# КОСМИЧЕСКАЯ 1(8) ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ 2015

Научно-технический журнал

Журнал выходит ежеквартально

Главный редактор

академик РАН Легостаев В.П.

Выпускается с 2013 г.

Заместители главного редактора академик РАН Микрин Е.А., дтн, профессор Синявский В.В.

Редакционная коллегия

Дфмн Алексеев А.К., член-корр. РАН Алифанов О.М., академик РАН Анфимов Н.А., дтн, профессор Беляев М.Ю., дтн, профессор Борзых С.В., академик РАН Зеленый Л.М., дтн Зубов Н.Е., академик РАН Коротеев А.А., член-корр. РАН Кудрявцев Н.Н., дтн Любинский В.Е., дтн Михайлов М.В., дмн Мухамедиева Л.Н., академик РАН Попов Г.А., дтн Платонов В.Н., академик РАН Пешехонов В.Г., дтн, профессор Рачук В.С., дтн, профессор Салмин В.В., дтн, профессор Сапожников С.Б., дтн, профессор Соколов Б.А., член-корр. РАН Соловьев В.А., дтн Сорокин И.В., дтн Улыбышев Ю.П., академик РАН Федоров И.Б., дтн, профессор Филин В.М., дтн, профессор Чванов В.К., дтн, профессор Ярыгин В.И.

## содержание

## СТРАТЕГИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

## СОЗДАНИЕ, ЦЕЛЕВОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ АППАРАТОВ И КОМПЛЕКСОВ

## СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ АВТОМАТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

## МАТЕРИАЛЫ, ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

## СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ. ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КОСМОНАВТОВ

#### <u>Учредитель</u>

ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва» Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связей и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ №ФС 77-53991 от 8 мая 2013 г. © ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва»

Электронную версию журнала «Космическая техника и технологии» можно найти на сайте http://www.energia.ru/ktt/index.html.

Журнал «Космическая техника и технологии» включен в РИНЦ согласно договору с НЭБ № 315-05/2014 от 20.05.2014 г.

#### Журнал является рецензируемым изданием

• мнение редакции не всегда совпадает

с точкой зрения авторов статей • журнал не содержит рекламы

• журнал не собержит рекламы

рукописи не возвращаются

 при перепечатке материалов ссылка на журнал «КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» обязательна

• плата с аспирантов за публикацию статей не взимается

# SPACE ENGINEERING1(8)AND TECHNOLOGY2015

Scientific and Technical Journal

Editor-in-chief RAS academician Legostaev V.P. Deputy Editors-in-chief RAS academician Mikrin E.A., Dr.Sci.(Eng.), Professor Sinyavskiy V.V.

**Editorial Advisory Board** 

Dr.Sci.(Phys.-Math.) Alekseev A.K., RAS Corr. member Alifanov O.M., RAS academician Anfimov N.A., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Belyaev M.Yu., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Borzykh S.V., RAS academician Zeleny L.M., Dr.Sci.(Eng.) Zubov N.Ye., RAS academician Koroteev A.A., RAS Corr. member Kudryavtsev N.N., Dr.Sci.(Eng.) Lyubinskiy V.E., Dr.Sci.(Eng.) Mikhaylov M.V., Dr.Sci.(Med.) Mukhamedieva L.N., RAS academician Popov G.A., Dr.Sci.(Eng.) Platonov V.N., RAS academician Peshekhonov V.G., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Rachuk V.S., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Salmin V.V., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Sapozhnikov S.B., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Sokolov B.A., RAS Corr. member Soloviev V.A., Dr.Sci.(Eng.) Sorokin I.V., Dr.Sci.(Eng.) Ulybyshev Yu.P., RAS academician Fedorov I.B., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Filin V.M., Dr.Sci.(Eng.), Prof.Chvanov V.K., Dr.Sci.(Eng.), Prof. Yarygin V.I.

## CONTENTS

## STRATEGY AND PROSPECT FOR SPACE ENGINEERING AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT

## DEVELOPMENT, UTILIZATION AND OPERATION OF MANNED SPACECRAFT AND COMPLEXES

Tsygankov O.S., Grebennikova T.V., Deshevaya E.A., Lapshin V.B., Morozova M.A., Novikova N.D., Polikarpov N.A., Syroeshkin A.V., Shubralova E.V., Shuvalov V.A. Study of the environment finely dispersed on the outer surface of the International Space Station and detection of microbiological objects in space experiment «Test» ....... 31

## DEVELOPMENT AND OPERATION OF UNMANNED SPACECRAFT, COMPLEXES AND SYSTEMS

## MATERIALS, MANUFACTURING AND PROCESSES FOR ROCKET AND SPACE PRODUCTS

#### THERMAL CONTROL AND LIFE SUPPORT SYSTEMS. VITAL FANCTIONS OF COSMONAUTS

 

 Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Romanov S.Yu., Telegin A.A., Yurgin A.V. Selecting life support system for the crews of long duration space stations
 67

 Bronnikov S.V. Developing requirements for space station crew training
 81

#### <u>Founder</u>

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia The journal is registered with the Russian Federal Surveillance Service for Mass Media and Communications. Certificate ПИ №ФС 77-53991 dated May 8, 2013. © S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia

The Space Engineering and Technologies journal is included in the Russian Science Citation Index in accordance with the contract with NEB (Scientific Electronic Library) No. 315-05/2014 dated May 20, 2014.

The electronic version of our journal Space Engineering and Technology can be found at http://www.energia.ru/ktt/index.html.

#### The journal is a peer-reviewed publication

• the editorial opinion does not always coincide with the viewpoints of the contributors

the journal does not contain any advertising
manuscripts are not returned

• no material can be reprinted without a reference to the SPACE ENGINEERING AND TECHNOLOGY journal

• postgraduate students are not charged for the publication of their papers УДК 629.786.2.004.3-182.3:612+629.78.047.8

## ПЯТИДЕСЯТИЛЕТИЕ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

© 2015 г. Цыганков О.С.

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

Статья посвящена 50-летию первого выхода человека в открытое космическое пространство, который был осуществлен Алексеем Леоновым 18 марта 1965 г. из космического корабля «Восход-2». Рассматриваются сущностные научно-технические и гуманитарно-философские аспекты феномена внекорабельной деятельности. В кратком изложении представлены структура и функции, направления научной, конструкторской и экспериментальной поддержки внекорабельной деятельности, современное состояние защитного снаряжения — скафандра, средств фиксации в невесомости и адаптированных инструментов. Освещена роль и функции Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва в становлении и развитии средств и методов обеспечения производительного труда экипажа за бортом орбитальной станции. Акцентируется внимание на индивидуальной деятельности человека в открытом космосе как субъекта-исполнителя космической деятельности человечества. Предпринята попытка наметить вектор оптимизации внекорабельной деятельности, направленный к концу XXI столетия.

**Ключевые слова:** внекорабельная деятельность, скафандр, защитное снаряжение, невесомость, средства фиксации, адаптированные инструменты, экспериментальная отработка, космонавт, субъект космической деятельности.

## **50 YEARS OF EXTRAVEHICULAR ACTIVITY**

Tsygankov O.S.

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

The article is dedicated to the 50th anniversary of the first human egress into space, which was implemented by Alexey Leonov on March 18, 1965 from spacecraft Voskhod-2. Consideration is given to essential scientific and technical, humanitarian and philosophical aspects of the phenomenon of extravehicular activity. The paper summaries a structure and functions, areas of scientific, engineering and experimental support of the extravehicular activity, current state of protective equipment, i.e. spacesuit, restraint aids for weightlessness and adaptive tools. The role and functions of S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia in generation and development of measures and methods ensuring a productive work for the crew outside the orbital station are highlighted. An individual human activity in outer space executed as a mankind space activity is emphasized. An attempt is made to identify an optimization vector of extravehicular activity directed to the end of the twenty-first century.

Key words: extravehicular activity, spacesuit, protective equipment, weightlessness, restraint aids, adaptive tools, development tests, cosmonaut, subject of space activity.



ЦЫГАНКОВ О.С.

ЦЫГАНКОВ Олег Семенович — доктор технических наук, главный научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: oleg.tsygankov@rsce.ru TSYGANKOV Oleg Semyonovich — Doctor of Science (Engineering), Chief Research Scientist at RSC Energia, e-mail: oleg.tsygankov@rsce.ru

## Обоснование и сущность внекорабельной деятельности

С начала XXI века исследование объектов Солнечной системы в интересах их вовлечения в научный и хозяйственный оборот Земли декларируется научным сообществом как преобладающий тренд развития космической деятельности. Стремление человечества быть вписанным в структуру Вселенной, несомненно, не могло обойтись без осуществления выхода *Homo sapiens* в открытое космическое пространство. В научно-технической и гуманитарно-философской литературе этой проблеме всегда сопутствовал вопрос о целесообразности и необходимости деятельности индивида непосредственно вне корабля или станции.

Организм человека, как и всех живых земных существ, формировался и развивался в гравитационных, температурных и атмосферных условиях планеты Земля. И вот человек попадает в ситуацию, остроконфликтную по отношению к условиям его зарождения и существования. Нужно ли человеку стремиться в открытый космос? Подводит ли к этому логика освоения космоса, логика развития человеческой цивилизации?

Еще в 1896 г. К.Э. Циолковский, с присущей ему мощью ума и интуиции, в работе «Вне Земли» предугадал и описал выход из «ракеты» и работу в открытом космическом пространстве со всеми атрибутами: скафандрами, шлюзовой камерой, привязями, инструментами и т. п. [1].

Дальновидный и прогностический ответ на вопрос о необходимости деятельности в открытом космосе был дан академиком С.П. Королёвым в марте 1965 г. в беседе с корреспондентами, посвященной полету космического корабля «Восход-2»: «...летая в космосе, нельзя не выходить в космос, как, плавая, скажем в океане, нельзя бояться упасть за борт и не учиться плавать. Это связано с целым рядом операций, которые могут потребоваться при встрече кораблей, при необходимости проведения специальных наблюдений в космосе. Ну и, наконец, в тех случаях, когда нужно будет что-либо поправить на корабле. Мы, например, думаем всерьез над тем, что космонавт, вышедший в космос, должен уметь выполнить все необходимые ремонтно-производственные работы вплоть до того, что произвести нужную там сварку и т. д. Это не фантастика, это необходимость. Чем больше люди будут летать в космосе, тем больше эта необходимость будет проявляться» [2].

И предвидение К.Э. Циолковского, и научный прогноз С.П. Королёва осуществляются в наше время.

Пионерский эксперимент в открытом космосе был выполнен 18 марта 1965 г., когда космонавт

А. Леонов впервые в мире вышел из шлюза и пробыл вне корабля 23 мин, из них 12 мин в свободном плавании. Это был очередной значительный шаг в освоении космического пространства. Было показано, что человек может жить и активно действовать в открытом космосе. Применительно к внекорабельной деятельности (ВКД) сделан вывод о необходимости оснащения космических кораблей (КК) средствами перемещения и фиксации в условиях невесомости. Это было учтено при подготовке перехода через открытый космос из КК «Союз-5» в КК «Союз-4» в январе 1969 г. уже двух космонавтов, что способствовало появлению опыта для постановки и решения новых, более объемных задач.

Дальнейшая производительная деятельность космонавтов нашей страны в открытом космическом пространстве осуществлена на орбитальных станциях (ОС) «Салют-6», «Салют-7», орбитальном комплексе (ОК) «Мир», Международной космической станции (МКС).

К началу полета ОС «Салют-6» была сформирована рабочая концепция подготовки ВКД, продуктивность которой была подтверждена миссиями на этой станции (1977-1982 гг.). Работы, выполненные на ОС «Салют-7» (1982-1986 гг.), стали следующими шагами в развитии и утверждении теории и практики ВКД. Можно уверенно констатировать, что к началу эксплуатации ОК «Мир» (1986 г.) методы реализации и уровня эффективности ВКД, применительно к существующему защитному снаряжению, давали гарантированно положительные результаты. Работы, выполненные в процессе ВКД на ОК «Мир», стали новым этапом в развитии этой концепции, а также — отечественной и мировой теории и практики ВКД. С началом сотрудничества по программам «Мир-Shuttle» и «Мир-NASA» стали очевидными существование, особенности и преимущества отечественной школы ВКД, сформировавшейся на базе теоретических разработок и практического опыта. Этот бесценный опыт умножается и накапливается в настоящее время при эксплуатации МКС, а также заимствуется зарубежными коллегами из NASA, ESA, JAXA.

Совершенно очевидно, что многомодульные космические станции не могут быть изготовлены полностью на Земле и выведены на орбиты в проектной конфигурации. Концепция их создания состоит в том, что продолжение и завершение их производства из заводских цехов и монтажно-испытательных корпусов выносится на монтажные орбиты и реализуется в процессе ВКД.

Длительное и надежное функционирование ОС достигается путем проведения операций техобслуживания и ремонта, в т. ч. и на внешней поверхности в процессе ВКД. Таким же образом осуществлялись работы по интеграции новых модулей в ОС, дооснащению и даже модернизации и реконструкции ОС, расширению их научного потенциала в течение длительного срока эксплуатации.

Термином «ВКД» обозначается все более расширяющаяся сфера деятельности человека в открытом космическом пространстве: работы, выполняемые космонавтами на наружной поверхности космических объектов, в негерметичных отсеках, а в будущем — на поверхности иных планет и их спутников. ВКД определяется как реализация функциональных возможностей космонавта в скафандре за бортом космического объекта в рамках технологического процесса, включая его цели, средства и результаты.

Операционное управление подготовкой экипажа и станции к ВКД, шлюзованием и действием космонавтов за бортом ОС осуществляет в ЦУП главная оперативная группа управления (ГОГУ), в которую входят специалисты-представители разных предприятий. Продолжительность ВКД определяется как время от открытия до закрытия крышки люка шлюзового отсека.

Выход членов экипажа из обитаемых герметичных отсеков является одним из сложных, напряженных, связанных с повышенным риском участков полета как для космонавтов, так и для специалистов наземных служб, которые создавали и отрабатывали технику, готовили экипаж, обеспечивали управление станцией на этом участке. Обусловлено это экстремальными условиями среды, в которой разворачивается ВКД, и совокупностью специфических особенностей, присущих ВКД, а именно:

• использованием защитного снаряжения — скафандра, обеспечивающего жизнедеятельность, но изменяющего функциональные возможности человека (подвижность, силовые характеристики, тактильную чувствительность, поле зрения и др.);

 безопорным состоянием и изменением биомеханики человека;

 необходимостью фиксации космонавта и всей предметной среды;

• изменением поведения веществ и конструкционных материалов; • особыми закономерностями протекания технологических процессов.

Движущими силами развития и совершенствования ВКД являлись как успешные технические и медицинские исследования и разработки, так и те проблемы и ситуации, которые ставила жизнь в процессе эксплуатации ОС (рис. 1).

Поскольку сроки функционирования космических станций могут исчисляться уже не единицами, а десятками лет, есть основания полагать, что нарастающая стоимость эксплуатации может превышать стоимость их разработки и изготовления. Такие объекты не могут существовать без четко организованной, технически и технологически обеспеченной высокоэффективной системы ВКД. В этих обстоятельствах проблема продуктивности реализуемых технологий ВКД приобрела первостепенное значение. Кроме того, несомненно уже начинает складываться международный рынок услуг, реализуемых в открытом космическом пространстве на коммерческой основе.

Техническим обоснованием осуществления ВКД является необходимость достижения следующих целей:

1. Проведение завершающих сборочномонтажных работ при сооружении крупногабаритных и многомодульных объектов, межмодульные соединения и коммуникации которых могут быть выполнены космонавтами только в процессе ВКД.

2. Расширение научно-технических возможностей ОК, дооснащение, реконструкция, модернизация, реконфигурация в течение многолетнего полета посредством работ, выполнимых только в процессе ВКД.

3. Обеспечение длительного и надежного функционирования ОС путем проведения технического обслуживания и ремонта оборудования на внешней поверхности станции, что может быть выполнено космонавтами только в процессе ВКД.

4. Парирование нештатных ситуаций и ликвидация их последствий, аварийноспасательные и восстановительные работы, утилизация объектов, выполнимые только в процессе ВКД.



№ 1(8)/2015 КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Параллельно с научно-техническими ставятся и достигаются народно-хозяйственные (экономическая эффективность), социальные (безопасность жизни и здоровья экипажа) и общественно-политические (престиж страны) цели.

## Организация внекорабельной деятельности

Первый полет человека в космос, осуществление программы «Восток» (1961-63 гг.), полет пилотируемого КК «Восход-2» актуализировали образование в ОКБ-1 летно-испытательного отдела (1964 г.), руководителем которого стал легендарный летчик-испытатель СССР, Герой Советского Союза С.Н. Анохин. В задачи отдела входили испытания техники и отработка лействий космонавтов в условиях, приближенных к реальным. Первый выход человека в открытый космос подтвердил необходимость развития области космонавтики по обеспечению ВКД. В полной мере эта необходимость проявилась в конце 1960-х гг. при подготовке пилотируемого космического корабля «Союз», лунной программы, а затем и ОС. Тогла в ЦКБЭМ по инициативе и обоснованию ведущего инженера, а впоследствии космонавта, В.В. Аксенова, это направление обрело свой организационный статус, а именно: 23 февраля 1970 г. был подписан приказ об образовании в структуре летно-испытательного отдела специализированной лаборатории, основной задачей которой стала отработка методики ВКД на самолетах в условиях моделированной микровесомости, а затем и лунной тяжести.

Новизна и сложность комплекса научнотехнических проблем по обеспечению возможности человеку жить и продуктивно работать в условиях открытого космоса очевидна. Последовательное и корректное решение этой задачи потребовало постановки ее как общегосударственной, привлечения научного и инженерного потенциала, осуществления организационных мероприятий в масштабе страны. ВКД была реализована совокупностью организаций и предприятий, определенных постановлениями Правительства, и работающих под эгидой Совета главных конструкторов, а именно: Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва; Научно-производственное предприятие «Звезда» (скафандростроение); Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева (конструкция); Государственный научный центр РФ Институт медико-биологических проблем РАН; РНИИ Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина (ЦПК) с привлечением большого круга организаций и предприятий различных отраслей промышленности и учреждений Российской академии наук.

Интегрирующие и координационные функции по всестороннему обеспечению ВКД — от проектной постановки задач до реализации в полете — осуществляет РКК «Энергия». Расширение спектра и объема эксплуатационных задач обусловили преобразование лаборатории, при поддержке космонавтов В.В. Рюмина и А.П. Александрова, в специализированный экспериментально-испытательный отдел, в функции которого входили:

 координация взаимодействия организаций-участников кооперации по обеспечению ВКД;

 организация разработки и изготовления экспериментальных установок для наземной отработки ВКД;

• эргономическое проектирование, технологическое и методическое обеспечение ВКД;

• создание инструментов, средств фиксации и приспособлений для ВКД;

 наземная экспериментальная отработка и испытания технических средств, технологии и методики ВКД в условиях моделированной микровесомости;

 разработка и верификация бортовых инструкций экипажу;

• техническое и методическое обеспечение тренировок космонавтов;

• информационное обеспечение экипажа;

• сопровождение и поддержка в ЦУП в процессе подготовки и реализации ВКД.

