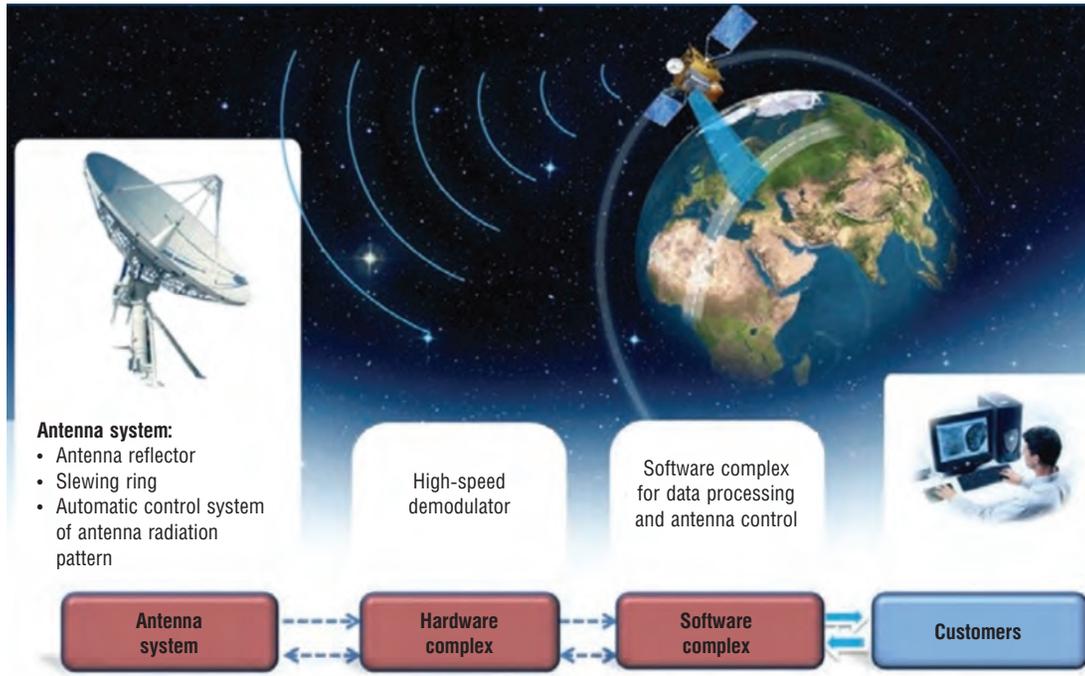


Fig. 2. Functional diagram of ground complex for receiving and processing space data.

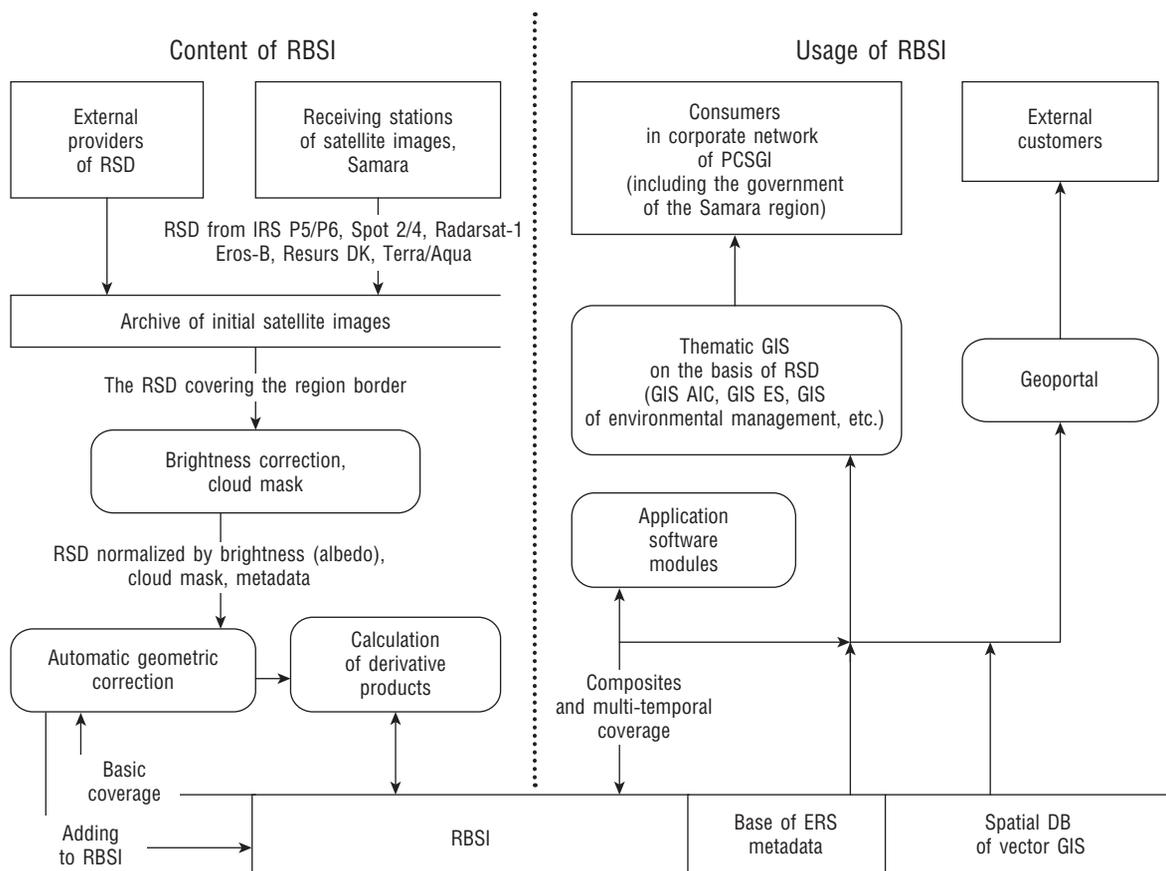


Fig. 3. General software scheme for managing the regional bank of satellite images (RBSI).