Коллектив отдела ответственно и инициативно выполняет свои обязанности и реализует возможности в процессе эксплуатации МКС. В разное время подразделением руководили: летчик-космонавт, к.т.н. В.В. Аксенов, д.т.н. О.С. Цыганков, летчик-космонавт А.Ф. Полещук. В отделе работали будущие космонавты: Г.М. Стрекалов, Ю.В. Усачев, А.И. Лазуткин, К.М. Козеев, М.Б. Корниенко, О.Г. Артемьев. В настоящее время в отряде космонавтов проходят подготовку бывшие сотрудники отдела Н.В. Тихонов и А.Н. Бабкин.

Есть концептуальное обстоятельство, которое способствует особо продуктивной и успешной работе отдела: инженеры и руководители отдела, наряду с исполнением должностных обязанностей, в качестве испытателей принимают физическое участие в экспериментах и испытаниях в условиях моделированной микровесомости в самолете-лаборатории и в гидросреде, для чего дополнительно проходят медицинское освидетельствование, парашютную и водолазную подготовку, владеют техникой и методикой работы в скафандре, накапливая значительный опыт. Все это возможно при личной хорошей переносимости специалистами физических условий испытаний.

Отдел входит в структуру Летно-космического центра, руководители которого А.П. Александров, А.С. Иванченков, А.Ю. Калери, П.В. Виноградов — сами являются опытными космонавтами, выполнявшими работы за бортом ОС. Естественный вклад в успехи ВКД принадлежит руковолителям полета — космонавтам А.С. Елисееву, В.В. Рюмину, В.А. Соловьеву, которые также работали в открытом космосе. ВКД, как особый вид полетных операций, всегда находилась под пристальным вниманием руководства РКК «Энергия» и Совета главных конструкторов. Результаты ВКД в целом являются продуктом коллективной деятельности подразделений и специалистов РКК «Энергия» по различным направлениям космической техники.

В результате проведенных мероприятий в стране была сформирована организационная структура обеспечения деятельности в открытом космическом пространстве.

## Научно-исследовательская и конструкторско-экспериментальная основа внекорабельной деятельности

Тенденция к нарастанию сложности, увеличению габаритных размеров и сроков активного существования обитаемых космических объектов устойчиво сохраняется в мировой космонавтике. Так же устойчиво сохраняется необходимость в расширении возможностей ВКД. Отсутствие опережающих, целенаправленных, проблемно-ориентированных исследований, объективной и всесторонней информации о специфике ВКД являлось бы серьезным препятствием для осуществления отечественных космических программ. Поэтому научно-техническое обеспечение работ в условиях открытого космического пространства стало одной из насущных и актуальных исследовательских и инженерных задач на этапе создания и эксплуатации ОС.

Сложность и уникальность ВКД обусловили необходимость ее репрезентации в виде целостной эргатической системы, одним из элементов которой является космонавт; проведения структурно-функционального анализа; применения комплексного подхода при эргономическом проектировании деятельности космонавтов и разработке технических средств ВКД; применения методов полунатурного физического и математического моделирования.

В связи с этим был выполнен обширный комплекс исследований и разработок, представленный на рис. 2.

Исследование функциональных возможностей человека, снаряженного в скафандр под избыточным давлением и находящегося в условиях невесомости. В режиме моделирования невесомости (в полетах самолета по параболической кривой) определены эргономические параметры рабочего места, степени и диапазоны подвижности частей скафандра, локомоторные и энергосиловые характеристики человека в скафандре, установлены оптимальные и досягаемые рабочие зоны, поля зрения, оценена возможность человека в скафандре выполнять рабочие движения, приемы, манипулировать предметами и их удерживать (рис. 3 и 4).



*Рис. 2. Направление исследований и разработок в обеспечение внекорабельной деятельности (ВКД) Примечание.* ТОР — техническое обслуживание и ремонт; ШО — шлюзовой отсек; НА — научная аппаратура.



**Рис. 3. Рабочие зоны испытателя в скафандре:** 1 — максимальная зона; 2 — оптимальная зона





Анализ конструкции орбитальной станции как объекта технического обслуживания, *ремонта и сборочно-монтажных работ.* На основе статистической обработки данных о распределении отказов и неисправностей, имевших место как при наземных испытаниях, так и в космических полетах, в т. ч. и беспилотных аппаратов, определена номенклатура вероятных задач технического обслуживания и ремонта, технологических процессов и операций, что позволило провести их отработку и адаптацию применительно к условиям космического полета. В результате анализа установлено, что наиболее распространенным и характерным видом работ является выполнение сборочномонтажных операций.

Создание специальных и специализированных космических инструментов и технологических приспособлений. Для реализации технологических процессов в космическом полете разработан набор инструментов, адаптированный к условиям среды, эксплуатационноконструктивным особенностям скафандра и функциональным возможностям человека, снаряженного в скафандр (рис. 5) [3].



Рис. 5. Инструменты для внекорабельной деятельности

С учетом выявленных в исследованиях факторов были сформулированы техникоэргономические требования к инструментам и устройствам, которые изложены в отраслевых стандартах. Самым существенным и наиболее труднореализуемым определено требование об отсутствии или минимизации реактивного воздействия на руку космонавта.

Требование безреактивности наиболее существенно для инструментов с энергетическими приводами. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование динамики и кинематики безреактивного привода, разработана методика расчета и определения оптимальных параметров и характеристик (рис. 6). Разработаны приводы, которые снабжены комплектами разноцелевых насадок.



Рис. 6. Безреактивный привод: 1 — подшипник; 2 — планетарный механизм; 3 — пружина фрикционной полумуфты; 4 — наковальня; 5 — фрикционная полумуфта; 6 — боек; 7 — шарик; 8 — водило планетарного механизма; 9 — пружина ударного механизма; 10 — статор; 11 — корпус; 12 — ротор; 13 — подшипники; 14 — кулачок бойка; 15 — кулачок наковальни

Для производительного выполнения наиболее распространенных монтажно-демонтажных операций (замена блоков, дооснащение) разработана анкерная система крепления, отличительной особенностью которой является обеспечение оперативного жесткого механического соединения пары «винт-инструмент» (рис. 7).



Анкерный инструмент закрепляется на головке винта

**Рис. 7.** Анкерная система винт-инструмент: 1 — шарики; 2 — гильза; 3 — рукоятка фиксации; 4 — крестообразное лезвие; 5 — пружина; 6 — стержень Это исключает образование стружки, снижает энергозатраты космонавта, повышает производительность труда космонавта при выполнении монтажа/демонтажа по сравнению с обычными крепежными элементами до 900%, а для работы одной рукой является единственно возможным способом [3]. Много лет в эксплуатации на борту ОС находится экологически безопасный капиллярный паяльник (рис. 8) [4]. Разрабатывается гидрорезак (рис. 9) с возможностью комбинирования с электроприводом.



Рис. 8. Экологически безопасный капиллярный паяльник: 1 — дозирующий элемент; 2 — сменный наконечник; 3 — стопорный винт; 4 — сменный нагревательный элемент; 5 — корпус; 6 — керамические трубчатые изоляторы; 7 — крепление корпуса к ручке; 8 — изолятор; 9 — ручка; 10 — сетевой шнур



Рис. 9. Гидрорезак

Бортовой набор содержит в себе инструменты для выполнения всего установленного спектра операций. Инструменты снабжены элементами фиксации от утери и для закрепления на скафандре. Концептуально космические инструменты компенсируют ограничения, которые накладывает на возможности космонавта применение скафандра.

Разработка методов и устройств фиксации в условиях невесомости. Один из наиболее специфичных факторов космического пространства — невесомость — оказывает существенное влияние на двигательную активность человека, лежащую в основе ручного труда. Обеспечение биомеханических условий эффективной работы путем исключения безопорного состояния достигается с помощью средств фиксации. Для фиксации ботинок скафандра разработано устройство «Якорь», где используются элементы закрепления на ботинках и характерный для скафандра наддув. Устройство «Якорь» позволяет космонавту принять наклонную рабочую позу, благодаря чему размеры рабочей зоны увеличиваются до 300%. «Якорь» высвобождает космонавту обе руки для продуктивной работы (рис. 10) [5].



Рис. 10. Устройство фиксации «Якорь»

Разработан широкий спектр магнитных и магнито-механических фиксаторов с использованием магнитных материалов, содержащих редкоземельные элементы. Фиксаторы используются для закрепления блоков в диапазоне от научных приборов, телекамер до несущих ферм солнечных батарей и крупногабаритных грузов на грузовой стреле.

Решение проблемы фиксации предметной среды позволило обеспечить организацию, технологию и безопасность ВКД.

Разработка методики и вспомогательных средств для перехода космонавта по внешней поверхности станции и перемещения оборудования. Перемещение космонавта по поверхности ОС — неотъемлемая часть ВКД. На этапе, когда электропитание скафандров осуществлялось по кабелям из шлюзового отсека, конструктивными средствами была решена задача упорядоченного разворачивания/сворачивания кабеля-фала длиной 25 м и его фиксации по маршрутам перемещения.

С переводом скафандров на автономное электропитание мобильность космонавтов значительно увеличилась, но осложнилась задача обеспечения безопасности. Разработана методика безопасного перемещения космонавта по трассам поручней, которые проложены ко всем жизненно важным точкам на внешней поверхности станции, согласно которой к поручням должны быть постоянно присоединены карабинами два страховочных фала скафандра. Принятая по результатам испытаний в условиях моделированной невесомости на самолете-лаборатории Ту-104 форма поперечного сечения поручня — квадрат со стороной 25 мм, оказалась пригодной и удобной для закрепления на поручнях в любой точке трассы научных приборов и образцов для экспонирования, что широко использовалось в течение всего срока эксплуатации ОК «Мир» и на Российском сегменте (PC) МКС.

Для переноса солнечных батарей непосредственно в полете ОК «Мир» с модуля «Кристалл» на модуль «Квант» первоначально рассматривался вопрос об использовании тросовой системы. Затем, по предложению специалистов ВКД, была разработана грузовая стрела в виде телескопической балки длиной 15 м и грузоподъемностью до 750 кг. Две такие стрелы были смонтированы и эксплуатировались на ОК «Мир» и две — на РС МКС. Однако более широко грузовые стрелы используются в другой функции — для перемещения экипажа в рабочие зоны комплекса.

Обеспечение жизнедеятельности и работоспособности человека в открытом космосе, систематическое совершенствование эксплуатационных характеристик защитного снаряжения — скафандров. На станциях «Салют-6», «Салют-7» и «Мир» впервые в мировой практике был применен скафандр полужесткого типа [6]. Его основная отличительная черта — жесткий алюминиевый корпус, выполненный заодно со шлемом, имеющий задний входной люк, крышкой которого служит ранец с системой жизнеобеспечения. Практика подтвердила бесспорные преимущества такого скафандра.

Базовой моделью являлся скафандр «Орлан» с избыточным давлением  $P_{_{\rm H3}} = 394,4$  гПа и парциальным давлением кислорода  $P_{_{\rm O_2}} = 262,6$  гПа, разработанный до 1969 г. для лунной программы. За время использования скафандров на станциях с 1977 г. по 1999 г. было разработано четыре модификации скафандра.

Модификация конструкции скафандра и его систем проводилась как в связи с расширением круга задач по ВКД, так и с учетом опыта эксплуатации, с целью повышения надежности, ресурса и эргономических характеристик: «Орлан-Д», «Орлан-ДМ» (1982 г.), «Орлан-ДМА» (1988 г.), «Орлан-М» (1997 г.). Во всех модификациях совершенствовались системы обеспечения жизнедеятельности, радиосвязи и радиотелеметрии (при постоянном увеличении числа контролируемых параметров). Обеспечивалось систематическое увеличение продолжительности работы в скафандре (с пяти до семи часов) и число выходов (с 6 до 12). «Орлан» является скафандром орбитального базирования, что позволяет регулировать его составные части для космонавтов с различными антропологическими параметрами непосредственно в условиях полета.

Скафандр «Орлан» стал основным, естественно необходимым и достаточным инструментом осуществления ВКД.

Разработка математической модели эргатической системы «человек-скафандрфиксация-инстримент-констрикция». теории и методики расчета и многоаспектного параметрического проектирования **ВКД.** Математическая модель системы ВКД описывает влияние уровня подготовки космонавта, типа инструмента и способа фиксации на изменчивость времени выполнения операции в бо́льшую или меньшую стороны (±) [7]. При этом установлена существенность влияния отдельного фактора на свойства системы, определено уравнение связи между факторами, а также степень влияния факторов и групп факторов на общую изменчивость времени выполнения операций:

- тип инструмента 52%;
- режим фиксации 32%;
- квалификация космонавта 16%;
- инструмент + фиксация 42%;
- инструмент + квалификация 31%;
- фиксация + квалификация 27%.

По результатам исследования сделан вывод о том, что создание и совершенствование космических инструментов является одним из основных путей обеспечения эффективности ВКД.

Разработка и совершенствование конструкции шлюзовых отсеков, систем и процедур шлюзования. Обеспечение безопасности экипажа при прямом и обратном шлюзовании — важнейшая функция систем и конструкции шлюзового отсека. Поэтому, наряду с резервированием отдельных структурных элементов в конструкции шлюзовых отсеков, в отечественных ОС было предусмотрено наличие дополнительного отсека, который может быть использован в качестве резервного шлюзового отсека в случае негерметичности первого при обратном шлюзовании. Такой подход гарантирует возвращение экипажа в станцию при любых отказах основного шлюзового отсека. Кроме того, это позволяет использовать объединенный объем двух отсеков при шлюзовании с крупногабаритным оборудованием. Этот же подход реализован на РС МКС.

Компоновка шлюзовых отсеков, детали интерьера, органы управления и люки выполнены в соответствии с технико-эргономическими требованиями применительно к возможностям человека в скафандре под избыточным давлением, что было достигнуто предпроектным макетированием шлюзового отсека с участием испытателей, облаченных в скафандры.

**Разработка стандартов.** Разработаны следующие стандарты: ОСТ-В-92-8551-74 — «Элементы конструкции, расчетные нагрузки»; ОСТ 134-1003-95 — «Космические инструменты»; ОСТ 134-1004-95 — «Средства фиксации в невесомости».

Формирование требований к оборудованию и научной аппаратуре применительно к условиям, особенностям и задачам ВКД. Разработаны критерии эксплуатационной, монтажной и ремонтной технологичности, среди которых основными являются блочность, доступность и легкосъемность оборудования, а также методика количественной аналитической и экспериментально-испытательной оценки подготовленности конструкции к технологическим воздействиям в процессе ВКД.

Разработка и реализация методов и средств моделирования, экспериментальной отработки, испытаний и тренировок космонавтов по задачам ВКД в наземных условиях. Наземная экспериментальная отработка, испытания, моделирование условий ВКД — факторы, определяющие успех операций ВКД. РКК «Энергия» располагала макетами модулей станций, изготовленными со степенью приближения, достаточной для решения плановых задач ВКД. При возникновении новых задач макеты оперативно дооснащались оборудованием, размещаемым в функциональных зонах экипажа.

Для отработки применяется метод полунатурного физического моделирования, при котором система «человек–скафандр», конструкция отсеков и технические средства ВКД представлены в натуре, а невесомость моделируется при полете самолета по параболе, в условиях гидросреды или на стенде механического моделирования невесомости.

Стенд обезвешивания «Селен» РКК «Энергия» по существу является лабораторией и полигоном для активных опережающих поисковых работ, формирования технико-эргономических требований, предпроектного макетирования, оценки сопрягаемости оборудования со скафандром, испытаний оборудования, несовместимого с методами моделирования микровесомости в полете самолета и в гидросреде. В 2012–14 гг. осуществлена глубокая модернизация стенда «Селен», позволяющая имитировать условия 0,16g и 0,38g для лунных и марсианских программ (рис. 11).



a)



б)

**Рис. 11. Стенд «Селен:** *а* — до реконструкции; *б* — после реконструкции

Условия невесомости на самолете-лаборатории наиболее близки к условиям реального космического полета и позволяют корректно отрабатывать операции внекорабельной деятельности. При полетах по параболе создается режим кратковременной невесомости продолжительностью до 30 с. Самолеты-лаборатории используются для испытаний космической техники, подготовки космонавтов, проведения технических и научных экспериментов. С 1967 до 1980 г. летающие лаборатории создавались на базе пассажирского самолета Ту-104А, а с 1980 г. — на базе серийных транспортных самолетов Ил-76.

Первые экспериментальные исследования возможности использования гидросреды для отработки деятельности и подготовки космонавтов были проведены в 1965 г. Для этой цели был использован обычный плавательный бассейн. Начало работ по использованию скафандров в гидросреде было положено в 1966 г. В 1969 г. был опробован скафандр «Ястреб». В 1970 г. по техническому заданию РКК «Энергия» в НПП «Звезда» был изготовлен испытательный скафандр «Орлан». Впоследствии гидроаналог скафандра «Орлан» в различных модификациях стал основным инструментом для работ в гидроневесомости. В 1980 г. в ЦПК была введена в эксплуатацию специальная гидролаборатория.

Оборудование и операции, которые по своим физико-химическим особенностям наиболее подвержены влиянию вакуума, например, оборудование и аппаратура для электросварки и нанесения герметиков, отрабатываются испытателями в скафандрах в вакуумных камерах.

Тренировки экипажа согласно методике и объему, определенным на этапе экспериментальной отработки, успешно проводились на тех же технических средствах.

Адекватность разработанных методов отработки, испытаний и тренировок подтверждена продуктивностью и безопасностью ВКД в натурных условиях.

Разработка и реализация технологии управления системами и полетом ОС в процессе ВКД представляют собой задачу оптимального планирования с учетом большого количества ограничений и приоритетов. Главными критериями при этом являются [8]:

- безопасность экипажа;
- сохранение работоспособности станции;
- успешное решение целевой задачи ВКД.

В структуре ГОГУ предусмотрена группа обеспечения ВКД, включающая всех необходимых специалистов. Одним из определяющих факторов при планировании ВКД является количественный состав экипажа станции. Если на станции экипаж из двух человек, и эти два космонавта осуществляют выход в открытый космос, то создается ситуация беспилотного полета станции в течение нескольких часов. Разработана и апробирована методика изменения режимов работы бортовых систем на период ВКД с целью предотвращения нештатных ситуаций, выход из которых был бы невозможен при отсутствии космонавта в гермоотсеках станции. Эта технология реализована на отечественных станциях, а опыт использован на МКС.

Отработка действий космонавтов на поверхности Луны — отдельное направление в развитии ВКД. В полетах на режимах 0,16g были определены особенности пребывания в лунной тяжести: возможности перемещения, выполнение рабочих движений; отработаны геологические инструменты и весь спектр задач, которые могли быть поставлены перед первой десантной экспедицией на Луну (1970 г.).