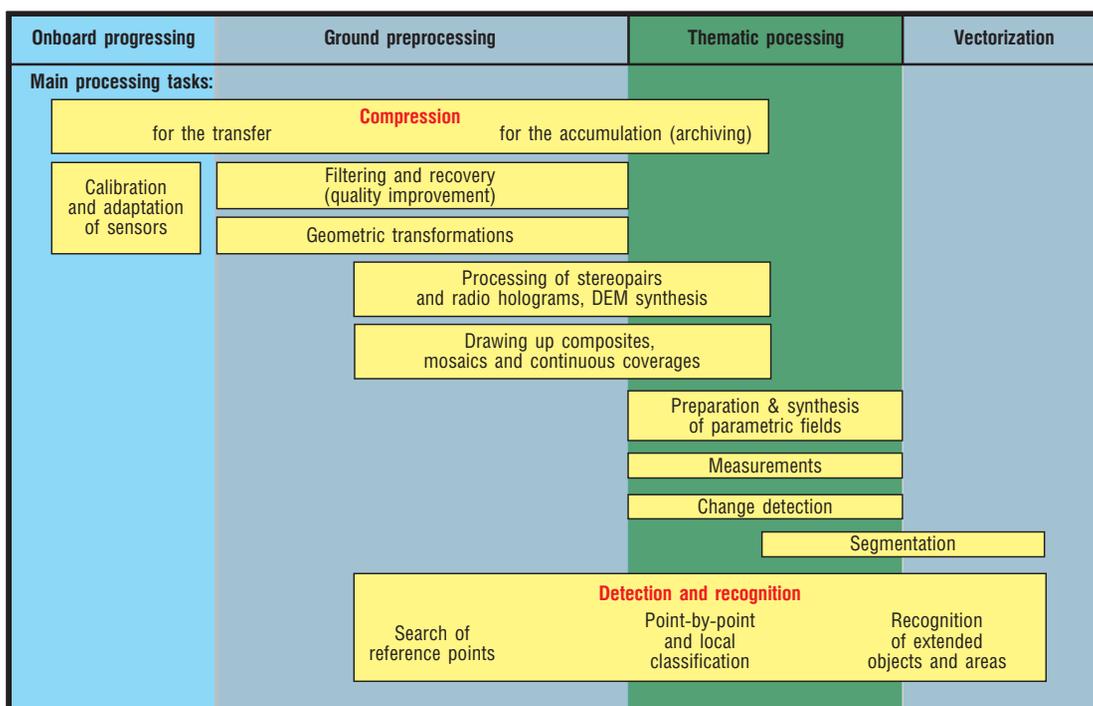


Fig. 4. Aerospace image processing for geographic information systems (GIS).

Table 2. Top 10 subject areas of the Samara Region regional geoinformation systems (GIS) usage by the local authorities

	Subject area	Consumers	Tasks
1	Urban Development	Regional Ministry of Construction, Departments of Urban Development of cities and districts	Development of terrain master plans, regulations of land usage and construction, authorization documents issuance
2	Facilities management	Cadastral Chamber, Department for Land Management, regional Ministries of Property Management	Maintenance of the state cadastral of real estate, provision of land plots, the land use control
3	Agriculture	Regional Ministry of Agriculture, agrochemical services, agronomists in the countryside	Subsidies management, agricultural lands monitoring
4	Environmental management	Regional Ministry of Forestry	Detection of illegal economic activities within the boundaries of nature protection areas, forest and water registers keeping, coordination of the land allocation
5	Hunting management	Department of hunting and fishing	Hunting licensing, calculation of hunting resources
6	Transport	Samara Department of Transportation	Transportation modeling, public transport handling
7	Housing and communal services	Companies, operating the network engineering	Maintenance of the engineering objects register, tasks of hydraulic calculation, accidents detection and localization
8	Economics	Regional Ministry of Economics	Maintaining the GIS for investors (investment platforms and other resources)
9	Roads networks and safety	Regional traffic police, regional Ministry of Transportation	Quantification of potentially hazardous areas of roads, coordination of the road network repair and reconstruction
10	Informatics and communications	Regional Department of Information Resources, Technology and Communications	Development and maintenance of the database and the regional spatial data infrastructure