Реализация программы исследований, разработок и организационных мероприятий позволила создать в нашей стране научно-техническую базу обеспечения ВКД, успешно выполнить все задачи, которые были поставлены в проектах и программах или возникали в процессе полета.

## Внекорабельная деятельность в действии

По целевым задачам выходы в открытый космос на отечественных ОС распределяются следующим образом:

• дооснащение и техническое обслуживание — 49%;

• работа с научной аппаратурой — 29%;

• парирование нештатных ситуаций и ремонт — 22%.

Ряд выполненных сборочно-монтажных работ, по их сложности и оригинальности решений, могут быть отнесены к уникальным в мировой космонавтике:

• работы по увеличению энергопотенциала станций — расширение эффективной площади солнечных батарей на станциях «Салют-7» и «Мир»;

• доставка на борт и установка устройства «грузовая стрела»;

• сборка и установка крупногабаритных ферменных конструкций; установка на ферме «Софора» (1992 г.) выносной двигательной установки;

• монтаж, раскрытие и отделение от станции «Мир» антенны «Рефлектор» (1999 г.);

• монтажи на РС МКС: кабельных трасс СМ-ФГБ (2000 г.), СМ-СО1 (2001 г.); грузовой стрелы (2001 г.); газозащитных устройств на двигателях ориентации (2001 г.); противометеоритных панелей (2002 г.); антенн, мишеней, научной аппаратуры;

• запуск микроспутника (в течение полета).

Наиболее значительные ремонтно-восстановительные работы, которые предотвратили прекращение полета станций и/или позволили продолжить полет в полном объеме их возможностей:

• инспекция стыковочного агрегата переходного отсека («Салют-6»); отсоединение зацепившейся антенны КРТ-10 и разблокирование стыковочного агрегата («Салют-6»);

• ремонт объединенной двигательной установки, сборка герметичных соединений («Салют-7»);

• обеспечение стыковки модуля «Квант» путем инспекции и очистки стыковочного агрегата («Мир»);

• ремонт телескопа ТТМ на модуле «Квант»;

 ремонт люка шлюзового отсека модуля «Квант-2» («Мир»);

• закрепление поврежденной СБ-2 на модуле «Спектр»;

• ликвидация препятствия для герметизации стыка ТГК-СМ из-за адгезии уплотнения на служебном модуле (МКС, 2001 г.);

• разделительная резка крепления антенны на ТГК, не отведенной механизмом в штатное положение при стыковке к служебному модулю (МКС, 2006 г.);

• предотвращение баллистического спуска путем разблокирования замка в соединении спускаемый аппарат – бытовой отсек корабля «Союз» в составе РС МКС (2008 г.).

Проведение научных экспериментов в сеансах ВКД, использование возможностей экипажа предоставляет широкое поле для естественнонаучных исследований. Такие неординарные результаты, как, например, управление расплавленным металлом и электронным лучом, искусственное северное сияние, открытие сверхновой в созвездии Лисички, плазменный кристалл, обнаружение микроорганизмов в жизнеспособном состоянии в открытом космосе (рис. 12) [9] и многие другие получены за счет возможностей и действий космонавтов в процессе ВКД. Здесь стоит отметить полноценное участие российских космонавтов в проведении экспериментов зарубежных исследователей, которые уже в постановке экспериментов планируют их помощь.



Рис. 12. Отбор проб в зоне иллюминатора для исследования космической пыли

ВКД стала неотъемлемой составляющей в практике эксплуатации ОС и позволила выйти на принципиально новые позиции по срокам активного существования и диапазону их научно-технического потенциала.

## Тенденции развития и перспективы внекорабельной деятельности

Разработчики и испытатели оборудования и технологии ВКД, все те, кто отрабатывал и осуществлял на практике программы ВКД, осознавали определенную ответственность перед будущим. Ведь их трудом закладывались основы и выбирались векторы развития ВКД, которые могли определить ее уровень и состояние на годы вперед. Эффективные образцы оборудования и рациональные методические приемы ВКД, разработанные в 1970–80 гг., используются не один десяток лет.

Установившийся уровень эффективности ВКД, вполне удовлетворительный для минувших этапов развития космонавтики, включая строительство РС МКС, не является предельно достижимым и достаточным. Факторами, способствующими резкому повышению эффективности ВКД, могли бы стать следующие:

• качественный скачок в области скафандростроения, который приблизил бы функциональные возможности человека в скафандре к возможностям человека на Земле;

• прорыв в области космической робототехники, повышающий манипулятивные характеристики роботов-манипуляторов до уровня возможностей руки человека, и использование искусственного интеллекта;

• автоматизация технологических операций на внешней поверхности объектов.

По мнению автора, проявление указанных факторов в период осуществления среднесрочных программ вряд ли можно признать возможным, по крайней мере, не ранее, чем к концу текущего столетия. Следовательно, путь повышения эффективности ВКД в обозримые сроки — это эволюционное совершенствование тех существующих средств ВКД, которые могут быть качественно улучшены, а в случаях возникновения нетипичных полетных задач созданы новые на доступном уровне техники и производства. Ярким образцом наличия и реализации модернизационного потенциала является система «Орлан», находящаяся в состоянии эволюции в течение 30 лет. Таким же примером может служить устройство фиксации «Якорь», которое трансформировано для применения не только с отечественным скафандром «Орлан», но и с американским скафандром ЕМИ.

Каковы перспективы развития ключевого элемента системы ВКД — скафандра? В его составе может появиться бортовой компьютер для управления агрегатами жизнеобеспечения с функциями экспертной системы и интеллектуального партнера; криогенные агрегаты, биоэлектронные органы зрения, экзоскелетон, автономные средства перемещения, достаточные энергоресурсы.

Ввод информации предполагается осуществлять устными командами космонавту речевым синтезатором, всю информацию отражать на остеклении гермошлема. Положено начало концептуальным и экспериментальным исследованиям в области создания новых видов защитного снаряжения, когда на базе новых материалов и технологий создается оболочка облегающего типа без газовой прослойки между телом и оболочкой, как это реализовано в существующих скафандрах. Такое решение позволит сохранить локомоторные возможности человека без значительных ограничений. При этом скафандр, как инженерное сооружение, может иметь модульносборную конструкцию, которую можно трансформировать в композицию для условий орбитального или межпланетного полета, для условий Луны, Марса, астероида или других инопланетных тел.

А что же человек? На взгляд автора, путь совершенствования человека будет связан с применением методов биоэлектроники, нанохирургии, психотерапии, биотехнологии и, возможно, в будущем, генной инженерии.

Начало третьего тысячелетия отмечено актуализацией интереса мирового сообщества к экспедиции на Марс. Этот интерес не ограничивается приборными исследованиями Марса посредством беспилотных аппаратов, а воплощается в разработки концепций и аванпроектов пилотируемой экспедиции, а также в проведение наземных и экспериментальных работ. Исследования и разработки в интересах пилотируемой экспедиции на Марс станут очередным этапом в развитии ВКД. Опыт геоорбитальной ВКД является достаточным основанием для реализации ВКД в межпланетном полете или в полете по марсоцентрической орбите.

ВКД на поверхности Марса — новая сфера деятельности человека в космическом пространстве. Опережающие исследования работоспособности человека в защитном снаряжении на поверхности Марса являются необходимым условием проектирования пилотируемой экспедиции, заделом для отдаленных программ исследования тел Солнечной системы — астероидов или, может быть, даже Титана, Европы, Энцелада.

Получена аналитическая и модельноэкспериментальная оценка воздействия ветровых нагрузок на марсонавта на поверхности «красной» планеты, что так важно будет для десантной группы экипажа при полете на Марс (рис. 13) [10].



Рис. 13. Эксперимент по оценке ветровых нагрузок на поверхности Марса

В рамках известного эксперимента «Марс-500» участок экспедиции, на котором имитировались действия десантной группы экипажа на поверхности Марса, был оснащен макетами оборудования и ручными геологическими инструментами, которые удалось сохранить в РКК «Энергия» со времени подготовки программы H1-Л3, дополненными современными автономными электроинструментами и макетом скального образования. Эта программа была обеспечена специалистами отдела ВКД (рис. 14) [10].



Рис. 14. Имитация ВКД на поверхности планеты в эксперименте «Марс-500»

Нужно ли оснащать Марсианский межпланетный комплекс средствами воспроизведения искусственной тяжести — один из многих вопросов для его создателей. Предложен когнитивно-эмпирический подход к определению работоспособности космонавта после полугодового полета, который должен дать ответ на поставленный вопрос [10]. В ЦПК проведен эксперимент по такой методике с многообещающими результатами.

Временным лагом, отделяющим историческое прошлое от современности, принято считать 50 лет. Для специалистов по ВКД — это не прошлое, а расширенное на всю трудовую жизнь настоящее. Так, относительно действий космонавта на поверхности Луны можно отметить, что в РКК «Энергия» сохранены не только опыт и отчеты об отработке и испытаниях по этой тематике, но еще трудятся специалисты, которые были участниками этих работ.

За исторически короткий период ВКД из научно-технического прогноза стала инженерной реальностью современного этапа освоения космического пространства.

## Заключение

Полувековой юбилей — весомый повод осветить и осмыслить такой феномен человеческой деятельности, как индивидуальная работа субъекта-исполнителя в открытом космосе. В кратком изложении представлены история становления и развития, сущность и структура, научное обеспечение и практические результаты, современный этап и тенденции развития внекорабельной деятельности. Можно полагать, что в рамках данной статьи поставленная цель достигнута.

## Список литературы

1. Циолковский К.Э. Вне Земли. Калуга: Золотая аллея, 2008. 256 с.

2. Уникальная запись: академик С.П. Королёв. Кругозор. 1966 г. № 4. С. 5.

3. Олегов Ц. и Сергеев Г. Инструменты для космонавта // Наука и жизнь. 1976. № 9. С. 27.

4. Цыганков О.С. Пайка в гермообъеме орбитальной станции // Полет. 2003. № 8. С. 34–40.

5. Цыганков О.С. Трудовая деятельность в безопорном пространстве // Полет. 2012. № 3. С. 3–12.

6. *Абрамов И.П.* Космические скафандры России. Изд-во НПП «Звезда», 2005. 360 с.

7. Александров А.П., Цыганков О.С. Тенденции и перспективы деятельности в открытом космическом пространстве // Полет. 2000. № 11. С. 22–26.

8. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. Ч. 2. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 426 с.

9. Цыганков О.С., Гребенникова Т.В., Дешевая Е.А., Лапшин В.Б., Морозова М.А., Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Сыроешкин А.В., Шубралова Е.В., Шувалов В.А. Исследование мелкодисперсной среды на внешней поверхности МКС в эксперименте «Тест»: обнаружены жизнеспособные микробиологические объекты // Космическая техника и технологии. 2015. № 1(8). С. 31–41.

10. Цыганков О.С. Когнитивно-эмпирический подход к прогнозированию дееспособности космонавтов на поверхности Марса // Полет. 2011. № 12. С. 15–22.

Статья поступила в редакцию 30.01.2015 г.

## References

1. Tsiolkovskii K.E. Vne Zemli [Beyond Earth]. Kaluga, Zolotaya alleya publ., 2008. 256 p.

2. Unikal'naya zapis': akademik S.P. Korolev [Unique recording: academician S.P. Korolev]. Krugozor, 1966, no. 4, p. 5.

3. Olegov Ts., Sergeev G. Instrumenty dlya kosmonavta [Tools for a cosmonaut]. Nauka i zhizn', 1976, no. 9, p. 27.

4. *Tsygankov O.S. Paika v germoob"eme orbital'noi stantsii* [Soldering inside the pressurized volume of the orbital space station]. *Polet, 2003, no. 8, pp. 34–40.* 

5. Tsygankov O.S. Trudovaya deyatel'nost' v bezopornom prostranstve [Work in support-free environment]. Polet, 2012, no. 3, pp. 3–12.

6. Abramov I.P. Kosmicheskie skafandry Rossii [Russian space suits]. NPP «Zvezda» publ., 2005. 360 p.

7. Aleksandrov A.P., Tsygankov O.S. Tendentsii i perspektivy deyatel'nosti v otkrytom kosmicheskom prostranstve [Trends and outlook for activities in open space]. Polet, 2000, no. 11, pp. 22–26.

8. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskii V.E. Upravlenie kosmicheskimi poletami [Spaceflight control]. Part 2. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana publ., 2010, 426 p.

9. Tsygankov O.S., Grebennikova T.V., Deshevaya E.A., Lapshin V.B., Morozova M.A., Novikova N.D., Polikarpov N.A., Syroeshkin A.V., Shubralova E.V., Shuvalov V.A. Issledovanie melkodispersnoi sredy na vneshnei poverkhnosti MKS v eksperimente «Test»: obnaruzheny zhiznesposobnye mikrobiologicheskie ob"ekty [Study of the environment finely dispersed on the outer surface of the international space station and detection of microbiological objects in space experiment «Test»]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2015, no. 1(8), pp. 31–41.

10. Tsygankov O.S. Kognitivno-empiricheskii podkhod k prognozirovaniyu deesposobnosti kosmonavtov na poverkhnosti Marsa [Cognitive empirical approach to predicting the efficiency of cosmonauts working on the Martian surface]. Polet, 2011, no. 12, pp. 15–22.

УДК 528.7:629.78

## ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СЪЕМКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ВЫПОЛНЯЕМОЙ ЭКИПАЖАМИ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МКС

© 2015 г. Беляев М.Ю.<sup>1</sup>, Десинов Л.В.<sup>2</sup>, Караваев Д.Ю.<sup>1</sup>,

Легостаев В.П.<sup>1</sup>, Рязанцев В.В.<sup>1</sup>, Юрина О.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, *e-mail: post@rsce.ru* 

<sup>2</sup> Институт географии РАН (ИГ РАН) Старомонетный пер., 29, г. Москва, Российская Федерация, 119017, *e-mail: direct@igras.ru* 

Анализируются особенности съемки земной поверхности, проводимой экипажами Российского сегмента МКС по программе «Ураган». Описываются проблемы и преимущества изучения Земли с борта пилотируемой орбитальной станции. Главное преимущество — возможность оперативного, интеллектуального реагирования на внезапно возникающие процессы и явления на поверхности Земли. Эта возможность обеспечивается нахождением на борту станции подготовленных космонавтов, наличием современного цифрового фотографического, видео- и фотоспектрального оборудования и использованием специального математического обеспечения. Приводятся данные о разработанном программном обеспечении для планирования наблюдений с учетом географических и метеорологических условий и обработки полученных снимков. Приведены основные направления использования полученных космических изображений для практических целей. Даются примеры полученных уникальных снимков извержений вулканов, половодья, наводнений, «цветения» воды, лесных пожаров, пыльных бурь, динамики движения ледников и айсбергов, а также системы концентрических волн на морской поверхности рядом с островом Дарвин в Тихом океане и необычных кольцевых структур на льду озера Байкал. По полученным с МКС снимкам дается анализ причин возникновения катастрофического наводнения в г. Крымск в 2012 г.

**Ключевые слова:** земная поверхность, космическая фотосъемка, цифровые снимки, мониторинг, обработка фотоснимков, ортофотоплан, планирование наблюдений, особенности проведения съемок, использование космических снимков.

## FEATURES OF IMAGING THE EARTH SURFACE AND USING THE RESULTS OF THE IMAGING MADE BY THE ISS RUSSIAN SEGMENT CREWS

Belyaev M.Yu.<sup>1</sup>, Desinov L.V.<sup>2</sup>, Karavaev D.Yu.<sup>1</sup>, Legostaev V.P.<sup>1</sup>, Ryazantsev V.V.<sup>1</sup>, Yurina O.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia) 4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

<sup>2</sup> RAS Institute of Geography (RAS IG)
 29 Staromonetny per., Moscow, Russian Federation, 119017, e-mail: direct@igras.ru

Features of the Earth surface imaging made by the International Space Station Russian Segment crews under the Uragan Program are analyzed. Problems and advantages of the Earth study from the manned orbital station the main of which is a capability of a quick intelligent response to the processes and phenomena suddenly occurring on the Earth surface are described. This capability is provided by the trained cosmonauts being onboard the Station, the availability of modern digital photographic, video and photospectral equipment and use of special mathematical support. Data on the developed software for planning observations with regard to geographical and meteorological conditions and processing the obtained images is given. The main trends in using the obtained space images for practical purposes are presented. The following is given: examples of the made unique images of volcano eruption, high water, flooding, algal bloom, forest fires, dust storms, glacier and iceberg motion dynamics as well as a system of concentric waves on the sea surface near the Darwin Island in the Pacific Ocean and unusual circular structures on the ice of the Baikal Lake. Based on the images obtained from the International Space Station the cause analysis of the catastrophic flooding occurred in Krymsk in 2012 is made.

**Key words:** Earth surface, space photographic imaging, digital images, monitoring, photographic imagery processing, orthophotoplan, observations planning, imaging features, use of space images.



БЕЛЯЕВ М.Ю.



ДЕСИНОВ Л.В.



РЯЗАНЦЕВ В.В.



КАРАВАЕВ Д.Ю.



ЛЕГОСТАЕВ В.П.

ЮРИНА О.А.

БЕЛЯЕВ Михаил Юрьевич — доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя НТЦ РКК «Энергия», e-mail: mikhail.belyaev@rsce.ru

BELYAEV Mikhail Yurievich — Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Head of STC at RSC Energia, e-mail: mikhail.belyaev@rsce.ru

ДЕСИНОВ Лев Васильевич — кандидат географических наук, заведующий лабораторией ИГ РАН, e-mail: remote\_sensing@complat.ru

DESINOV Lev Vasilievich – Candidate of Science (Geography), Head of Laboratory at IG RAS, e-mail: remote\_sensing@complat.ru

КАРАВАЕВ Дмитрий Юрьевич — кандидат технических наук, начальник сектора РКК «Энергия», e-mail: dmitry.karavaev@rsce.ru

KARAVAEV Dmitry Yurievich — Candidate of Science (Engineering), Head of Subdepartment at RSC Energia, e-mail: dmitry.karavaev@rsce.ru

ЛЕГОСТАЕВ Виктор Павлович (06.06.1931 г. — 08.01.2015 г.) — академик РАН LEGOSTAEV Viktor Pavlovich (06.06.1931 г. — 08.01.2015 г.) — RAS academician

РЯЗАНЦЕВ Владимир Васильевич — начальник сектора РКК «Энергия», e-mail: vladimir.ryazantsev@rsce.ru RYAZANTSEV Vladimir Vasilievich — Head of Subdepartment at RSC Energia, e-mail: vladimir.ryazantsev@rsce.ru

ЮРИНА Ольга Александровна — научный сотрудник ИГ РАН, e-mail: olga.yurina@rsce.ru YURINA Olga Aleksandrovna — Research Scientist at IG RAS, e-mail: olga.yurina@rsce.ru

## Введение

Основным источником мониторинговой информации о процессах и явлениях, происходящих на поверхности Земли и в ее атмосфере, служат аппаратурные комплексы дистанционного зонлирования Земли (ДЗЗ), установленные на автоматических космических аппаратах. Вместе с тем, ценную информацию об объектах на земной поверхности дают съемки, осуществляемые космонавтами с борта Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) по программе «Ураган» [1-4]. Для фотосъемки используются цифровые фотоаппараты Nikon D3, Nikon D3X с длиннофокусными объективами, обеспечивающими получение цветных изображений объектов на поверхности Земли в видимом диапазоне с пространственным разрешением до 2-3 м.