References

1. **M.S. Goryaynov**
Abstr. PhD Thesis in Historical Sciences [Aftoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata istoricheskikh nauk], Vavilov IHST RAS, Moscow, 2006, 22 pp. (in Russian).
2. **Yu.F. Knizhnikov, V.I. Kravtsova, O.V. Tutubalina**
Aerospace Methods of Geographical Research: Textbook for the Students of Higher Educational Establishments [Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy: Uchebnik dlya studentov uchrezhdeniy vysshego professionalnogo obrazovaniya], RF, Moscow, Publ. Centre "Akademiya", 2004, 336 pp. (in Russian).
3. **V.P. Glushkov**
Development of Rocketry and Astronautics in the USSR [Razvitie raketostroeniya i kosmonavтики v SSSR], USSR, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 208 pp. (in Russian).
4. **W.G. Rees**
Physical Principles of Remote Sensing, USA, NY, New York, Cambridge University Press, 2001, 343 pp.
5. **M.V. Gashnikov, N.I. Glumov, E.V. Goshin, A.Yu. Denisova, A.V. Kuznetsov, V.A. Mitekin, V.V. Myasnikov, V.V. Sergeev, V.A. Soifer, V.A. Fedoseev, V.A. Fursov, M.A. Chicheva, P.Yu. Yakimov**
Perspective Information Technologies of the Earth Remote Sensing: Monograph [Perspektivnye informatsionnye tehnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemly], Ed. V.A. Soifer, RF, Samara, Novaya Tekhnika Publ., 2015, 237 pp. (in Russian).
6. *Russian Space Systems. Orbital Satellite Constellation KA DZZ [Rossiyskie kosmicheskie sistemy. Orbitalnaya gruppировka KA DZZ]*. (<http://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/orbitalnaya-gruppировka-ka-dzz/>) (in Russian).
7. **I. Moskalenko**
ArcReview, 2005, №3(34). (https://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1742&SECTION_ID=47) (in Russian).
8. **B.A. Dvorkin, M.A. Elerdova**
Geomatics [Geomatika], 2010, №3, 19 (in Russian).
9. **A.V. Chernov**
Earth from Space: the Most Effective Solutions [Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya], 2010, №7, 19 (in Russian).
10. **A.V. Chernov**
Territory Development Management [Upravlenie razvitiem territorii], 2013, №4, 52 (in Russian).
11. **N.S. Vorobiova, V.V. Sergeev, A.V. Chernov**
CO, 2016, 40(6), 929 (in Russian). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-929-938.
12. **A.N. Kirillin, G.P. Anshakov, R.N. Akhmetov, D.A. Storozh**
Spacecraft Constructing: Scientific and Technical Research and Practical Developments of the JSC SRC "Progress" [Kosmicheskoe apparatostroenie: Nauchno-tekhnicheskie issledovaniya i prakticheskie razrabotki GNPRTs "TsSKB-Progress"], Ed. A.N. Kirilin, RF, Samara, "AGNI" Publ. House, 2011, 280 pp. (in Russian).

Становление отечественного космического материаловедения*

Е.Н. Каблов

На основе документов, научных отчетов и публикаций, посвященных становлению в СССР ракетно-космической отрасли, восстановлена история возникновения космического материаловедения. Представленные материалы охватывают основные события, связанные с периодом освоения космического пространства, до середины 60-х годов прошлого века. Установлен вклад Всесоюзного научно-исследовательского института авиационных материалов в обеспечение лидирующего положения нашей страны в космической области. Приводятся направления научных исследований для создания материалов и технологий, применяемых в космических проектах С.П. Королева.

Ключевые слова: космическое материаловедение, теплозащита, пенокерамика, РД-107, Восток-1, спутник.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-12154).

Освоение космического пространства стало переломным моментом всего XX в. и явилось катализатором идей в современной науке и технике, оказав огромное влияние на развитие таких областей промышленности, как информационно-коммуникационные технологии и микроэлектроника, химическое машиностроение, материаловедение.

Ведущую роль в этом сыграла отечественная школа ракетостроения, начиная с пионеров мировой космонавтики: К.Э. Циолковского (1857–1935), который еще в 1883 г. написал монографию «Свободное пространство», в которой впервые дал принципиальную силовую схему реактивного корабля и общее описание его устройства и пришел к выводу о необходимости использования «ракетных поездов» – прототипов многоступенчатых ракет, а в 1903 г. спроектировал ракету для межпланетных путешествий; Ф.А. Цандера (1887–1933) – создателя первой советской ракеты на жид-

ком топливе ГИРД-Х и, конечно же, С.П. Королева (1907–1966) – создателя первой в мире межконтинентальной баллистической ракеты Р-7, ставшей первым носителем искусственных спутников Земли и автоматических межпланетных станций.

Для реализации таких масштабных задач потребовалось создать широкую кооперацию сотен научно-исследовательских институтов и предприятий. На освоение космоса работали лучшие специалисты из десятков отраслей, в том числе и сотрудники Всесоюзного (ныне Всероссийского) научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ). Созданные ими материалы и технологии сыграли ведущую роль в разработке космических проектов.

Материаловедение было названо важнейшим приоритетом в постановлении Совета Министров СССР № 1017-419 («особая папка») от 13 мая 1946 г. «Вопросы реактивного вооружения»: «...определить как первоочередную задачу – воспроизведение с применением отечественных материалов ракет типа ФАУ-2 (дальнебойной управляемой ракеты) и Васерфаль (зенитной управляемой ракеты)».

9 августа 1946 г. С.П. Королев был назначен главным конструктором «Изделия № 1» (приказ № 83-К) – баллистической ракеты на основе немецкой ракеты V-2 (А-4), отдельные части которой и техническая документация были переданы совет-



КАБЛОВ Евгений Николаевич

академик, профессор,
генеральный директор
Всероссийского научно-исследовательского института
авиационных материалов

ским специалистам Красной Армией при наступлении в Германии в 1945 г., и уже 18 октября того же года был проведен первый пуск воссозданной ракеты (Изделие «Н»).

Одновременно, с целью отказа от трофейных комплектующих С.П. Королев начинает разрабатывать собственную ракету малой дальности Р-1 (8А11, объект «Волга») – аналог немецкой ракеты V-2, но с использованием отечественных материалов, так как в это время в СССР не было 35% требуемых марок сплавов и 50% необходимых неметаллических материалов, используемых в немецкой ракете [1]. Поэтому материаловедческие задачи оказались крайне сложными и требующими проведения значительного объема научных исследований – необходимо было разработать новые материалы или подобрать отечественные аналоги сталей, цветных металлов и неметаллических материалов.

При подготовке советскими специалистами ракеты V-2 к летным испытаниям наблюдались многочисленные случаи негерметичности и отказов из-за низкого качества оригинальных немецких материалов и покрытий ввиду того, что в Германии ракета V-2 создавалась в условиях жесткого лимита времени и нехватки дефицитных материалов, в первую очередь резинотехнических, а также цветных металлов и легирующих элементов для сталей. Дополнительно при разработке ракеты Р-1 было необходимо решить проблему обеспечения длительной сохранности ее конструкции, которая заключалась не только в создании надежных защитных покрытий, но и в принципиально новом подходе к выбору неметаллических материалов с высоким ресурсом работоспособности, разработке методов защиты металлических конструкций от коррозии и исследований коррозионной стойкости конструкции [2].

Постановлением Государственного комитета обороны о мероприятиях по изучению и освоению немецкой реактивной техники от 13 сентября 1946 г. ВИАМ предписывалось «...обеспечить изучение физико-математических свойств материалов, применявшихся в немецких авиационных газотурбинных и жидкостных реактивных двигателях, а также реактивных самолетах».

Институт приступил к выполнению работ по тематике ракеты Р-1 в октябре 1946 г., используя экспериментально-технологическую базу – «Опытный завод ВИАМ», переданную в подчинение ВИАМ приказами МАП № 189 от 03.04.1946 г. и № 541 от 13.08.1946 г.

В результате работ, проведенных в ВИАМ, 86 марок немецких сталей, использовавшихся в ракете

V-2, были заменены на 32 марки отечественных сталей, 59 марок цветных металлов – на 21 марку отечественных сплавов, а 87 марок неметаллических материалов – на 48 отечественных марок-заменителей, что положительно сказалось на технологичности и надежности всего изделия.

Главный конструктор ракетных двигателей В.П. Глушко дал высокую оценку работам ученых ВИАМ по замене немецких материалов на отечественные в жидкостном ракетном двигателе (ЖРД) РД-100 в докладной записке от 28.03.1947 г. Председателю специального комитета по реактивной технике при Совете Министров (СМ) СССР Г.М. Маленкову: «...Для подбора заменителей всех немецких металлов была проведена и ныне продолжается исследовательская работа в лабораториях ОКБ-456 завода № 456, ВИАМ и др. организациях по сравнительному испытанию немецких марок и их отечественных заменителей на коррозию в агрессивных средах, по определению химического состава, механических свойств при нормальной и высокой температуре.

5. В итоге подобраны заменители всем немецким металлам...».

В докладной записке В.П. Глушко также отметил недостаточную противокоррозионную защиту элементов конструкции ракеты V-2: «...немецкие детали и агрегаты, из которых собираются двигатели 10 шт. изготовлены более 2-х лет назад, в настоящее время начали корродировать, а поэтому срок использования двигателей, собранных из этих деталей и узлов, должен быть ограничен 3–4 месяцами» [3].

Накопленный в институте опыт по изучению коррозии и разработке антикоррозионной защиты (Г.В. Акимов, Р.С. Амбарцумян, В.П. Батраков, В.О. Крениг) позволил в кратчайшие сроки решить проблемы с защитой металлических конструкций от коррозии и увели-

чить срок эксплуатации двигателей до 10 лет.

Постановлением Совета Министров СССР от 25.11.1950 г. ракета Р-1 была принята на вооружение Советской Армии, а в 1952 г. запущена в производство.

Не менее сложные задачи институт решал при создании С.П. Королевым ракеты Р-5 (индекс ГРАУ-8А62) с дальностью стрельбы 1200 км, модификация которой Р-5М (индекс ГРАУ-8К51) положила начало созданию ракетно-ядерного щита СССР. Был решен комплекс материаловедческих задач:

- разработана технология изготовления несущих тонкостенных баков из алюминиевых сплавов типа АМг3 и АМг5 с использованием автоматической сварки;

- применен алюминиевый сплав Д-16 в конструкции хвостового отсека взамен применявшейся ранее стали;

- применена защита стыков стабилизатора теплостойким покрытием для предохранения стального корпуса от потери прочности и разрушения при входе в плотные слои атмосферы.

Всего было выпущено 48 ракет Р-5, которые в течение восьми лет (с 1959 по 1966 г.) «стояли» на боевом дежурстве.