По сравнению с методами получения информации ДЗЗ с помощью бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов, съемка земной поверхности с РС МКС имеет ряд особенностей, из которых следует отметить:

• возможность оперативного интеллектуального реагирования на события;

 фотосъемка одного и того же объекта 1–3 раза в сутки;

• оперативно реализуемые возможности надирной и перспективной съемки и др.

Кроме того, орбита МКС имеет меньшую высоту по сравнению с солнечно-синхронными орбитами спутников ДЗЗ, что дает преимущества при наблюдении изучаемых объектов.

Одной из важных задач экспериментального этапа фотосъемок с борта РС МКС стала оценка применимости полученных данных для практических целей.

Для широкого использования снимков потребовалось создать простую технологию фототрансформирования космических изображений, полученных с борта РС МКС ручными камерами под разными углами съемки.

# Преобразование цифровых снимков земной поверхности в ортогональную проекцию и расчет линейных размеров и площадей

При обработке фотоснимков, полученных космонавтами с борта МКС, часто возникает необходимость определения на них линейных размеров и площадей различных объектов, а также составления «мозаичных» карт из изображений, сделанных в одно или разное время.

Для выполнения такой обработки желательно иметь специальные математические средства. Эти средства должны быть более простые и быстродействующие, чем готовое программное обеспечение, используемое для больших геоинформационных систем. Это связано с тем, что работа с ним обычно очень сложна, а получаемая точность часто избыточна.

Следует также заметить, что задача «привязки» снимков, выполненных космонавтами, затруднена вследствие принятой на РС МКС технологии съемок фотокамерой, свободно «плавающей» в условиях невесомости. Из-за неизвестной ориентации камеры в момент срабатывания ее затвора автоматический расчет «привязки» невозможен. При обработке снимков с РС МКС потребовалось создать специальную технологию.

Основой для опознавания и «привязки» был выбран готовый ортофотоплан земной поверхности. Этот ортофотоплан представлен в открытых источниках (например, *google.maps.com*).

Каждый снимок проходит следующие стадии обработки:

• опознавание по ортофотоплану;

• задание четырех общих (опорных) точек на снимке и ортофотоплане;

• преобразование снимка в ортогональную проекцию;

• задание на снимке точек для последующего автоматического определения требуемых линейных размеров;

• выделение цветом на снимке заданных районов для последующего автоматического вычисления площадей.

Главным элементом обработки является трансформирование снимка в ортогональную проекцию (в проекцию имеющегося ортофотоплана).

После этого исследуемый снимок «приобретает» характеристики ортофотоплана: его масштаб и ориентацию, а координаты каждого пикселя снимка становятся известными. Поэтому появляется возможность вычислять линейные и площадные размеры на ортотрасформированном снимке, а также накладывать снимки друг на друга в одинаковом масштабе для получения «мозаичных» карт [1].

Программное обеспечение для выполнения указанных задач максимально упрощено и предназначено для работы на обычном персональном компьютере в стандартной операционной среде (*Windows*). При этом в качестве интерфейса с оператором использованы стандартные средства операционной системы программа *MS Paint*, входящая в обязательный набор программ. Специальное программное обеспечение представляет собой надстройку над стандартными средствами, обрабатывает сообщения от этих средств, а также производит фотограмметрическое преобразование снимка, исходя из теоремы о двойных соотношениях. Расчет линейных размеров основан на определении расстояния между двумя произвольными точками на «привязанном» снимке. Координаты каждой точки снимка могут быть вычислены по данным первого этапа обработки.

При расчете приближенно принимается сферическая модель Земли с расстоянием между двумя точками, координаты которых отличаются на одну угловую минуту, в 1 852 м (морская миля).

Для задания точек, между которыми требуется рассчитать расстояние, оператор использует стандартную программу *MS Paint* и указывает «мышью» точки — концы измеряемых отрезков.

Метод расчета площадей основан на выделении заданной области исходного снимка определенным цветом (не встречающимся в исходном снимке), последующем переводе снимка в ортогональную проекцию и подсчете на преобразованном снимке получившегося нового числа пикселей, выделенных данным цветом. Поскольку теперь в ортогональной проекции площадь каждого пикселя точно определена, суммарная площадь всех выделенных пикселей также может быть сосчитана по их числу, и таким образом определено значение всей площади заданной выделенной области.

С помощью специально разработанной программы число пикселей с заданным цветом автоматически подсчитывается для каждого «ряда» пикселей одной широты. При этом рассчитывается площадь одного пикселя «ряда» (в одном «ряду» все пиксели имеют одинаковую площадь) на основании известного размера и проекции (обычно Меркатора) ортофотоплана. После суммирования площадей всех подсчитанных закрашенных пикселей становится известной общая площадь поверхности заданного объекта, которая автоматически наносится на изображение снимка.

Данный метод позволяет оперативно оценивать площади заданных объектов на земной поверхности, например, очагов пожаров, наводнений, загрязнений акватории и т. п., не прибегая к сложным вычислениям.

## Планирование наблюдений с борта PC МКС с учетом географических и метеорологических условий

При планировании проведения съемок земной поверхности с борта РС МКС большое значение имеет оценка степени вероятности обнаружения и опознавания объекта с учетом топографических и метеорологических условий. К топографическим условиям относятся количество имеющихся в районе проведения съемок объектов-ориентиров, т. е. таких естественных или искусственных объектов, которые могут быть опознаны на местности и на аэронавигационной карте масштаба 1:2 000 000, а также качество восприятия ориентиров, которое зависит от их размеров, расположения, контраста и т. д.

Под метеорологическими условиями понимается наличие облачности над фотографируемым районом в баллах от 0 (отсутствие облаков) до 10 (сплошная облачность). Данные об облачности могут быть получены по оперативным сводкам или по картам облачности — средняя за какой-либо период (месяц, год и пр.). Практически облачность свыше 7 баллов не учитывается, так как фотосъемка в таких условиях обычно не производится.

С целью упрощения и ускорения расчетов методика планирования наблюдений была реализована в виде специального программного обеспечения, которое вошло в состав программы баллистико-навигационного отображения полетной обстановки (программа «Сигма»). В настоящее время программа «Сигма» используется и наземными службами ЦУП, и непосредственно действующими экипажами РС МКС при оперативном планировании наблюдений и съемок, в т. ч. и для оценки вероятности успеха таких наблюдений и оценки потребного времени (числа сеансов) для гарантированного успеха. Расчет надежности проводится в программе «Сигма» автоматически каждый раз, когда выбирается новый объект наблюдения.

Для повышения эффективности съемки исследуемых объектов разработаны также методы оптимизации планирования наблюдений. Эти методы позволяют, например, находить наилучшие (по освещенности, удаленности от трассы и т. д.) моменты времени для проведения фотосъемки.

# Основные направления использования космических снимков с РС МКС

Космические фотоизображения, полученные с РС МКС, широко используются различными организациями при выполнении научноисследовательских и практических работ. За 14 лет такого использования установлена возможность их применения при изучении следующих процессов и явлений:

• геологические процессы, обусловленные внутренними по отношению к Земле источниками энергии (эндогенные процессы): вулканическая активность, землетрясения и т. п; • геологические процессы, обусловленные внешними источниками энергии (экзогенные процессы): оползни, обвалы, лавины, подвижка ледников;

- лесные пожары;
- пыльные бури;
- прогнозная оценка климата;
- изменения окружающей среды;
- динамика половодий, ледоходов;

• мониторинг ареалов загрязнений вокруг городов и на водной поверхности;

• мониторинг карьеров, свалок и др.

При выполнении наблюдений в указанных направлениях с борта РС МКС за весь период существования космической программы «Ураган» получено 200 000 космических изображений. Некоторые из них уникальны именно тем, что получены космонавтами с борта пилотируемой космической станции. Космонавты наблюдали и фотографировали извержения вулканов, наводнения, ледники, пожары, экологические бедствия и другие явления на земной и водной поверхностях. Полученные снимки иллюстрируют важные достоинства фотосъемки с РС МКС, например, оперативное реагирование на внезапно возникающие процессы и явления на земной поверхности и в атмосфере, возможность мониторинга очень протяженных криволинейных объектов за один сеанс съемки и т. д.

Рассмотрим наиболее характерные примеры съемки с РС МКС, иллюстрирующие указанные особенности.

## Мониторинг извержения вулканов

До настоящего времени наиболее эффективным и экономически целесообразным подходом к решению проблем вулканоопасности и оперативного контроля труднодоступных районов вулканической активности остается использование методов ДЗЗ и, в частности, съемка с РС МКС. В связи с этим важное место в программе «Ураган» уделяется наблюдению за вулканами.

Во время извержения вулкана космонавты всегда выполняют как перспективную съемку с разных направлений всего конуса (рис. 1), так и крупномасштабное фотографирование кальдеры «в надир» (рис. 2). Такие изображения позволяют «оценить» извержение вулкана со всех сторон, начиная от площади распространения до высоты выброса вулканического материала в окружающую среду. Кроме того, фотографирование объекта под разными углами (конвергентная съемка) дает возможность построения 3*D*-изображений. Такая съемка с автоматических космических аппаратов весьма трудоемка, а для экипажа РС МКС — простая рутинная операция, регулярно проводимая в рамках программы «Ураган».



Рис. 1. Перспективная съемка извержения вулкана Пик Сарычева на острове Матуа Курильской гряды

В качестве примера можно привести фотосъемку вулкана Пик Сарычева (высота 1 446 м), занимающего большую часть острова Матуа Курильской гряды (площадь острова 52 км<sup>2</sup>, размеры около 12×6 км). Мощное извержение стратовулкана 11–18 июня 2009 г. удалось зафиксировать с борта РС МКС. На рис. 2 представлен один из первых снимков извержения крупномасштабное фотографирование кальдеры вулкана Пик Сарычева «в надир», полученный 12 июня 2009 г.



**Рис. 2. Съемка вулкана Пик Сарычева «в надир» 12 июня 2009 г.**: 1 — пирокластические потоки; 2 — снежники

На снимке виден сектор юго-западного побережья острова и южный склон конуса. Над конусом на высоту около 12 км поднимается гигантская колонна из горячего вулканического пепла, газов, пыли и сажи диаметром 35 км. Из ее краевых частей обрушиваются на склоны плотные лавины из горячих газа и пепла, имеющие разные размеры и цветовой тон. Склоны конуса частично покрыты свежими вулканитами. На снимке хорошо видны еще не засыпанные вулканическим материалом зеленые склоны и побережье. Полученные позднее снимки с РС МКС показали совершенно иную картину.

Извержение существенно изменило рельеф склонов вулкана и вызвало перестройку ландшафтов острова Матуа, трансформировав береговую линию и увеличив площадь острова. В ходе извержения в окружающую среду оценочно поступило около 150±50 млн м<sup>3</sup> вулканического материала, основную часть которого составила смесь высокотемпературных вулканических газов, пепла и камней. Раскаленные лавовые потоки стерли с лица земли растительность в окрестности вулкана на расстоянии до 25 км<sup>2</sup>. По некоторым оценкам [5] для восстановления растительности до состояния, предшествовавшего извержению, потребуется от нескольких десятилетий до нескольких столетий для разных типов субстратов и разных высотных поясов.

За последнее столетие извержение вулкана Пик Сарычева стало одним из крупнейших на Курильских островах. Учитывая высокую активность вулкана в течение исторического периода, остается высокой вероятность его последующих извержений в недалеком будущем. Для вулкана характерно излияние лавы, сопровождающееся взрывами. Взрывы происходят как одновременно с излияниями, так и чередуясь с ними, при этом выбрасывается огромное количество рыхлого вулканогенного материала. Извержения вулкана представляют угрозу для воздушных судов, а наиболее крупные — могут подвергнуть опасности людей, находящихся на острове. В связи с этим вулканической активности Пика Сарычева и дальше будет уделяться особое внимание.

## Мониторинг половодья

Волго-Ахтубинская пойма и дельта Волги являются уникальными природными объектами. Ежегодно во время весенних залповых сбросов паводковых вод (попусков) из Волгоградского водохранилища они заливаются водой.

Искусственно организуемые половодья приводят к снижению уровня воспроизводства рыбы вследствие сокращения времени образования и существования полоев (временные водоемы, образующиеся в период половодья и служащие нерестилищем многих видов рыб), а также к изменению структуры и состояния почвенно-растительного покрова поймы и дельты реки Волги.

В связи с интенсивной геологической работой воды, проходящей через Волжский гидроузел, русло Волги в нижнем бьефе сильно изменилось: появились отмели и косы, не исчезающие даже в период половодья. Деградации подвержена вся пойма.

Для оперативной оценки гидрологической обстановки в пойме и эффективности водосброса во время половодья космонавты ежегодно проводят съемку Волго-Ахтубинской поймы. За один пролет они получают обзорные кадры и несколько детальных фрагментов ее ключевых участков, что невозможно сделать при фотографировании с автоматических космических аппаратов. При обнаружении сброса воды через плотину Волжской ГЭС космонавты фотографируют гидротехническое сооружение и пойму реки, расположенную ниже него.

На рис. 3 и 4 представлены снимок Волжской ГЭС, сделанный 29 апреля 2013 г. во время попуска максимального за последние восемь лет объема воды с расходом 26 000 м<sup>3</sup>/с, и фрагмент Волго-Ахтубинской поймы ниже по течению.



Рис. 3. Снимок максимального попуска воды на Волжской ГЭС в 2013 г.



Рис. 4. Снимок фрагмента Волго-Ахтубинской поймы

Съемка бликующей поверхности воды дает возможность оперативно картографировать все водотоки шириной более 2 м. Фрагмент Волго-Ахтубинской поймы возле г. Нариманов приведен на рис. 5.



Рис. 5. Съемка бликующей поверхности воды

## Мониторинг криволинейных объектов

Одним из главных достоинств фотосъемки с орбитальной станции является возможность детального мониторинга за один сеанс съемки криволинейных объектов протяженностью в сотни километров с созданием мозаичных изображений для оценки быстро меняющейся природной обстановки на реках (например, паводковой ситуации на реке от ее истока до устья), транспортной ситуации на железных дорогах, загруженности автомагистралей и т. п.

Обычно космонавт успевает сделать 20...50 кадров, из которых в наземной лаборатории с помощью специального программно-математического обеспечения создаются мозаичные картины. С автоматических космических аппаратов возможно фотографировать лишь часть протяженного криволинейного объекта вдоль трассы полета спутника.

В качестве примера можно привести космические снимки долины реки Дон.

Для полного покрытия такого протяженного (1870 км) криволинейного объекта съемкой с РС МКС потребуется сделать около 200 снимков (с учетом перекрытия кадров около 20%). Пример двух «сшитых» в один образ снимков фрагментов долины реки Дон представлен на рис. 6.

## Мониторинг «цветения» воды

Преимуществом фотосъемки с PC MKC является то, что, обнаружив редкое природное явление, космонавт может его оперативно сфотографировать и передать полученные снимки по радиоканалу на Землю для дальнейшего принятия мер, например, по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

Таким явлением может быть «цветение» воды в крупных водоемах, вызванное массовым размножением микроводорослей (эфтрофирование).

«Цветение» воды — массовое развитие фитопланктона, с доминированием в основном одного или нескольких видов водорослей, является типичным для таких водоемов России, как Таганрогский залив Азовского моря, дельта реки Дон и Цимлянское водохранилище.

Во время массового развития микроводорослей в приповерхностном слое (в основном 2...4 м) возникают характерные «пятна цветения», которые хорошо видны из космоса. Площадь таких пятен может достигать от одного гектара до нескольких квадратных километров акватории.

Несмотря на естественность «цветения» воды при определенных гидрометеорологических условиях, может произойти резкий рост количества водорослей, аналогичный тому, что произошел в г. Волгодонске в 2009 г. Внезапное увеличение биомассы сине-зеленых водорослей Цимлянского водохранилища привело тогда к засорению фильтров водозабора местного «Водоканала», вследствие чего население города (около 170 000 человек) осталось без воды на целые сутки [6].



Рис. 6. Снимки реки Дон, «сшитые» в один образ

Согласно работе [7], причиной такого быстрого увеличения концентрации водорослей *Microcysis aeruginosa* в октябре стала аномально теплая осенняя погода (среднемесячные показатели температуры превышали норму на 4,7 °C для воздуха и на 2,4 °C для воды), а также длительное действие ветров северовосточного и восточного направлений (со скоростью 15 м/с) с нагоном микроводорослей в прибрежную зону.

На рис. 7 представлен снимок интенсивного проявления на водной поверхности Цимлянского водохранилища сине-зеленых водорослей 16 июля 2012 г., когда также было остановлено несколько турбин гидростанции, и перекрыта подача воды для бытовых и промышленных нужд.



Рис. 7. Проявление на водной акватории Цимлянского водохранилища сине-зеленых водорослей

Опасность «цветения» воды в Цимлянском водохранилище состоит не только в непосредственном засорении фильтров водозабора, но и в том, что на всех основных этапах развития сине-зеленых водорослей в водную среду поступают токсины. В результате использования такой воды для питьевого водоснабжения появляется угроза населению. В случае, когда интенсивное «цветение» воды охватывает значительную площадь на водном объекте, появляется опасность нарушения атмосферной аэрации водоема и массового замора рыбы.

Для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с «цветением» воды на Цимлянском водохранилище, необходимо проводить его периодический мониторинг и вовремя регистрировать скопления микроводорослей.

## Мониторинг лесных пожаров

Лесной покров чрезвычайно мозаичен, и когда в периоды засухи пожар распространяется на десятки, сотни и даже тысячи гектаров, то горению подвергаются все многочисленные лесные формации, присущие данной лесной зоне. Развитие пожара и его распространение определяются не отдельными типами лесных горючих материалов, а комплексом природных факторов, в т. ч. лесным покровом, влажностью почвенного покрова, рельефом, климатом, текущей погодой, синоптической ситуацией.

Почти все крупные пожары возникают при аномальных гидрометеорологических условиях — в засуху. Продолжительность засухи и ее интенсивность (дефицит осадков) являются тем фоном, на котором возникают и распространяются лесные пожары. В засушливые годы пожары возникают со второй половины мая и продолжаются до сентября. Особо запомнился своими лесными пожарами 2010 г.

Пожары хорошо определяются на космических снимках.

Бо́лышая часть пожаров, наблюдаемая и фиксируемая с борта МКС, приходится на Приангарье, Хабаровский край и Дальний Восток. Наиболее распространены здесь сосновые и лиственные типы леса. Широко представлены березняки. Сосняки располагаются в долинах рек и на склонах различной крутизны. На водораздельных пространствах преобладает лиственница, на высоких водоразделах и теневых склонах — смешанные темнохвойные леса.

Особенностью фотографирования пожаров с РС МКС является то, что космонавты сначала выполняют обзорную съемку бедствия, а затем проводят детальное фотографирование его отдельных очагов (рис. 8, 9). При этом изменяется площадь фотографируемой поверхности и разрешение на местности цифровых изображений. Варьируя фокусное расстояние объектива в сторону его увеличения, космонавты достигают улучшения детализации изображений, при этом уменьшается площадь фотографируемой поверхности. Наличие нескольких изображений одного и того же объекта, полученных с разной детализацией, существенно повышает результативность исследований.



Рис. 8. Фотосъемка пожаров



Рис. 9. Детальная съемка отдельного очага пожара

Мониторинг лесных пожаров продолжает входить в число основных задач программы «Ураган». После появления возможности оперативной передачи космических снимков с РС МКС в ЦУП в Москве, данные о пожарах стали более востребованными в связи с повышением скорости их доставки потребителю. Теперь фотоизображения пожаров передаются в Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России для оперативной оценки ситуации и принятия мер по ликвидации пожаров.

## Мониторинг кольцевых структур на льду озера Байкал

В апреле на ледовом покрове озера Байкал иногда можно увидеть темные кольца диаметром от нескольких десятков метров до 5-7 км. Впервые такое кольцо было замечено на космическом снимке, сделанном в апреле 1999 г. Кольцо располагалось напротив мыса Крестовский (недалеко от пос. Бугульдейка). В следующий раз аналогичное ледовое явление было зафиксировано на том же месте в апреле 2002 и 2003 гг., затем в апреле 2005 г., а в 2004, 2006, 2007 гг. кольцевых образований на льду Байкала обнаружено не было. В 2008 г. кольца появились уже в двух местах: опять в районе мыса Крестовский (с некоторым смещением на юго-запад от места расположения кольца в 1999, 2002, 2003 и 2005 гг.) и, впервые, в районе пос. Турка. В 2009 г. опять зафиксировано два кольца в новых местах: западнее мыса Нижнее Изголовье полуострова Святой Нос и в южной оконечности Байкала.

На рис. 10 приведен обзорный снимок, на котором отчетливо видна кольцевая структура ледового явления на Байкале.

Происхождение кольцевых структур связано с подъемом пузырей метана от подводных кратеров донных грязевых вулканов. Газ приподнимает лед и наполняет его поры. Как правило, эти куполообразные возвышения ледового покрова существуют только 20–25 суток и разрушаются в результате геохимического взрыва. Дегазация жидкости происходит с взрывом («эффект шампанского»).



Рис. 10. Снимок кольцевой структуры на льду озера Байкал

Такие кольца на льду для Байкала явление не новое. Но из-за огромного размера увидеть кольцо со льда и даже с горы практически невозможно. Поэтому замечать их стали недавно, когда начал проводиться космический мониторинг Байкальской природной территории.

В настоящее время космонавты выполняют поиск таких кольцевых структур и фотографируют их от времени появления до разрушения при дегазации воды.

Для расширения возможностей изучения кольцевых структур на льду озера Байкал с борта РС МКС помимо фотокамер видимого диапазона используют также фотоспектральную аппаратуру, регистрирующую излучение в спектральном диапазоне 350...1 050 нм [8].

Мониторинг таких явлений важен для научного анализа метановых извержений со дна озера и для практики безопасного передвижения по льду Байкала. Эффективность таких исследований прямо связана с частотой получения космической информации и оперативностью ее передачи в руки ученых.

## Мониторинг систем океанических волн

Важными задачами программы «Ураган» являются поиск и съемка с борта РС МКС различных систем поверхностных океанических волн и выявление причин и механизма их образования с помощью математического моделирования. Полученные снимки могут использоваться, в частности, при моделировании цунами [4].

В качестве примера приведем систему концентрических волн на морской поверхности рядом с островом Дарвин, обнаруженную и зафиксированную космонавтами в мае 2006 г. (рис. 11).



Рис. 11. Концентрические волны на морской поверхности

Остров Дарвин — самый северный из островов Галапагосского архипелага, расположенного в районе одного из срединно-океанических хребтов Тихого океана примерно в 1 000 км к западу от Эквадора. Географические координаты острова таковы: 1°1′11″ с. ш. и 92° з. д. Площадь острова составляет около 1,06 км<sup>2</sup>.

На рис. 11 в центральной части снимка виден остров Дарвин, рядом с которым располагаются три белых пятна — маленькие островки суши, затапливаемые приливом. Самый маленький островок является центром (на рисунке обозначен *A*), от которого в стороны распространяются поверхностные кольцевые волны.

По полученным с РС МКС снимкам были проведены исследования методом математического моделирования, и выдвинута гипотеза образования таких волн вследствие некоторого периодического воздействия на дно океана, физическая природа которого пока не известна. При помощи многовариантных расчетов удалось приблизить смоделированную волновую систему к зафиксированной на фотоснимке и произвести оценку физических параметров источника волн [9].

Для подтверждения полученных результатов исследований космонавты продолжат съемку данного района.

Обнаружение необычных природных явлений и чрезвычайных ситуаций с последующим их фотографированием — важное преимущество фотосъемки с орбитальной станции перед автоматическими космическими аппаратами.

## Мониторинг пыльных бурь

Наблюдение и фотографирование Аральского моря — первая и наиболее продолжительная программа мониторинга советской и российской пилотируемой космонавтики. Сегодня это программа слежения не за усыханием моря, а за его деградацией и гибелью, берущими свое начало с середины 60-х гг. прошлого века. На бывшем дне Арала отложены неорганические минеральные удобрения, которые десятилетиями вносились на площади около 10 млн га, и продукты нерегулируемого сброса в реки Амударью и Сырдарью отходов промышленности и бытового хозяйства. В поймах рек повсеместно и грубо нарушались правила хранения, утилизации и транспортировки различных химических препаратов, вредных веществ и минеральных удобрений.

Резкое сокращение размеров Аральского моря и образование большой площади суши на его бывшем дне привело к увеличению ветрового выноса концентрированных минеральных солей на расстояние в несколько сотен километров. Эта соль откладывается на огромной площади Средней Азии и Казахстана.

В составе солей преобладают сульфаты и хлориды натрия, сульфаты магния и кальция, бикарбонат кальция. Эти вещества негативно влияют на здоровье населения, приводя к поражению дыхательных путей, к развитию желчнокаменной болезни, хроническому гастриту, заболеваниям почек и увеличению онкологических заболеваний.

Космическая съемка является единственным средством фиксирования ареалов распространения ветропесчаных потоков и их относительной интенсивности. Впервые пыльные бури, продуцируемые отложениями вреднейших солей на осушенном дне бывшего Аральского моря, были обнаружены с борта орбитальной станции «Салют-4».

Пыльные бури возникают всего несколько раз в год и отслеживаются из космоса только путем оперативного поиска с РС МКС (рис. 12). Общий годовой вынос вредных солей со дна Арала достигает 200 млн т.



Рис. 12. Пыльная буря Арала

Экипажами РС МКС уже зафиксировано распространение шлейфа до гг. Ташкент, Бухара, Самарканд. Но особую тревогу вызывают результаты мониторинга с МКС, установившего частые (до 6–7 раз в год) направления шлейфов соли и песка в сторону территории России с отложением грязи на просторах Оренбургской и Челябинской областей, Башкортостана и Поволжья.

По существу, речь идет о начале экологического бедствия, на которое сегодня еще не обращают внимания.

Вот почему фиксирование каждого случая распространения солей Арала в направлении российской территории — важнейшая задача программы «Ураган».

## Мониторинг пульсирующих ледников

Оперативный прогноз подвижек горных ледников путем выявления признаков активизации по данным фотосъемки — важная задача программы «Ураган». Опасность подвижек льдов состоит, например, в том, что в случае перекрытия ледовыми плотинами боковых ущелий образуются напорные озера, при прорыве которых возникают высокие волны, часто создающие катастрофическую ситуацию в долине.

На рис. 13 представлен снимок, где проявились кинематические волны на поверхности памирского ледника Медвежий. По этому признаку в марте 2011 г. был сделан прогноз его наступания с перекрытием долины реки Абдукагор.



Рис. 13. Ледник Медвежий

В конце мая 2011 г. МЧС республики Таджикистан передало сообщение о быстрой подвижке ледника Медвежий. В эти дни наступающий фронт уже приближался к долине реки Абдукагор. Однако из-за плохих метеоусловий в то время фотографирование с РС МКС провести не удалось.

В конце июля поступило сообщение о полном завершении пульсации. Это подтвердила повторная съемка ледника, выполненная с РС МКС 29 сентября 2011 г. Уже в начале лета 2014 г. мониторинг с РС МКС зафиксировал новую активизацию ледника. С этого времени ледник Медвежий вновь вошел в перечень приоритетных задач.

## Мониторинг наводнений

Одной из важнейших задач обеспечения нормального функционирования многих горных регионов страны является мониторинг катастрофических наводнений. Эта задача тесно связана с происходящим повышением среднегодовой температуры воздуха, что приводит к обострению паводковой ситуации в глобальном аспекте. В нашей стране примером таких явлений является наводнение в г. Крымск. Рассмотрим подробнее роль мониторинга с РС МКС в изучении данной катастрофы.

Северный Кавказ, наряду с Приморским краем и Якутией, – район, наиболее часто страдающий от наводнений. В Краснодарском крае зимой и летом 2002 г. произошла серия наводнений, приведшая к многочисленным жертвам среди населения и крупному материальному ущербу. Через десять лет в районе вновь произошло катастрофическое наводнение, охватившее гг. Новороссийск, Геленджик и Крымск. По официальным данным, погибло более 170 человек, причем большая часть в г. Крымск с населением 57 000 человек, расположенном на реке Адагум (бассейн Кубани). Здесь наводнение приобрело наибольший размах. Постановщики эксперимента «Ураган» с самого начала приняли активное участие в изучении данного наводнения и в анализе природных и антропогенных факторов, его вызвавших.

С 9 по 20 июля 2012 г. объектом мониторинга стал бассейн реки Адагум. Космонавт Геннадий Падалка выполнил в ручном режиме и передал на Землю более 200 обзорных и детальных космических снимков района катастрофы с разрешением на местности около 2 м. Часть снимков была оперативно дешифрирована в Институте географии РАН, что позволило провести анализ данной катастрофы.

На рис. 14 приведен снимок г. Крымск и основных инженерных сооружений вдоль реки Адагум: железных и автомобильных дорог, трубопроводов, мостов и др.

На рис. 15 представлен космический снимок бассейна реки Адагум в виде 3*D*-изображения. Очень наглядно выделяются два параллельных горных хребта и склоны: пологий в сторону г. Крымск и круто спадающий — к Черному морю.



Рис. 14. Снимок города Крымск



Рис. 15. Бассейн реки Адагум

Выпавшие в течение 6–7 июля осадки относились к экстремальным и не отмечались ранее за всю историю инструментальных наблюдений. Сумма суточных осадков по метеостанции Крымск в ночь с 6 на 7 июля достигла 156 мм.

С 22:00 до 24:00 6 июля в станице Неберджаевской на реке Баканке максимальный уровень воды был 4,16 м. В это же время уровень воды в притоках поднялся на 2–3 м. В Крымске началось наводнение.

На пути паводковых вод к Крымску в 2,2 км от него оказались препятствия: насыпь железной дороги, железнодорожный мост и трубопроводы, по которым транспортируется углеводородное сырье (рис. 16).



Рис. 16. Препятствия на пути паводковых вод к Крымску: 1 — автомобильный мост; 2 — участок шоссе 800 м, сыгрывший роль дамбы; 3 — железнодорожный мост

На рис. 17 изображены главные препятствия на пути паводка — мост и дамба на шоссе, ставшие причиной образования волны-убийцы высотой более 8 м.



Рис. 17. Главные препятствия на пути паводка — мост и дамба (снимок с вертолета)

Реку Адагум пересекает шоссе с высотой полотна на 6,45 м выше долины реки. Дорога на протяжении 800 м фактически образует дамбу с тяжелым низким мостом. «Живое сечение» этого моста для пропуска воды имеет ширину всего 80 м, к тому же оно разделено на семь частей широкими железобетонными опорами. К началу катастрофы все пространство под мостом было забито мусором. Насыпь

автомобильной дороги оказалась основной временной плотиной, задержавшей паводковые воды и способствовавшей поднятию уровня Адагума значительно более чем на 7 м.

Вода вначале хлынула через образовавшуюся плотину по всему фронту шириной 800 м с превышением ее высоты до 2 м, а затем пробила себе путь в «живом сечении» моста, и на город обрушилась волна высотой до 7 м. В итоге в Крымске было затоплено более половины территории города. Более 60% погибших людей было обнаружено недалеко от этого моста на левом берегу реки. Затем главная волна ушла на правую сторону поймы в направлении широкого оврага, спадающего к реке. Здесь и чуть ниже обнаружены все остальные погибшие люди.

Очень важно отметить, что именно материалы фотосъемки с РС МКС дали возможность точно картографировать площадь затопления города и его окрестностей, а разработанные методы и программно-математическое обеспечение обработки снимков позволили провести анализ произошедшей катастрофы. На снимке (рис. 18) выделены фиолетовым цветом подсчитанные с помощью созданного программного обеспечения площади оползней, возникших в процессе катастрофического наводнения. По площади оползней были, в частности, оценены объемы твердой составляющей в потоке водных масс.



Рис. 18. Рассчитанные площади оползней, возникших в процессе катастрофического наводнения в г. Крымск

## Заключение

В рамках эксперимента «Ураган» на РС МКС за 14 лет проведено около одной тысячи сеансов мониторинга природных и техногенных катастроф.

Наряду с большими успехами проектов спутников ДЗЗ [10], фотографирование с пилотируемой станции обрело свое место, свою «нишу». Мониторинг природной среды и катастроф, выполненный с РС МКС, показал высокие результаты. В частности, постановщики программы «Ураган» первыми предоставили точную оценку причин наводнения, произошедшего в Краснодарском крае в июле и августе 2012 г.

Получено и обработано большое количество уникальных снимков по разным направлениям исследований, в т. ч. для оценки потенциальной опасности и возможного ущерба от наводнений в долинах Краснодарского края, изучения пожаров на территории юга России, горных ледников и Аральского моря, мониторинга объектов при подготовке проведения Олимпийских игр в Сочи в 2013–2014 гг. и др.

## Список литературы

1. Beliaev M.Yu., Dessinov L.V., Maslennikov L.V. Conception of the development of the Ground/ Space system to forecast and decrease natural and technical catastrophes danger // 49th IAF International Astronautical Congress, IAF-98-C.2.04, 28 September – 2 October 1998, Melbourne, Australia.

2. Беляев М.Ю., Волков О.Н., Десинов Л.В., Масленников Л.В. Изучение катастрофических явлений с борта орбитальной станции «Мир» и МКС в эксперименте «Ураган» // Труды XXXV Чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Казань. 2001. С. 117–129.

3. Beliaev M.Yu., Dessinov L.V. Study of the environment from the ISS in the URAGAN Program // 23rd International Symposium on Space Technology and science. Abstracts. Matsue, Japan. 26 May – 2 June 2002. P. 74.

4. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Крикалев С.К., Кумакшев С.А., Секерж-Зенькович С.Я. Идентификация системы океанских волн по космическим снимкам // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 1. С. 116–126.

5. *Гришин С.Ю*. Воздействие на окружающую среду мощного извержения вулкана Пик Сарычева (Курильские острова, 2009 г.) по данным космической съемки. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 2. С. 92–96.

6. Овчарова А.Ю. Анализ работы Волжского гидроузла за 2011-2012 годы // «Инновации в науке»: материалы XIX международной заочной научно-практической конференции, 22 апреля 2013 г. Новосибирск: СибАК, 2013. С. 189–192.

7. *Матишов Г.Г., Ковалева Г.В.* «Цветение» воды в водоемах юга России и сбои в водоснабжении (на примере г. Волгодонска) // Вестник Южного научного центра РАН. 2010. Т. 6. № 1. С. 71–79.

8. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Роговец А.В., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Сосенко В.А. Летная отработка исследовательской аппаратуры «Фотоспектральная система» на борту Российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2014. № 1(4). С. 22–28. 9. Беляев М.Ю., Виноградов П.В., Десиов Л.В., Кумакшев С.А., Рязанцев В.В., Секерж-Зенькович С.Я. Идентификация источника океанических кольцевых волн вблизи острова Дарвин по фотоснимкам с Международной космической станции // Ракетно-космическая техника. Труды. Сер. XII. Королев: РКК «Энергия», 2011. Вып. 1–2. С. 218–232.

10. Шовенгерт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

Статья поступила в редакцию 28.11.2014 г.

## References

1. Beliaev M.Yu., Dessinov L.V., Maslennikov L.V. Conception of the development of the Ground/Space system to forecast and decrease natural and technical catastrophes danger. 49th IAF International Astronautical Congress, IAF-98-C.2.04, 28 September–2 October 1998, Melbourne, Australia.

2. Belyaev M.Yu., Volkov O.N., Desinov L.V., Maslennikov L.V. Izuchenie katastroficheskikh yavlenii s borta orbital'noi stantsii «Mir» i MKS v eksperimente «Uragan» [The study of catastrophic events on the Mir Orbital station and the ISS in the URAGAN experiment]. Trudy XXXV Chtenii K.E. Tsiolkovskogo. Sektsiya «Problemy raketnoi i kosmicheskoi tekhniki», Kazan', 2001, pp. 117–129.

3. Beliaev M.Yu., Dessinov L.V. Study of the environment from the ISS in the URAGAN Program. 23rd International Symposium on space technology and science. Abstracts. Matsue, Japan, 26 May–2 June 2002, pp. 74.

4. Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Krikalev S.K., Kumakshev S.A., Sekerzh-Zen'kovich S.Ya. Identifikatsiya sistemy okeanskikh voln po kosmicheskim snimkam [Identification of the ocean wave system in space images]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 2009, no. 1, pp. 116–126.

5. Grishin S.Yu. Vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu moshchnogo izverzheniya vulkana Pik Sarycheva (Kuril'skie ostrova, 2009) po dannym kosmicheskoi s"emki [The environmental effect of powerful Sarychev Peak volcano eruption, (Kuril Islands, 2009) from data of space image]. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2011, no. 2, pp. 92–96.

6. Ovcharova A.Yu. Analiz raboty Volzhskogo gidrouzla za 2011-2012 gody [The operation analysis of Volzhskiy hydraulic unit within 2011-2012]. Innovatsii v nauke: materialy XIX mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 22 april 2013. Novosibirsk, SibAK publ., 2013, pp. 189–192.

7. Matishov G.G., Kovaleva G.V. «Tsvetenie» vody v vodoemakh yuga Rossii i sboi v vodosnabzhenii (na primere g. Volgodonska) [Algal bloom in reservoirs of the South of Russia and disruptions in water supply (by the example of Volgodonsk)]. Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 71–79.