Постановлением Совета Министров СССР № 149-88 от 30 января 1956 г. «О создании объекта «Д» ВИАМ был утвержден головной организацией в части «...изыскания конструкционных материалов, обладающих высокими механическими характеристиками при температурах до 1000–2000 °С» как имеющий научно-технический задел по этому направлению.

В результате непосредственного участия в создании первого искусственного спутника Земли Простейший Спутник-1 (ПС-1) институтом был разработан алюминиевый сплав АМг6 (Н.Б. Кондратьева, А.А. Постнова, С.П. Кузмина и др.) для изготовления корпуса из двух полусфер

диаметром 58 см со стыковочными шпангоутами, соединенными между собой 36 болтами [4].

С целью внедрения материалов и технологий, разработанных институтом для носителя «объекта Д» – ракеты Р-7 (изделие 8К71), серийное производство которого с 1958 г. было развернуто в г. Куйбышеве (ныне г. Самара), Постановлением Совета Министров СССР от 19 декабря 1958 г. был образован Куйбышевский филиал ВИАМ.

Основными направлениями работ филиала были определены:

- совершенствование новых технологических процессов в металлургии совместно с предприятиями Куйбышевского узла;

- изучение и создание новых алюминиевых сплавов на основе вторичного алюминия;

- улучшение качества продукции различных материалов и техники;

- оказание технической помощи предприятиям по освоению новых материалов для производства изделий новой техники.

Лаборатории филиала ВИАМ были размещены непосредственно на территориях заводов г. Куйбышева [5].

На Куйбышевском металлургическом заводе сотрудниками института изучалось влияние технологических факторов металлургического производства на коррозионную стойкость полуфабрикатов из алюминиевых сплавов типа АМг, В-92, В-93. Были определены оптимальные режимы закалки и старения полуфабрикатов из сплавов, проводились работы по определению природы и причин появления ряда дефектов в полуфабрикатах из алюминиевых сплавов при механических, термических и химических операциях. Для завода «Прогресс» были разработаны способы предотвращения появления точечной и щелевой коррозии на деталях из алюминиевых сплавов [6].

Были решены такие технические проблемы, как нанесение антифрикционного покрытия на титановые сплавы для получения заданного коэффициента трения; бездодочная штамповка с повышенным удельным давлением; изготовление полусфер из стали 12Х18Н10Т толщиной 0.1–0.3 мм методом реверсивной вытяжки с минимальным утонением стенки; для космических аппаратов разработана и освоена технология нанесения специальных гальванических и лакокрасочных покрытий с заданными оптическими свойствами; освоены новые виды полуфабрикатов из металлических материалов, в первую очередь из алюминиевых сплавов – впервые изготовлены баки диаметром 2.95 м из сплава АМг6, освоена штамповка днищ (20 шт. на один комплект), применены высокотемпературная ваку-

умная пайка камер сгорания рулевых двигателей, точечная и аргоно-дуговая сварка.

Сотрудники ВИАМ принимали активное участие в создании и производстве новых двигателей главного конструктора В.П. Глушко для ракеты Р-7 – РД-107 (8Д74) первой ступени и РД-108 (8Д75) второй ступени. Для конструкции этих ЖРД был разработан широкий спектр материалов, в первую очередь тугоплавких и теплоизолирующих, а также изготовлен опытный образец камеры сгорания из титановых сплавов ВТ1 и ОТ4, впоследствии примененной в ЖРД РД-119. С этих двигателей началось опытное применение титановых сплавов, разработанных в ВИАМ, в конструкциях двигателей ракетносителей. Из титанового сплава ОТ4 в двигателе РД-108 выполнены сопловые насадки в камере сгорания, а гофрированные проставки из сплава ВТ1 использовались в рулевых и корректирующих двигателях [7].

В предельно сжатые сроки в ВИАМ была создана аустенито-мартенситная сталь марки ЭИ654, легированная кремнием, которая успешно применяется и до настоящего времени для изготовления топливных баков, заправляемых агрессивным окислителем. Из этой стали для двигателя РД-107 были изготовлены среднее и наружное днища, патрубки, фланцы, силовые кольца, перегородки.

Следует отметить, что в дальнейшем только для жидкостных ракетных двигателей РД-170 и РД-180 в ВИАМ разработано 17 марок специальных высокопрочных и коррозионностойких сталей.

В ВИАМ и других институтах решался ряд задач, связанных в первую очередь с разработкой теплозащиты для сохранения прочностных свойств конструкционных материалов при тепловом воздействии [8]. Были созданы и внедрены эрозионностойкие теплозащитные материалы типа «ЭКС», «ПКМ» и «АТМ» для защиты металлических конструкций от воздействия скоростного теплового потока с температурой до 3000 °С, используемые в хвостовых отсеках при тепловом воздействии работающих двигателей и в головной части, которая должна была совершать вход в плотные слои атмосферы с гиперзвуковыми скоростями, с кратковременным нагревом до 3000 °С. Данные материалы с запасом перекрывали диапазон температур, указанный в Постановлении СМ СССР № 149-88.

Первоначально проблеме теплозащиты хвостовых отсеков не было уделено должного внимания, в результате чего во время огневых стендовых испытаний прототипа обшивка из алюминиевого сплава хвостовой конструкции прогорала, и специалистам ОКБ-1 приходилось обшивать снаружи хвостовые отсеки тонкими листами хромированной стали,

а внутри применять асбестовую защиту для уязвимых деталей [9].

Программа подготовки пилотируемых космических полетов поставила перед специалистами ВИАМ более масштабные задачи. Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР № 569-264 от 22 мая 1959 г. «Об объекте «Восток» на ВИАМ возлагалось «...создание жаропрочных материалов и теплозащитных покрытий», а в кооперации с Научно-исследовательским институтом полимерных материалов (НИИПМ) и Всесоюзным научно-исследовательским институтом синтетического волокна (ВНИИСВ) Госкомитета СМ СССР по химии – работы «...в части разработки и создания теплоизоляционных материалов малого объемного веса» [10]. В короткий срок в ВИАМ были разработаны теплоизоляционные материалы, которые обеспечили безопасный спуск человека с орбиты в условиях сильного аэродинамического нагрева и создана экранно-вакуумная теплоизоляция для спускаемого аппарата корабля «Восток» и всех последующих космических аппаратов.

Была разработана схема теплозащиты, ставшая впоследствии классической, – комбинация абляционной защиты и сотовой изоляции для предотвращения прогрева конструкции. В составе теплозащитной конструкции (рис. 1) впервые были использованы разработанные в ВИАМ соты на основе стеклоткани, пропитанной полимерными связующими (М.С. Горячев, О.К. Белый и др.).

По воспоминаниям разработчиков ракетно-космической техники, защита головной части от тепловой нагрузки считалась тогда проблемой № 1, так как опробованных материалов, обеспечивавших тепловую защиту головной части при скоростях движения в атмосфере, близких к первой космической, в то время не существовало. Об этом свидетельствуют и неоднократные визиты Д.Ф. Устинова (секрета-

ря ЦК КПСС, куратора ракетной и оборонной техники) в цех нанесения покрытий.

Широкая номенклатура металлических материалов, разработанных и испытанных на воздействие факторов космического пространства, позволила снизить массу силовой конструкции космического корабля «Восток-1», которая составила всего 20% от общей массы корабля, приблизительно столько же, сколько и теплозащита (17.7%):

- алюминиевый сплав АМг6 (лист толщиной 3 мм) – в герметичном корпусе спускаемого аппарата и приборном отсеке;

- алюминиевые сплавы АМг2 и АМг3 – в трубопроводах;

- алюминиевые сплавы Д16, Д19, АК6, АК8 – в силовых деталях;

- магниевый сплав МА8 – в приборной раме приборного отсека (профили, трубы, фитинги);

- стали марок 12Х18Н10Т, 07Х16Н6, Ст. 20, Ст. 45 – для крепежа и силовых деталей;

- титановые сплавы ВТ6 и ВТ14 – в шаровых баллонах высокого давления.

Эксплуатационная надежность примененных в конструкции этого корабля материалов внесла весомый вклад в успешный полет космического корабля «Восток-1» 12 апреля 1961 г. с первым космонавтом Ю.А. Гагариным на борту.

Космонавтика еще раз убедительно доказала, что только применение новых материалов может обеспечить новое качество летательного аппарата и каждый наш шаг в освоении космоса подтверждает этот принцип. Реализация этого принципа возможна только при объединении науки и производства по комплексному решению научных и технических задач.

В созданном в 1959 г. Межведомственном научно-техническом совете по космическим исследованиям секцию по космическому материаловедению возглавил начальник ВИАМ А.Т. Туманов, а институт



Рис. 1. Теплозащита космического корабля «Восток-1» в разрезе.

Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР был определен головной организацией по освоению космического пространства в части «...решения научных проблем, связанных с вопросами газодинамики высоких скоростей, теплообмену, прочности и созданию специальных двигателей искусственных спутников Земли и космических ракет».

В 1962 г. в ВИАМ был разработан перспективный проблемный план и программа исследования металлических материалов для космических аппаратов, в соответствии с которыми впервые в отечественном материаловедении проводились исследования процесса испарения и свойств конструкционных материалов в глубоком вакууме и при низких температурах, изучалось влияние космического облучения на свойства конструкционных материалов. Кроме того, объектами исследования являлись специальные неметаллические материалы: лакокрасочные покрытия, полимерные пленки, резины и клеи [11].

Уже к 1968 г. в ВИАМ было разработано более 20 марок новых материалов и покрытий для применения в космических аппаратах, среди которых высокопрочные стали; бериллиевые, магниевые, алюминиевые и молибденовые сплавы; высокопрочные стеклопластики и теплостойкие стеклотекстолиты, терморегулирующие покрытия, клеи и герметики [12]. При этом служебные характеристики высокотемпературных материалов и систем теплозащиты соответствовали мировому уровню или превышали его. В целом, за период с 1958 по 1978 г. в ВИАМ были выполнены 122 научно-исследовательские работы по созданию материалов и разработке новых технологических процессов для космической техники.

Безусловно, значительная роль в освоении разработанных в ВИАМ материалов принадлежит отделу материаловедения НИИ-88, созданному в 1947 г. на базе центральной лаборатории завода № 88 для решения материаловедческих задач в области отечественного ракетостроения. Впоследствии отдел был преобразован в отделение материаловедения НИИ-88 (ЦНИИМаш) и только в 1975 г. стал самостоятельной организацией – Центральным научно-исследовательским институтом материаловедения (ЦНИИМВ), из которого в 1986 г. было образовано НПО «Композит» (с июля 1993 г. Открытое акционерное общество). В состав НПО «Композит» входили: завод «Орбита» (г. Сыктывкар), Уральский филиал (г. Пермь; с 1988 г. Уральский НИИ композиционных материалов). Сотрудники ВИАМ принимали самое активное участие в разработке материалов для воздушно-космических самолетов разработки П.В. Цыбина (заместителя С.П. Королева) – «проект ПКА» и «Проект 48».