8. Belyaev B.I., Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Rogovets A.V., Ryazantsev V.V., Sarmin E.E., Sosenko V.A. Letnaya otrabotka issledovatel'skoi apparatury «Fotospektral'naya sistema» na bortu Rossiiskogo segmenta MKS [Flight testing of research equipment "Photospectral system" onboard ISS RS]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2014, no. 1, pp. 22–28.

9. Belyaev M.Yu., Vinogradov P.V., Desinov L.V., Kumakshev S.A., Ryazantsev V.V., Sekerzh-Zen'kovich S.Ya. Identifikatsiya istochnika okeanicheskikh kol'tsevykh voln vblizi ostrova Darvin po fotosnimkam s Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii [Identification of the source of ocean circular waves near the Darwin Island in photographs from the International Space Station]. Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Trudy. Ser. XII. Korolev, RKK «Energiya» publ., 2011, issue 1–2, pp. 218–232.

10. Shovengert R.A. Distantsionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazhenii [Remote sensing. Image processing methods and models]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2010. 560 p.

УДК 629.784.016(100):57.083

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ТЕСТ»: ОБНАРУЖЕНЫ ЖИЗНЕСПОСОБНЫЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

© 2015 г. Цыганков О.С.<sup>1</sup>, Гребенникова Т.В.<sup>4</sup>, Дешевая Е.А.<sup>3</sup>, Лапшин В.Б.<sup>5</sup>, Морозова М.А.<sup>6</sup>,

Новикова Н.Д.<sup>3</sup>, Поликарпов Н.А.<sup>3</sup>, Сыроешкин А.В.<sup>5</sup>, Шубралова Е.В.<sup>2</sup>, Шувалов В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, *e-mail: post@rsce.ru* 

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш) Ул. Пионерская, 4, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, *e-mail: corp@tsniimash.ru* 

<sup>3</sup> Институт медико-биологических проблем РАН (ИМБП) Хорошевское шоссе, 76 А, г. Москва, Российская Федерация, 123007, *e-mail: info@imbp.ru* 

<sup>4</sup> Научно-исследовательский институт вирусологии имени Д.И. Ивановского (НИИ вирусологии) Ул. Гамалеи, 16, г. Москва, Российская Федерация, 123098, *e-mail: info@virology.com* 

<sup>5</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ) Ул. Ростокинская, 9, г. Москва, Российская Федерация, 129128, *e-mail: syroeshkin@ipg.geospace.ru* 

<sup>6</sup> Российский университет дружбы народов (РУДН) Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Российская Федерация, 117198, *e-mail: med.dekanat@pfur.ru* 

Рассматриваются результаты выполненного в 2010-2013 гг. космического эксперимента «Тест», направленного на изучение состояния внешней поверхности модулей Российского сегмента Международной космической станции (МКС). Цель эксперимента — определение предпосылок и возможных механизмов возникновения и развития деструктивных процессов на поверхности МКС. Космический эксперимент «Тест» включал две фазы исследований: орбитальную и наземную. Задача орбитальной — отбор проб газопылевых осадков, выпавших на поверхность станции из окружающей среды, и мелкодисперсных продуктов деградации конструкционных материалов, вызванной воздействием космических излучений, процессов коррозии, бомбардировкой частицами космического мусора и др. Впервые в исследованиях космического пространства космонавтом-оператором в процессе внекорабельной деятельности произведен отбор проб в контейнер-моноблок с пробоотборником. Такие контейнеры поддерживаются стерилизованными и гермоизолированными в течение всего эксперимента, включая доставку на Землю. Задача наземной фазы — проведение токсикологического, физико-химического, микробиологического и молекулярного анализов проб. Уникальные результаты анализа — обнаружение жизнеспособных микроорганизмов в открытом космосе на внешней поверхности МКС – определяют целесообразность продолжения и расширения исследований экологического состояния космических объектов, позволяют ставить вопрос о границе распространения биосферы Земли, а также обсуждать на основе экспериментальных предпосылок как гипотезу панспермии, так и идею рассеивания живого вещества из биосферы Земли в межпланетное пространство.

**Ключевые слова:** Международная космическая станция, газопылевые осадки, мелкодисперсная среда, продукты деградации материалов, пробы, пробоотборник, жизнеспособные организмы, биосфера Земли.

## STUDY OF THE ENVIRONMENT FINELY DISPERSED ON THE OUTER SURFACE OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION AND DETECTION OF MICROBIOLOGICAL OBJECTS IN SPACE EXPERIMENT «TEST»

Tsygankov O.S.<sup>1</sup>, Grebennikova T.V.<sup>4</sup>, Deshevaya E.A.<sup>3</sup>, Lapshin V.B.<sup>5</sup>, Morozova M.A.<sup>6</sup>,

Novikova N.D.<sup>3</sup>, Polikarpov N.A.<sup>3</sup>, Syroeshkin A.V.<sup>5</sup>, Shubralova E.V.<sup>2</sup>, Shuvalov V.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia) 4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

<sup>2</sup>Central Research Institute of Machine Building (TsNIImash) 4 Pionerskaya str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: vashuvalov@tsniimash.ru

<sup>3</sup>Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IMBP) 76A Khoroshovskoe shosse, Moscow, 123007, Russian Federation, e-mail: info@imbp.ru

<sup>4</sup>D. I. Ivanovsky Virology Research Institute (VRI) 16 Gamaley str., Moscow, 123098, Russian Federation, e-mail: info@virology.com

<sup>5</sup> Academician E. K. Fedorov Institute of Applied Geophysics (IAG) 9 Rostokinskaya str., Moscow, 129128, Russian Federation, e-mail: syroeshkin@ipg.geospace.ru

<sup>6</sup> Peoples' Friendship University of Russia (PFUR) 6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation, e-mail: med.dekanat@pfur.ru

Results of space experiment «Test», aimed at studying the state of the outer surface of the modules of the Russian Segment of the International Space Station (ISS), functioning in an aggressive external environment are considered in the work. The space experiment, which aims — identify prerequisites and possible mechanisms of the emergence and development of destructive processes on the surface of the ISS is described. Space experiment «Test» consists of two phases of research: the orbital and ground. Task of orbital phase is accompanying sampling of gas and dust precipitation on the surface of the station from the environment and degradation products of fine material of structural elements caused by exposure to cosmic radiation, corrosion processes, particle bombardment and other debris. For the first time in the world samples have been collected by astronaut-operator during operation «extravehicular Activities» («EVA») in a container-monoblok (sampler), which is supported by sterilized and hermetic throughout the experiment, including delivery to Earth. Task of ground phase is conducting physic-chemical, toxicological, microbiological and molecular analysis. The analysis showed the presence of viable microorganisms on the outer surface of the ISS, which allows you to put the question of the boundaries of the spread of the Earth's biosphere and continue more in-depth study of the ecological state of isolated inhabited space objects.

**Key words:** International Space Station, dust and gas deposits, the fine environment degradation products of matrices, sampling viable organisms, Earth's biosphere.



цыганков о.с.



ГРЕБЕННИКОВА Т.В.



ДЕШЕВАЯ Е.А.



ЛАПШИН В.Б.



МОРОЗОВА М.А.



СЫРОЕШКИН А.В.



новикова н.д.



ШУБРАЛОВА Е.В.



ПОЛИКАРПОВ Н.А.



ШУВАЛОВ В.А.

ЦЫГАНКОВ Олег Семенович — доктор технических наук, главный научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: oleg.tsygankov@rsce

TSYGANKOV Oleg Semyonovich – Doctor of Science (Engineering), Chief Research Scientist at RSC Energia, e-mail: oleg.tsygankov@rsce

ГРЕБЕННИКОВА Татьяна Владимировна — доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией НИИ Вирусологии, e-mail: grebennikova@narvac.com

GREBENNIKOVA Tatiana Vladimirovna – Doctor of Science (Biology), Professor, Head of Laboratory at VRI, e-mail: grebennikova@narvac.com

ДЕШЕВАЯ Елена Андреевна — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ИМБП, e-mail: deshevaya@imbp.ru

DESHEVAYA Elena Andreevna – Candidate of Science (Biology), Lead Research Scientist at IMBP, e-mail: deshevaya@imbp.ru

ЛАПШИН Владимир Борисович — доктор физико-математических наук, профессор, директор ИПГ, e-mail: lapshin@ipg.geospace.ru

LAPSHIN Vladimir Borisovich – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director at IAG, e-mail: lapshin@ipg.geospace.ru

МОРОЗОВА Мария Андреевна — кандидат химических наук, доцент, заместитель декана медицинского института РУДН, e-mail: morozova\_ma@pfur.ru

MOROZOVA Maria Andreevna — Candidate of Science (Chemistry), Assistant professor, Deputy Dean of the Medical Institute at PFUR, e-mail: morozova\_ma@pfur.ru

НОВИКОВА Наталья Дмитриевна — доктор биологических наук, заведующая лабораторией ИМБП, e-mail: novikova@imbp.ru

NOVIKOVA Nataliya Dmitrievna – Doctor of Science (Biology), Head of Laboratory at IMBP, e-mail: novikova@imbp.ru

ПОЛИКАРПОВ Николай Александрович — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ИМБП, e-mail: polikarpov@imbp.ru

POLIKARPOV Nikolay Aleksandrovich – Candidate of Science (Biology), Lead Research Scientist at IMBP, e-mail: polikarpov@imbp.ru

СЫРОЕШКИН Антон Владимирович — доктор биологических наук, профессор, заместитель директора ИПГ, e-mail: syroeshkin@ipg.geospace.ru

SYROESHKIN Anton Vladimirovich – Doctor of Science (Biology), Professor, Deputy Director at IAG, e-mail: syroeshkin@ipg.geospace.ru

ШУБРАЛОВА Елена Владимировна — главный специалист ЦНИИмаш, e-mail: eshubralova@tsniimash.ru SHUBRALOVA Elena Vladimirovna — Chief Specialist at TsNIImash, e-mail: eshubralova@tsniimash.ru

ШУВАЛОВ Вячеслав Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории ЦНИИмаш, e-mail: vashuvalov@tsniimash.ru SHUVALOV Vyacheslav Aleksandrovich — Candidate of Science (Engineering), Senior Research Scientist, Head of Laboratory at TsNIImash, e-mail: vashuvalov@tsniimash.ru

## Введение

космическая Международная станция (МКС) является уникальной научной лабораторией для постановки и реализации экспериментальных исследований в условиях околоземного космического пространства [1]. Станция представляет собой сложную пространственно-распределенную конструкцию, оснащенную системой электропитания, жизнеобеспечения, теплоотвода, энергообмена с окружающей средой [2]. Пилотирование и обслуживание этого искусственного космического объекта выполняет экипаж из шести космонавтов-операторов, которые работают в течение нескольких месяцев. Шлюзовая камера и поручни обеспечивают экипажу выход в открытый космос и перемещение по поверхности МКС. Таким образом, орбитальная станция (ОС) представляет собой достаточно изолированный обитаемый островок, функционирующий в космосе в агрессивной околоземной среде. Более того, при функционировании систем ОС внешние поверхности непосредственно взаимодействуют с собственной внешней атмосферой (СВА), которая формируется под воздействием продуктов сгорания топлива двигателей ориентации и коррекции МКС, двигателей транспортных космических аппаратов (КА), газообразных и пылевых выбросов из гермоотсеков (которые могут включать и микроорганизмы), утечки газов и пыли в процессе внекорабельной деятельности (ВКД), а также набегающего потока внешней среды. Взаимодействие СВА с конструкционными материалами ОС приволит к осаждению компонентов окружающей среды от перечисленных источников на поверхности станции, где образуется устойчивая осадочная среда, покрывающая и загрязняющая корпус МКС. Компоненты СВА попадают под экранновакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ) в виде пыли, газа, ионизированных частиц. Это ведет к развитию цепочки микродеструктивных процессов (физико-химических, биохимических,

микробиологических), снижающих ресурсные характеристики ОС. Радиационные воздействия (особенно на микробиологические составляющие внешней среды) могут вызывать мутации и формирование вредных веществ, а возможно и патогенных форм микроорганизмов, попадание которых в гермоотсек опасно. Следовательно, состояние, структура и состав мелкодисперсной осадочной среды внешней поверхности МКС являются важными факторами безопасности и надежности эксплуатации орбитального космического объекта и требуют углубленного исследования, что и предполагалось выполнить в космическом эксперименте (КЭ) «Тест».

# Постановка и задачи космического эксперимента «Тест»

В рамках Программы научно-прикладных исследований на МКС, как известно, выполнена серия экспериментов по изучению состава СВА (КЭ «Среда-МКС», «Атмосфера» и др.) и взаимодействия ее с конструктивными элементами ОС (КЭ «Плазма-МКС»), образования на поверхности пленки в окрестности двигателей (КЭ «Кромка»). В целях оценки выживаемости микроорганизмов выполнен КЭ «Биориск» [3]. Однако, указанный эксперимент носит узконаправленный характер по отношению к проблеме исследования высокодисперсной среды. Тест-микроорганизмы доставлялись на МКС в жизнеспособном состоянии и экспонировались ограниченное время, будучи помещенными в твердотельные оболочки, которые выполняли определенную зашитную функцию.

Постановка КЭ «Тест» определена реальной возможностью проведения исследований состава и состояния накопленной за время длительного функционирования МКС микродисперсной среды на внешней поверхности с помощью инструмента, обеспечивающего стерильность и гермоизоляцию отобранных в ходе операции на внешней поверхности Российского сегмента (PC) МКС и возвращаемых на Землю образцов. Цели КЭ «Тест» формулируются следующим образом:

• выявление признаков и причин развития микродеструкции гермокорпусов (в т. ч. под ЭВТИ) при взаимодействии с компонентами СВА, продуктами неполного сгорания топлива, летучими органическими соединениями (ЛОС), молекулами воды, а также при возникновении на внешней поверхности ОС агрессивных веществ и очагов коррозии, снижающих ресурсные характеристики модулей МКС;

• выявление возможных очагов существования жизнеспособных микробиологических объектов на внешней поверхности ОС и определение их роли в деструктивных процессах на МКС;

• исследование мелкодисперсного осадочного материала с поверхностей сложных элементов, из-под ЭВТИ, мест сопряжений различных форм, резиновых и пластиковых уплотнений, внешней поверхности модулей МКС для проведения многопараметрического анализа.

Каждая серия КЭ включает две фазы исследований: орбитальную и наземную. Задачи орбитальной фазы — отбор космонавтомоператором в процессе ВКД проб-мазков осадочной среды с поверхности конструктивных элементов РС МКС, их полная гермоизоляция и доставка на Землю. Для реализации этой фазы используется специально разработанная и стерилизованная научная аппаратура (НА), характеристика которой будет приведена ниже.

Задача наземной фазы — проведение токсикологического, физико-химического, микробиологического и молекулярно-биологического анализов доставленных образцов осадочной среды с внешней поверхности МКС по верифицированным методикам профильных лабораторий в стерильных условиях.

# Научная аппаратура космического эксперимента «Тест»

Для достижения поставленных целей необходимо использовать НА, отвечающую основным требованиям: стерильности прибора, полному исключению контаминации проб-мазков после отбора, их гермоизоляции и возможности их доставки в наземные лаборатории.

В КЭ «Тест» применяется специально созданная НА, выполненная в виде моноблока, имеющего две глухие цилиндрические полости, которые герметизируются при установке цилиндрических пробоотборников, снабженных закрепленными тампонами, обработанными консервантом. Прибор отвечает следующим техническим требованиям:

• соответствие функциональным возможностям космонавта-оператора в скафандре; • сохранение работоспособности в условиях выведения, доставки на МКС и возвращения на Землю, а также воздействия вакуума, знакопеременных температур, микрогравитации;

• обеспечение стерильности и гермоизоляции полостей на всех этапах эксперимента.

На рис. 1 показано два общих вида НА в форме моноблоков, причем один изображен с выведенным пробозаборником. НА выполнена из отечественного высокотехнологичного материала «фторопласт-4» (ОСТ В 6-05-810-88) с рабочим диапазоном температур -269...+260 °C, обладающего тепло-, морозо- и химической устойчивостью, высокими диэлектрическими и антифрикционными свойствами, стойкостью к воздействию верхней атмосферы и солнечной радиации. «Фторопласт-4» не смачивается водой, не подвержен воздействию грибков, не поддерживает горение и непроницаем для жидкости. Этот материал обладает ключевым для КЭ «Тест» свойством — он не поглощает гамма-излучение, что позволяет стерилизовать устройство в собранном виде и, следовательно, исключить его контаминацию живыми организмами на поверхности Земли.



**Рис. 1. Приборы «Тест» для отбора проб-мазков:** 1 — моноблок в собранном виде; 2 — моноблок с выкрученным пробоотборником

Изготовленные устройства были верифицированы в процессе термовакуумных испытаний с нагревом и охлаждением до эксплуатационных температур и последующей проверкой на герметичность после каждого термоцикла, а также в процессе эргономических испытаний (рис. 2).



Рис. 2. Эргономическая оценка прибора «Тест» испытателем в скафандре

# Реализация КЭ «Тест» и предварительные результаты анализа

Реализация КЭ начинается с выхода космонавта-оператора из шлюзового отсека в зону отбора пробы, где он:

• извлекает пробоотборник, при этом происходит естественное вакуумирование полости;

• осуществляет контакт тампона с намеченной точкой поверхности;

• аккуратно, не касаясь тампоном окружающих объектов и перчаток, вводит пробоотборник в полость и завинчивает его в открытом космосе до плотного касания конических поверхностей.

С завершением ВКД космонавт с моноблоком возвращается в шлюзовой отсек. Тампон остается в вакууме до вскрытия прибора в наземной лаборатории, что является важным моментом для исключения контаминации. При наддуве в процессе обратного шлюзования и возрастании давления в отсеке до 10<sup>5</sup> Па происходит дополнительное уплотнение конического стыка пробоотборник/моноблок атмосферой отсека. Моноблок укладывается в *ziplock* (пакет с замком) и находится в режиме хранения до возвращения на Землю.

Первая серия КЭ «Тест». 15 ноября 2010 г. член экипажа 25-й экспедиции на РС МКС Ф. Юрчихин в процессе внекорабельной деятельности произвел отбор проб-мазков в запланированных зонах (рис. 3): с гермооболочки модуля «Пирс» под откидным клапаном ЭВТИ; с пятен на поверхности ЭВТИ в зоне дренажных клапанов служебного модуля «Звезда». Два моноблока «Тест», содержащие четыре взятые пробы, были подготовлены к возвращению на Землю.