Наиболее сложные проблемы, возникшие при разработке эскизного проекта, были связаны с теплозащитой – расчет по определению температуры при аэродинамическом нагреве при входе в плотные слои атмосферы показал, что нижняя поверхность крыла будет нагреваться до 1500 °С, при этом абляционная теплозащита, примененная на спуска-



Рис. 2. Опытные образцы отформованной теплоизоляции с покрытием, предназначенные для испытаний при температурах 1500–2200 °С.

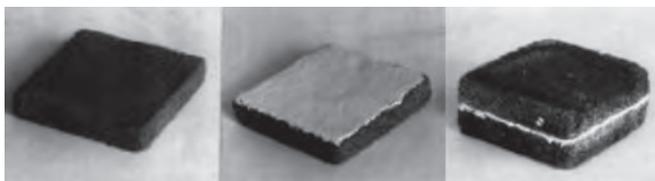


Рис. 3. Образцы из пористого карбида кремния.

емом корабле «Восток», была неприемлема. Поэтому впервые в мире принято техническое решение по применению для этих проектов плиточного покрытия, концепция которого потом была использована при проектировании орбитальных кораблей «Space Shuttle» (США) и «Буран» (СССР) [13].

Таким образом, ВИАМ стал единственной научной организацией в СССР, взявшей за разработку подобной теплозащиты из пенокерамики, позволявшей выдерживать тепловую нагрузку до 1500 °С, а также изготовить опытные образцы отформованной теплоизоляции с покрытием (рис. 2), предназначенные для испытаний при температурах 1500–2200 °С, и образцы из пористого карбида кремния (рис. 3) [14, 15].

После передачи в конце 1964 г. работ П.В. Цыбина по проекту ПКА в ОКБ А.И. Микояна началась разработка темы под шифром «Спираль».

Следует отметить проведенные в институте прикладные исследования по обеспечению жизнедеятельности космонавтов на орбите. По техническому заданию НПП «Звезда» в ВИАМ разработаны материалы для космических скафандров – органический триплекс с электрообогреваемым элементом для смотровых стекол герметичных шлемов пилотов и космонавтов, уникальные светофильтры гермошлемов, эффективность которых подтверждена при выходе 18 марта 1965 г. в открытый космос космонавта А.А. Леонова.

В 1966 г. не стало Сергея Павловича Королева, но космическая программа СССР, в которой ВИАМ был головной организацией по космическому материаловедению, продолжалась: были созданы и выведены на орбиту космические станции «Салют», «Алмаз» и «Мир»; отправлены в космический полет межпланетные автоматические станции серий «Венера», «Вега», «Луна», «Марс»;

to securing the leading position of our country in the field of space exploration is established. The research areas targeted at creating new materials and technologies, which were used by S.P. Korolev in his pioneering space projects, are presented.

Keywords: space materials science, thermal insulation, ceramic foam, RD-107, Vostok-1, satellite

*The work was financially supported by RFBR (project 13-08-12154).

Images & Tables

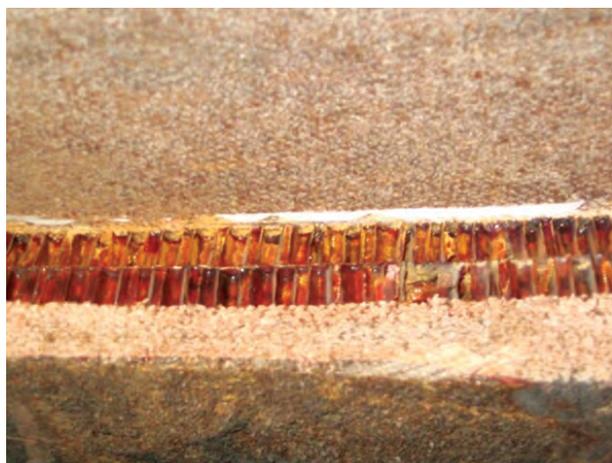


Fig. 1. Cross-section view of the spacecraft "Vostok-1" thermal protection.



Fig. 2. Test samples of molded insulation with a coating, which are intended to be tested at temperatures of 1500–2200 °C.



Fig. 3. Samples of porous silicon carbide.

References

1. *Missile Systems of the Strategic Missiles Troops. From R-1 to "Topol-M". 1946–2006: the Compendium of Materials on the Missile Development in the Soviet Union and the Russian Federation*, [Raketnye sistemy RVSN. Ot R-1 – k "Topoliu-M". 1946–2006 gg.: Sbornik materialov o razvitii raketnogo oruzhiya v SSSR i RF], Draft. G.I. Smirnov, RF, Smolensk, Print-Express Ltd. Publ., 2006, 455 pp. (in Russian).
2. **V.E. Gudilin, L.I. Slabkiy** *Missile and space systems (History. Development. Prospects)*, [Raketno-kosmicheskie sistemy (Istoriya. Razvitie. Perspektivy)], Moscow, 1996, 326 pp. (<http://www.buran.ru/htm/gudilin2.htm>) (in Russian).
3. **Academician V.P. Glushko Selected Works, [Izbrannye raboty akademika V.P. Glushko], RF, Khimki, JSC "Academician V.P. Glushko NPO Energomash", 2008. (<http://epizodspace.no-ip.org/bibl/glushko/izbran-rab-glushko/1/01.html>) (in Russian).**
4. **I.M. Demonis, A.P. Petrova** *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik [J. All materials. Encyclopedic Guide]*, 2011, №6, 2 (in Russian).
5. Branch of Russian State Archive of Scientific and Technical Documentation, F. R-77, Op. 3-6, D. 82, L. 6 (in Russian).
6. **N.F. Bannikova** *Sci. J. "Proceedings of the Samara Scientific Center of the RAS" [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN]*, 2006, 8(3), 815 (in Russian).
7. **N.N. Litvinov** *VSMPO–AVISMA Bulletin [Vestnik VSMPO–AVISMA]*, Mar. – Apr. 2006 (in Russian).
8. **A.N. Kirilin, R.N. Akhmetov, S.V. Tiulevin, S.I. Tkachenko, A.D. Storozh, V.A. Kapitonov, G.E. Fomin, V.N. Novikov, S.V. Semenov** *The Samara Stages of Space Launch Vehicle "Semerka" [Samarskie stupeni "Semerki"]*, Ed. A.N. Kirilin, RF, Samara, Agni Publ., 2011, 256 pp. (in Russian).
9. **B.E. Chertok** *Spacecrafts and People in 4 Vols, Vol. 2: Spacecrafts and People: Fili – Podlipki – Tyuratam [Rakety i liudi v 4 tomakh, T. 2 Rakety i liudi: Fili – Podlipki – Tyuratam]*, RF, Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1999, 448 pp. (in Russian).
10. *The Plan for Design, Research and Development Works on the Creation of the "Vostok" Facility*, [Plan proektnykh, opytno-konstruktorckikh i nauchno-issledovatel'skikh rabot po sozdaniyu obekta "Vostok"], an Annex to the Resolution of the CPSU Central Committee and the Council of Ministers of the USSR of May 22, 1959, No. 569-264 "On the Preparation of Man for Spaceflight", AP RF, F. 3, Op. 47, D. 275, L. 6-34 (in Russian).
11. **N.F. Bannikova** *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, [Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta], 2013, №2(40), 225 (in Russian). DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-2(40)-225-234.

12. *Research Report, [Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote]*, Branch of Russian State Archive of Scientific and Technical Documentation, F. R-124, Op. 1-6, D. 1812, L. 1-5 (in Russian).
13. **N.V. Yakubovich, V.N. Lavrov**
V.M. Myasishchev's Aircrafts [Samolety V.M. Miasishcheva], RF, Moscow, Rusavia Publ., 1999, 152 pp. (in Russian).
14. *Thermal-Insulation Materials Development for Aircraft and Spacecraft Technology. Research Report, [Razrabotka teploizolyatsionnykh materialov dlya samoletnoy i raketnoy tekhniki. Otchet po NIR]*, Branch of Russian State Archive of Scientific and Technical Documentation, Op. 2-1, D. 1650, L. 70 (in Russian).
15. *Foam Development for Aircraft and Spacecraft Technology. Research Report, [Razrabotka penomaterialov dlya samoletnoy i raketnoy tekhniki. Otchet po NIR]*, Branch of Russian State Archive of Scientific and Technical Documentation, Op. 2-1, D. 1918, L. 41 (in Russian).
16. **I.A. Maiorova, P.V. Prosumtsov, A.V. Zuev**
J. Eng. Phys. Thermophys., 2016, **89**(2), 528.
17. **T.G. Pavlovskaya, E.A. Deshevaya, S.N. Zaytsev, I.A. Kozlov, I.A. Volkov, K.E. Zakharov**
Electronic scientific journal "Proceedings of VIAM" [Trudy VIAM], 2016, №3(39), 85 (in Russian).
DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-11-11.
18. **G.G. Klochkov, Y.Y. Klochkova, V.A. Romanenko**
Electronic scientific journal "Proceedings of VIAM" [Trudy VIAM], 2015, №4, 1 (in Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-1-1.
19. **I.S. Deev, E.F. Nikishin, E.V. Kurshev, S.L. Lonsky**
Voprosy Materialovedeniya [Scientific and technical journal "Problems of materials science"], 2015, №2(82), 65 (in Russian).
20. **E.N. Kablov**
Aviation materials and technologies [Aviatsionnye materialy i tehnologii], 2015, №1(34), 3 (in Russian).
DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

**«ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО ФОНДА
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»**
№ 3 (95) июль–сентябрь 2017 года
(Приложение к «Информационному бюллетеню РФФИ» № 25)

Подписано в печать 02.11.2017. Тираж 300 экз.

Оригинал-макет ООО «Эко-Вектор»
191186, Санкт-Петербург, Аптекарский пер., д. 3, литера А, помещение 1Н
Тел.: (812) 648-83-66, e-mail: info@eco-vector.com

Печать ООО «РЕАРТ»
125413, г. Москва,
ул. Солнечногорская, д. 22, корп. 2