Рис. 3. Расположение зон отбора проб-мазков на внешней поверхности РС МКС в космическом эксперименте «Тест»: 1 — функционально-грузовой блок «Заря»; 2 — исследовательский модуль «Пирс»; 3 — транспортный корабль «Союз ТМА-08М» (29.03.13 г.); 4 — малый исследовательский модуль «Поиск» (МИМ-2); 5 — служебный модуль «Звезда»; 6 — грузовой корабль «Прогресс М-17М» (31.10.12 г.); 7 — места отбора проб из-под ЭВТИ (2 этап КЭ «Тест»); 8 — места отбора проб (1 этап КЭ «Тест»); 9 — место отбора проб с иллюминатора (3 этап КЭ «Тест»)

Наземная фаза КЭ — лабораторные исследования отобранных проб — носила многоаспектный характер, а именно:

• анализ проб на гептил;

• химический анализ на легколетучие вещества;

• микробиологический анализ [4].

Анализ проб на гептил. Тампоны с мазками погружались в 10 мл ацетона и выдерживались в течение одного часа. Затем тампоны изымались, а в раствор помещали ~1 г безводного СаС<sub>2</sub> для осушивания и выдерживали в течение суток. Далее раствор упаривался до 100 мкл и анализировался на хроматографе «AgilentGC 5973 MSD». Гептила и его производных не обнаружено во всех четырех пробах.

Анализ состава летучих органических соединений. Определение качественного и количественного состава летучих органических соединений проводилось методами термодесорбционной газовой хроматографии с массспектрометрическим анализом.

Анализ пробы, отобранной в зоне расположения дренажного клапана, показал наличие всех ЛОС, идентифицированных в атмосфере РС МКС, в концентрациях, в сотни и тысячи раз превышающих концентрации тех же соединений в атмосфере станции, в частности, бензола и стирола более 9,6±0,05 мг/м<sup>3</sup> и 4,2±0,0 мг/м<sup>3</sup> соответственно. Большинство ЛОС присутствуют и во всех остальных пробах, но в концентрациях на 2–3 порядка ниже. Все обнаруженные соединения не оказывают химического воздействия на металлическую поверхность корпуса, но могут служить питательной средой для микроорганизмов, способных вызывать биоповреждения неметаллических и металлических материалов, в частности, материала ЭВТИ.

При анализе экстрактов проб идентифицированы малолетучие поликонденсированные полиядерные гетероароматические соединения, что согласуется с результатами, полученными при моделировании эксплуатации МКС в ходе наземных испытаний с применением комплекса аналитических методов, включающих газовую хроматографию и масс-спектрометрию.

Микробиологический анализ. В рамках микробиологического анализа, выполненного с соблюдением правил асептики, проводился посев на поверхности плотных питательных сред. Для этого были использованы: трипказо-соевый агар (TCA) и «голодный агар» — для бактерий; картофельно-декстрозный агар, среда Чапека с 30 и 15% содержанием сахарозы — для грибов.

Посевы термостатировались для бактерий при температуре 37 °C в течение 1 сут на TCA и 7 сут на «голодном агаре», а для грибов — при температуре 28 °C в течение 5–7 сут.
Жизнеспособных спор грибов во всех четырех пробах не выявлено. В пробе, взятой с поверхности ЭВТИ в зоне расположения дренажного клапана, были обнаружены жизнеспособные бактерии вида Bacillus Licheniformis. Данные микроорганизмы, за счет образования спор, высокоустойчивы ко многим неблагоприятным факторам внешней среды (высоким и низким температурам, воздействию ультрафиолета, изменению рН среды и др.). Они могут быть патогенными для человека и являться потенциальными биодеструкторами материалов различного химического строения, в т.ч. и материалов, используемых в космической технике. Локально создавшиеся зоны оптимального роста и развития микроорганизмов (температура, влажность, электромагнитная и радиационная обстановка, антропогенное загрязнение и др.) могут привести к быстрому размножению микроорганизмов данного вида и повреждению конструкции.

Вторая серия КЭ «Тест» была проведена 16 февраля 2012 г., когда бортинженер экспедиции МКС-30 О. Кононенко выполнил отбор проб-мазков с металлооболочки корпуса под ЭВТИ на модуле «Звезда». В целях исследования процессов возможного возникновения коррозии на внешней поверхности гермокорпуса станции было установлено содержание металла в доставленных пробах. Для анализа проб на наличие следов металлов, входящих в состав материала оболочки гермокорпуса, был использован метод масс-спектрометрии. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о значительном (в 4,5 раза) превышении магния (Mg) в пробе по сравнению с алюминием. Это может свидетельствовать о возможном начале коррозионного процесса на внешней поверхности оболочки гермокорпуса, поскольку Mg в процессе развития коррозии первым выделяется из алюминий-магниевых сплавов.

**Третья серия КЭ «Тест»** включала отбор проб на поверхности модуля «Пирс» с оправы иллюминатора и в зоне границы стекло-оправа. Ее выполнил 22 августа 2013 г. космонавт А. Мисуркин (рис. 4).



Рис. 4. Отбор проб с иллюминатора ВЛ2 модуля «Пирс»

Доставленные на Землю приборы были вскрыты в лаборатории молекулярной диагностики в ламинарном шкафу II степени биологической защиты (рис. 5). Манипуляции проводили в перчатках, оператор был оснащен маской и одноразовой одеждой для исключения контаминации.



Рис. 5. Вскрытие прибора «Тест» в ламинарном шкафу II степени биологической защиты в лаборатории молекулярной диагностики

Исследования смывов включали микробиологический анализ методом посева, молекулярно-биологический анализ на наличие нуклеиновых компонентов (ДНК и РНК) как маркеров присутствия микроорганизмов, исследования дисперсного состава проб с помощью метода динамического рассеяния. В табл. 1 представлены характеристики дисперсного состава смывов.

#### Таблица 1

Смыв	Положение максимума распределения по числу частиц (мкм)/доля фракции (%)						
	1 фракция	2 фракция	3 фракция	4 фракция			
Тампон № 1	0,04/0,1	0,04/0,1 –		5,3/1,9			
Полость № 1	0,17/22	0,33/75	_	4,8/3			
Тампон № 2	0,11/32	0,44/36	0,84/20	5,5/12			
Полость № 2	0,10/38	0,26/59	_	5,0/3			

## Дисперсный состав смывов с тампона и полости пробоотборника «ТЕСТ»

В результате исследований выяснилось следующее:

• в пробах с оправы иллюминатора и в пробах с границы стекло-оправа обнаружены спорообразующие бактерии вида *Bacillus subtilis* и *Bacillus sphaericus*;

• в процессе анализа в двух пробах (в образце смыва полости и в образце тампона) была обнаружена ДНК, кодирующая 16*S*-рибосомальную бактериальную РНК;

• в обоих образцах были обнаружены ДНК экстремофильной бактерии рода *Delfia sp.* и ДНК бактерии рода *Mycobacteria sp.*, морского гетеротрофного бактериопланктона.

Молекулярные исследования в наземной фазе КЭ «Тест» проводились по следующей методической схеме:

• пробоотборник вскрывался в лаборатории в ламинарном шкафу II степени защиты (полная изоляция воздушной среды и рабочей зоны);

• пробы концентрировались с использованием концентрирующих пробирок и мембраны (*Amicon Ultra*-5);

 концентрированные пробы (а также измельченная мембрана) использовались для образования суспендированного раствора доставленных в лабораторию проб космической пыли и суммарного выделения нуклеиновых кислот с применением неорганического носителя;

 подготовленные таким образом образцы кислот включали в процесс проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР) для размножения бактериологического материала, определения рода бактерий и генетической структуры.

В статье [5] приводится более подробное описание методической последовательности операций подготовки и проведения ПЦР с образцами космической пыли, секвенирования фрагментов ПЦР, анализ полученных нуклеотидных последовательностей и построение филогенетической дендрограммы фрагментов.

Результаты филогенетического анализа последовательностей нуклеотидов (выполненного с помощью известных компьютерных программ) сравнивались с более чем 20 млн ДНК-последовательностей базы данных NCBI GenBank® и показали 100%-ное совпадение материала проб с родом Delftia. Этот род обитает в различных земных природных условиях (донные отложения, активные илы, природные воды, морские экосистемы). Кроме того, в образцах космической пыли была обнаружена ДНК рода *Mycobacteria*, различные виды которого составляют до 40% биомассы гетеротрофного бактериопланктона. Полученная нуклеотидная последовательность ПЦР-фрагмента образца пробы сравнивалась с последовательностью ДНК Mycobacteria, обнаруженной при исследовании образцов микрослоя прибрежной морской зоны российской Западной Арктики (Баренцево море, заповедник «Семь островов»). Сравнение результатов филогенетического анализа последовательности нуклеотидов из космической пыли с базой данных *NCBI GenBank*® показало 99%-ное сходство с микробактериями, присутствующими в природных водах.

В мировой практике до эксперимента «Тест» образцы с поверхности ОС не исследовались на наличие нуклеиновых компонентов (ДНК и РНК) как маркеров присутствия микроорганизмов. Результаты исследования проб-мазков на молекулярном уровне позволяют определить специфичность обнаруженных микроорганизмов, происхождение которых может быть связано:

• с контаминацией при создании и выведении ОС;

- с функционированием систем;
- с выносом наземных аэрозолей;
- с диспергированием поверхности;
- с космической пылью.

Наличие ДНК различных бактерий в пробах космической пыли с иллюминатора ВЛ2 модуля МИМ2 представлено в табл. 2.

Таблица 2

Наличие ДНК различных бактерий в пробах космической пыли с иллюминатора ВЛ2 модуля МИМ2

Место сбора		Род			
пыли	Метка пробы Тампон № 1 Полость № 1 Тампон № 2	Delfia sp.	Mycobacteria sp.		
Оправа	Тампон № 1	+	—		
иллюминатора	Полость № 1	+	_		
Граница	Тампон № 2	+	—		
стекло-оправа	Панель № 2	+	+		

Обнаруженные осадки микро- и наночастиц, пленочные образования (результат адгезионных процессов), а также жизнеспособные споры бактерий на внешней поверхности МКС подтверждают наличие физико-химических и биохимических предпосылок для развития деструктивных процессов. Бактерии выявлены только в зонах загрязнений поверхности, возможно служащих питательной средой для микроорганизмов или обеспечивающих «сцепление» с поверхностью.

Необходимо обратить внимание, что близкая по цели проблема изучалась NASA и японскими специалистами. Исследователи отбирали пробы-мазки на Земле перед пуском модуля с фермой [6] и в полете сравнивали данные с целью определения вероятности занесения биообъектов на другие космические тела (например, на Марс). Пробы в орбитальной фазе отбирались космонавтом в процессе ВКД с поручней фермы (доставленной КА Space Shuttle Discovery в марте 2009 г.) ладонью перчатки скафандра, смывались дистиллированной водой, раствор помещался в патрон LOCAD PTS' Exploration и анализировался в полете. Сравнение анализов проб на Земле и в космосе показало более чем 50%-ное снижение количества эндоксинов glucan в космическом пространстве. Этот эксперимент носил поверхностный характер, подтвердил санитарное значение воздействия космических условий и не имел продолжения [7].

## Итоги экспериментальных исследований и выводы

Реализованные к настоящему времени серии экспериментальных исследований в КЭ «Тест» обозначили экологическую проблему, связанную с функционированием изолированного автономного орбитального космического объекта и определением взаимодействия СВА с конструктивными элементами МКС. Обнаруженные осадки микро- и наночастиц, пленочные образования, а также жизнеспособные бактерии на внешней поверхности МКС позволяют говорить о наличии физикохимических и биохимических предпосылок для развития деструктивных процессов. При этом осадочный материал может оказаться питательной средой для обнаруженных живых бактерий, а также условием для размножения и образования плотных очагов коррозийных процессов. В результате взаимодействия внешней среды и конструктивных элементов МКС возникает основа для появления опасных (или просто ядовитых) веществ живой и неживой материи, которая может переноситься космонавтом в гермоотсек, что может представлять опасность.

Выполненные в процессе КЭ «Тест» исследования на внешней поверхности РС МКС обнаружили в составе собранных образцов ряд веществ, указывающих на существование предпосылок к развитию деструктивных процессов, а, следовательно, необходимости экологического мониторинга внешних конструктивных элементов станции.

Физико-химический анализ отобранных проб обнаружил на металлических поверхностях модулей следы кислот и повышенное содержание металлов, входящих в состав материала оболочки гермокорпуса. Повышенное содержание Mg в пробах указывает на возможное начало коррозийных процессов.

В результате микробиологических исследований проб-мазков с поверхности РС МКС впервые обнаружено наличие жизнеспособных бактерий семейства *Bacillus Licheniformis*, родов *Delftia u Mycobacteria*.

Взаимодействие микробиологических объектов на внешней поверхности станции с факторами окружающей среды (воздействие заряженных частиц, потоков гамма-, рентгеновского, УФ-излучений и т. д.) может привести к мутациям в их геномах. Такие явления представляют опасность для пилотируемых КА в долговременных автономных полетах. Устойчивость выявленных живых форм к воздействию внешней агрессивной среды позволяет говорить о биохимических предпосылках развития биокоррозии. Возникновение местных условий (например, под ЭВТИ) для размножения организмов может привести к ослаблению или даже повреждению конструкции гермоотсеков. Анализ космических проб на присутствие бактериальных ДНК, выполненный методом гнездовой ПЦР, показал присутствие наземных и морских родов микрофлоры на поверхности МКС. Это обстоятельство указывает на возможность существования каналов переноса обнаруженных организмов из стратосферы в ионосферу и далее на поверхность ОС, например, с восходящей ветвью глобальной электрической цепи. Этот неожиданный результат позволяет поставить вопрос о границе распространения биосферы Земли и сосредоточить усилия по развитию экспериментальных исследований в этом направлении на МКС. Для этого имеются необходимые предпосылки, поскольку станция, как автономный пилотируемый космический объект, является уникальным научным инструментом, обладающим значительной апертурой и, следовательно, именно поверхность конструктивных элементов МКС при взаимодействии с набегающим потоком будет с большей вероятностью аккумулировать следы этого взаимодействия, в т. ч. объекты микробиологического характера.

Простота конструкции прибора и процедуры отбора проб, малое время, затрачиваемое на операцию, позволяют поставить задачу проведения тотального мониторинга внешней поверхности всех модулей станции, включая транспортные корабли, которые изготавливались и выводились на орбиту из разных регионов Земли.

В реализации отбора проб перспективным представляется использование манипуляторов, имеющихся на борту МКС, в частности, «Стрела», *ERA, DEXTER* и *Canadianarm* 2, что может обеспечить отбор проб в зонах поверхности станции, труднодоступных для космонавтов при ВКД. Вопросы, решаемые в КЭ «Тест», имеют в настоящее время огромное теоретическое и практическое значение. Распространение обследования внешней поверхности на все модули МКС и привлечение международных партнеров к решению поставленных в КЭ «Тест» задач значительно повысит уровень и значимость исследований.

### Заключение

Космический эксперимент «Тест» показал, что МКС, функционирующая в космосе более 15 лет в агрессивной околоземной среде, является уникальным объектом для экспериментальных исследований.

1. Осадки микро- и наночастиц, пленочные образования, а также жизнеспособные бактерии на внешней поверхности МКС подтверждают наличие физико-химических и биохимических предпосылок для развития деструктивных процессов.

2. МКС является научной площадкой (натурным образцом) для получения материаловедами достоверной информации о влиянии космических условий на различные конструкционные материалы. Эта информация является необходимой базой для разработки изделий с длительным сроком существования и высокой автономностью — например, для марсианского экспедиционного комплекса, лунной или марсианской, орбитальной или напланетной станций.

3. Внешняя поверхность модулей МКС является идеальной экспериментальной базой для исследования сохранения и выживаемости земных микроорганизмов в условиях открытого космического пространства и обеспечения планетарного карантина для экспедиционных комплексов.

4. Проведение эксперимента «Тест» на поверхности МКС позволило получить уникальные экспериментальные данные для решения проблемы определения верхней границы биосферы Земли и даже исследования механизма рассеивания биокосмозоля из биосферы Земли в космическое пространство (что является важнейшим вопросом современного естествознания).

5. Теоретические и практические следствия, которые возможно получить из результатов реализации и продолжения программы «Тест», могут привести к принципиально новым для земной цивилизации фундаментальным знаниям и должны рассматриваться как пролог и веха эмпирической экзобиологии.

### Список литературы

1. Легостаев В.П., Марков А.В., Сорокин И.В. Целевое использование российского сегмента МКС: значимые научные результаты и перспективы // Космическая техника и технологии. 2013. № 2. С. 3–18.

2. Российский сегмент МКС. Справочник пользователя. Режим доступа: http://knts. tsniimash.ru/ru/src/CenterInfRes/iss\_rs\_guide. pdf (дата обращения 29.12.2014 г.)

3. Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Сычев В.Н., Дешевая Е.А., Левинских М.А. Основные итоги и перспективы космического эксперимента «Биориск». Международная космическая станция. М: ИМБП РАН, 2011. Т. 2. С. 273–307.

4. Цыганков О.С., Афанасьев А.В., Шубралова Е.В., Новикова Н.Д., Дешевая Е.А., Поликарпов Н.А., Мухамедиева Л.Н. Микробиологические объекты на поверхности Международной космической станции // Полет. 2013. № 10. С. 50–56.

5. Сыроешкин А.В. Гребенникова Т.В., Лапшин В.Б., Южаков А.Г., Садыкова Г.К., Цыганков О.С., Шубралова Е.В., Шувалов В.А., Морозова М.А., Чичаева М.А., Головко А.В. Бактерии мирового океана и суши Земли в космической пыли на Международной космической станции: панспермия или ионосферный «лифт»?// Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 124–132.

6. Berger T., Hajek M., Bilski P., Korner C., Vanhavere F., Reitz G. Cosmic radiation exposure of biological test systems during the EXPOSE-E mission // Astrobiology. 2012. V. 12.  $N_{2}$  5. P. 387–392.

7. Kawaguchi Y., Yang Y., Kawashiri N., Shiraishi K., Takasu M., Narumi I., Satoh K., Hashimoto H., Nakagawa K., Tanigawa Y., Momoki Y.H., Tanabe M., Sugino T., Takahashi Y., Shimizu Y., Yoshida S., Kobayashi K., Yokobori S.I., Yamagishi A. The possible interplanetary transfer of microbes: assessing the viability of Deinococcus spp. under the ISS Environmental conditions for performing exposure experiments of microbes in the Tanpopo mission.// Orig. Life Evol. Biosph. 2013. Oct. 43(4–5). P. 411–428.

Статья поступила в редакцию 05.12.2014 г.

### References

1. Legostaev V.P., Markov A.V., Sorokin I.V. Tselevoe ispol'zovanie rossiiskogo segmenta MKS: znachimye nauchnye rezul'taty i perspektivy [The ISS Russian Segment utilization: research accomplishments and prospects]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2013, no. 2, pp. 3–18.

2. Rossiiskii segment MKS. Spravochnik pol'zovatelya [The ISS Russian Segment. User Manual]. Available at: http://knts.tsniimash.ru/ru/src/CenterInfRes/iss\_rs\_guide.pdf (accessed 29.12.2014).

3. Novikova N.D., Polikarpov N.A., Sychev V.N., Deshevaya E.A., Levinskikh M.A. Osnovnye itogi i perspektivy kosmicheskogo eksperimenta «Biorisk». Mezhdunarodnaya kosmicheskaya stantsiya [The main results and prospects of space experiment Biorisk. International Space Station]. Moscow, IMBP RAS publ., 2011. Vol. 2, pp. 273–307.

4. Tsygankov O.S., Afanas'ev A.V., Shubralova E.V., Novikova N.D., Deshevaya E.A., Polikarpov N.A., Mukhamedieva L.N. Mikrobiologicheskie ob"ekty na poverkhnosti Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii [Microbiological objects on the International Space Station surface]. Polet, 2013, no. 10, pp. 50–56.

5. Syroeshkin A.V. Grebennikova T.V., Lapshin V.B., Yuzhakov A.G., Sadykova G.K., Tsygankov O.S., Shubralova E.V., Shuvalov V.A., Morozova M.A., Chichaeva M.A., Golovko A.V. Bakterii mirovogo okeana i sushi Zemli v kosmicheskoi pyli na Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii: panspermiya ili ionosfernyi «lift»? [The world ocean and Earth land bacteria in cosmic dust on the International Space Station: panspermia or ionospheric «lift»?]. Geliogeofizicheskie issledovaniya, 2013, issue 5, pp. 124–132.

6. Berger T., Hajek M., Bilski P., Korner C., Vanhavere F., Reitz G. Cosmic radiation exposure of biological test systems during the EXPOSE-E mission. Astrobiology, 2012, vol. 12, no. 5, pp. 387–392.

7. Kawaguchi Y., Yang Y., Kawashiri N., Shiraishi K., Takasu M., Narumi I., Satoh K., Hashimoto H., Nakagawa K., Tanigawa Y., Momoki Y.H., Tanabe M., Sugino T., Takahashi Y., Shimizu Y., Yoshida S., Kobayashi K., Yokobori S.I., Yamagishi A. The possible interplanetary transfer of microbes: assessing the viability of Deinococcus spp. under the ISS Environmental conditions for performing exposure experiments of microbes in the Tanpopo mission. Orig. Life Evol. Biosph., 2013, oct., 43(4-5), pp. 411-428.

УДК 629.784.015.07.085:521.3:629.783

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

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

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

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

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

Ключевые слова: микроспутник, транспортно-пусковой контейнер.

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

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

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

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

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



МАРКОВ А.В.



СОЛОВЬЕВ В.А.



MATBEEBA T.B.



СОРОКИН И.В.



МУРТАЗИН Р.Ф.



ЧУРИЛО И.В.



СМИРНОВ А.В.



ХАМИЦ И.И.

MAPKOB Александр Викторович — руководитель НТЦ РКК «Энергия», e-mail: alexander.v.markov@rsce.ru MARKOV Alexander Viktorovich — Head of STC at RSC Energia, e-mail: alexander.v.markov@rsce.ru MATBEEBA Татьяна Владимировна — ведущий инженер-испытатель РКК «Энергия», e-mail: tatiana.v.matveeva@rsce.ru MATVEEVA Tatiana Vladimirovna — Lead testing engineer at RSC Energia, e-mail: tatiana.v.matveeva@rsce.ru

МУРТАЗИН Рафаил Фарвазович — кандидат технических наук, заместитель начальника отдела PKK «Энергия», e-mail: rafail.murtazin@rsce.ru MURTAZIN Rafail Farvazovich — Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Department at RSC Energia, e-mail: rafail.murtazin@rsce.ru

СМИРНОВ Алексей Викторович — ведущий инженер РКК «Энергия», e-mail: alexey.smirnov@rsce.ru SMIRNOV Aleksey Viktorovich — Leading engineer at RSC Energia, e-mail: alexey.smirnov@rsce.ru

СОЛОВЬЕВ Владимир Алексеевич — доктор технических наук, летчик-космонавт, первый заместитель генерального конструктора РКК «Энергия», e-mail: vladimir.soloviev@rsce.ru SOLOVIEV Vladimir Alekseevich — Doctor of Science (Engineering), Pilot-Cosmonaut, First Deputy General Designer at RSC Energia, e-mail: vladimir.soloviev@rsce.ru

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

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

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

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

ХАМИЦ Игорь Игоревич — руководитель НТЦ РКК «Энергия», e-mail: igor.khamits@rsce.ru KHAMITS Igor Igorevich — Head of STC at RSC Energia, e-mail: igor.khamits@rsce.ru

### Введение

Малые космические аппараты (МКА), традиционно подразделяемые на микро-, нано- и пикоспутники [1], с каждым годом приобретают все бо́льшее значение для решения научных и прикладных задач в околоземном космическом пространстве, прежде всего связанных с исследованиями Земли из космоса, обеспечением связи, навигации, выполнения специальных задач контроля и наблюдения [1]. Эта тенденция обусловлена высокой экономической эффективностью МКА, основанной на относительно низкой стоимости (иногда на порядки, в сравнении с более крупными космическими аппаратами) их изготовления и эксплуатации. С точки зрения эффективности ключевым элементом технологии реализации проектов создания и целевого использования МКА являются способы и средства их доставки на околоземную орбиту. В зависимости от типа эти спутники могут выводиться в виде кластера из нескольких (иногда – десятков [2]) МКА специальной ракетой-носителем (РН) легкого класса, могут доставляться на орбиту как попутный груз при запусках КА бо́льшей размерности с помощью РН среднего и тяжелого классов. В то же время, Программа Международной космической станции (МКС) дала возможность реализовать и принципиально новые способы выведения МКА, конкурирующие с традиционными. На сегодняшний день их три:

• запуск вручную МКА нано-, пико- и микроразмерности, доставленных на станцию в составе грузового или пилотируемого корабля, членом экипажа МКС в ходе внекорабельной деятельности (ВКД);

• запуск МКА с использованием шлюзовых камер и робототехнических средств МКС без выполнения ВКД экипажем — в настоящее время для этого используются технические средства японского модуля *Kibo*, а в перспективе — и российского модуля «Наука»;

• доставка и запуск МКА с использованием транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс-М», являющегося важным элементом системы транспортно-технического обеспечения полета МКС. Запуск обеспечивается на участке автономного полета ТГК до, во время или после завершения выполнения им основной целевой задачи.

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

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

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

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

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

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

### Постановка задачи

Постановщиком эксперимента, основная цель которого состоит в дистанционном исследовании в широком спектре электромагнитных излучений физических процессов в атмосфере при высотных грозовых разрядах, является Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН). Комплекс научной аппаратуры «Гроза» размещен на борту МС «Чибис-М», разработанного и изготовленного в СКБ КП ИКИ РАН [4]. Для увеличения срока активного существования МКА высота его начальной орбиты должна была составить около 500 км, что почти на 100 км превосходит высоту орбиты МКС. Это требование было обеспечено благодаря размещению МС на борту ТГК «Прогресс М-13М», который с помощью собственной двигательной установки доставил МКА на заданную орбиту, после чего было выполнено успешное отделение МС от корабля и увод последнего с отработкой номинальной циклограммы полета.

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

• проверка заложенных в конструкцию транспортно-пускового контейнера технических решений по доставке и отделению MC от TГК «Прогресс-М»;

• проверка технологических решений, связанных с проведением наземных испытаний ТПК и МС, а также подготовительных и монтажных работ, связанных с доставкой МС на МКС;

• отработка методики подготовки ТПК и MC на борту РС МКС и корабля «Прогресс-М» к проведению КЭ;

• отработка технологии доставки MC с орбиты MKC на более высокую (500 км) орбиту с помощью ТГК «Прогресс-М»;

• реализация безопасной баллистической схемы при отделении МС «Чибис-М» от ТГК «Прогресс-М».

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

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

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

• механическую защиту МС при транспортировании, погрузочно-разгрузочных и монтажных работах;

• связь по электропитанию с МС для подзарядки буферных батарей МС от блока силовой коммутации ТГК;

• запуск MC в автоматическом режиме с борта ТГК;

• обеспечение безопасности экипажа МКС на всех этапах транспортировки, технического обслуживания и эксплуатации ТПК.

С использованием данных о конструкции и функциональных особенностях ТПК, его узлов и механизмов, были определены ограничения по его массе, габаритам, применяемым материалам, энергопотреблению. Кроме того, выполнена привязка контейнера к габаритам люка ТГК.

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

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

## Наземные испытания на экспериментальной базе РКК «Энергия»

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

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

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

• подтверждение при заданных тепловых условиях работоспособности механических

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

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

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

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

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

## Тренировки экипажей и заключительный этап наземной отработки

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

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

• 30 августа 2011 г. — А. Шкаплерова и А. Иванишина (экспедиция МКС-29/МКС-30) — рис. 1;

• 07 октября 2011 г. — О. Кононенко (экспедиция МКС-30/МКС-31).



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

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

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

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



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

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



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

# Математическое моделирование и планирование эксперимента

В ходе наземной подготовки КЭ при выпуске заключения о его реализуемости были проанализированы схемы отделения МС «Чибис-М» от ТГК, проведены расчеты траекторий движения МС после отделения, оценка времени его существования на орбите. Выполнен также расчет затрат топлива грузового корабля для его выведения в точку отделения MC при условии обеспечения гарантированного схода TГК с орбиты.

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



Рис. 4. Двухимпульсная схема перехода транспортного грузового корабля с орбиты МКС на целевую орбиту:  $\Delta V_{p}$  — приращение скорости транспортного грузового корабля при выполнении маневра

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

#### Таблица 1

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

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

Для контроля процесса отделения MC от ТГК использовалась телекамера из состава служебных систем грузового корабля. С ее помощью была обеспечена видеорегистрация момента выхода МС из ТПК. Для решения этой задачи необходимо было исключить попадание прямых солнечных лучей в объектив телекамеры. С этой целью были выполнены расчеты оптимальных временных интервалов отделения МКА от ТГК с учетом того, что в планируемый момент отделения корабль находится в ориентации орбитальной стабилизации комплекса, ось телекамеры лежит в плоскости орбиты, а ее засветка не происходит на любом участке витка при угле β (угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце) больше 32°. В табл. 2 приводятся результаты расчетов интервалов времени, в течение которых засветки телекамеры не происходит.

Таблица 2

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

Интер	эвал дат	Зноношно угла в
Начало	Окончание	Эначение угла р
08.01.2011	29.01.2011	-3272°
13.02.2011	22.02.2011	3240°
11.03.2011	27.03.2011	-3252°
10.04.2011	29.04.2011	3263°
08.06.2011	29.06.2011	3275°
08.08.2011	27.08.2011	3265°
11.09.2011	26.09.2011	-3250°
12.10.2011	23.10.2011	3242°
08.11.2011	28.11.2011	-3271°
06.01.2012	27.01.2012	-3273°

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

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



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

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



Рис. 6. График изменения относительного расстояния между микроспутником и транспортным грузовым кораблем:  $1 - \Delta V_s = 1 M/c; 2 - \Delta V_2 = 0.05 M/c$ 

Несмотря на важность приведенных результатов расчетов, основной целью моделирования, тем не менее, была оценка времени существования МС на орбите. Было принято, что габаритные размеры спутника составят не более Ø370×605 мм, и его масса не превысит 40 кг.

Такой объект имеет следующие баллистические коэффициенты: "3

максимальный 0,105 <u>м</u>;

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



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

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

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

при максимальном торможении — четыре месяца;

• при номинальном торможении — пять месяцев;

• при минимальном торможении — девять месяцев.

В случае максимального торможения угол между плоскостями орбит МС и МКС через три года составит ~85°.

При номинальном торможении этот угол через 4,5 года увеличится до ~160°.

По результатам расчетов были сделаны следующие выводы:

1. Проведение эксперимента при больших углах β обеспечивает непопадание прямых солнечных лучей в объектив телекамеры в процессе отделения MC.

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

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

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

По фактическим измерениям орбиты спутника на июль 2014 г. прогноз его существования близок к кривой с максимальным баллистическим коэффициентом, и прогнозируемое время схода с орбиты — первая половина 2015 г.

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

• фотографирование оборудования после разгрузки корабля «Прогресс-М»;

• фотографирование ТПК с МС после его монтажа на СтА корабля «Прогресс-М» и передача информации на Землю; анализ действий экипажа по подготовке МС «Чибис-М» к запуску;

• разгерметизация грузового отсека корабля «Прогресс-М», в котором установлен ТПК с подготовленным к запуску МС;

расстыковка ТГК с МКС, сопровождающаяся проведением съемки этого процесса экипажем с помощью ручных видеокамер или автоматически с помощью телекамеры, установленной на агрегатном отсеке служебного модуля;

• формирование специальной орбиты ТГК высотой 480–500 км для отделения полезной нагрузки (МС «Чибис-М»);

• проведение траекторных измерений для расчета вектора состояния МС «Чибис-М» в момент его отделения;

• построение специальной ориентации корабля «Прогресс-М» для отделения МС;

• отделение MC «Чибис-М» от ТГК; контроль этого процесса с использованием ТВ-камеры корабля «Прогресс-М»;

• сход с орбиты и затопление корабля «Прогресс-М» в заданном районе Мирового океана.

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

### Летные испытания, работы на борту РС МКС

За несколько дней перед отстыковкой корабля «Прогресс М-13М» от МКС, 19 января 2012 г., российские космонавты — члены экипажа экспедиции МКС-30 А. Шкаплеров и О. Кононенко провели необходимые операции по переводу ТПК с МС из транспортного положения в рабочее, закрепив контейнер на шпангоуте стыковочного узла корабля. После этого был подключен кабель питания ТПК, сняты зачековки, предохранявшие от несанкционированного срабатывания механизмов, и установлен защитный сетчатый экран, закрывающий просвет между стыковочным шпангоутом ТГК и установленным в рабочее положение ТПК (рис. 8). В ходе работ проведены фотографирование и видеосъемка выполняемых операций.



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

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



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

#### Летные испытания, автономный участок

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

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

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

• минимальная высота над поверхностью Земли – 497,535 км;

• максимальная высота над поверхностью Земли — 513,607 км;

- период обращения 94,55 мин;
- наклонение 51,62°.

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

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

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

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

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

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

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

### Заключение

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

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

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

Для успешного решения этих задач РКК «Энергия» имени С.П. Королева совместно с организациями научной кооперации были разработаны новые методы и технические средства, позволяющие с высокой надежностью обеспечить интеграцию транспортнопускового контейнера с микроспутником в составе ТГК «Прогресс-М», его доставку на борт МКС, подготовку к запуску на орбите с участием членов экипажа РС МКС и выведение микроспутника на заданную орбиту в ходе автономного полета ТГК. Достигнутый результат расширяет спектр возможностей применения транспортных грузовых кораблей «Прогресс-М» для решения целевых задач и открывает перспективу их широкого использования для доставки на заданные орбиты малых космических аппаратов любых типов.

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

### Список литературы

1. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. д.т.н., проф. Фатеева В.Ф. М.: Радиотехника, 2010. 320 с.

2. Исследование рынка малых космических аппаратов в ретроспективе 2002–2013 гг. и с прогнозом до 2020 г. Режим доступа: http:// o2consulting.ru/articles/market-research-mka/ (дата обращения 22.12.2014 г.).

3. Научно-образовательные программы. PKK «Энергия». Режим доступа: http:// www.energia.ru/ru/iss/sci-education/microsat/ microsat 02.html (дата обращения 22.12.2014 г.).

4. *Туревич А.В., Зеленый Л.М., Климов С.И.* Космическая миссия «Чибис-М» // Экология и жизнь. 2011. № 7(116). С. 50–56.

5. Чибис-М. Фундаментальные космические исследования и космическое образование с использованием микроспутников. Режим доступа: *http://chibis.cosmos.ru/index.php?id=1674* (дата обращения 22.12.2014 г.).

Статья поступила в редакцию 25.12.2014 г.

### References

1. Malye kosmicheskie apparaty informatsionnogo obespecheniya [Small spacecraft for information support]. Ed. prof. Fateev V.F. Moscow, Radiotekhnika publ., 2010. 320 p.

2. Issledovanie rynka malykh kosmicheskikh apparatov v retrospektive 2002–2013 gg. i s prognozom do 2020 g. [Marker research of small spacecraft in retrospective view of 2002-2013 and with a forecast till 2020]. Available at: http://o2consulting.ru/articles/market-research-mka/ (accessed 22.12.2014).

3. Nauchno-obrazovatel'nye programmy. RKK «Energiya» [Research and educational programs. RSC Energia]. Available at: http://www.energia.ru/ru/iss/sci-education/microsat/microsat\_02.html (accessed 22.12.2014).

4. Gurevich A.V., Zelenyi L.M., Klimov S.I. Kosmicheskaya missiya «Chibis-M» [Chibis-M space mission]. Ekologiya i zhizn', 2011, no. 7(116), pp. 50–56.

5. Chibis-M. Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya i kosmicheskoe obrazovanie s ispol'zovaniem mikrosputnikov [Chibis-M. Fundamental space research and education using microsatellites]. Available at: http://chibis.cosmos.ru/index.php?id=1674 (accessed 22.12.2014).

УДК 629.784.017.07.023.26:523.68

### ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРОВ МЕТЕОРОИДОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ПРОЧНОСТЬ СТЕКОЛ ИЛЛЮМИНАТОРОВ МОДУЛЕЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

©2015 г. Воробьев Ю.А.<sup>1</sup>, Магжанов Р.М.<sup>1</sup>, Семенов В.И.<sup>2</sup>, Устинов В.В.<sup>2</sup>,

Фельдштейн В.А.<sup>2</sup>, Чернявский А.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш) Ул. Пионерская, 4, г. Королёв, Московская область, Российская Федерация, 141070, e-mail: corp@tsniimash.ru

Воздействие метеороидов и частиц космического мусора на космические аппараты — один из факторов, существенно влияющих на надежность и безопасность функционирования долговременных пилотируемых орбитальных станций, в частности Международной космической станции (МКС). Признано, что необходимая безопасность МКС достигается только питем применения в конструкциях модулей специальных средств защиты от ударов (экранной защиты). На иллюминаторах модулей МКС использовать эти средства невозможно, так как в процессе полета при проведении некоторых экспериментов, связанных с фотографированием, иллюминаторы находятся в открытом положении, и их внешние стекла подвергаются воздействию метеороидов и частиц космического мусора. В этой связи особого внимания заслуживает оценка влияния ударов частиц на повреждаемость и сопутствующее ей снижение прочностного ресурса стекол, так как только понимание процесса развития повреждений может позволить прогнозировать долговременность безопасной эксплуатации иллюминаторов и станции в целом. Когда встал вопрос о продлении сроков эксплуатации станции, возникла необходимость проведения работ по оценке вероятности разрушения стекол иллюминаторов при наличии на их поверхности повреждений. Для решения этой проблемы необходимо было провести теоретические исследования и подтвердить их экспериментальным питем. В данной статье излагаются результаты экспериментально-теоретических исследований прочности стекол иллюминаторов, поврежденных в результате ударов частии, необходимые для оценки остаточного прочностного ресурса. Эти исследования позволили с достаточной степенью достоверности обосновать пролонгацию срока эксплуатации иллюминаторов Российского сегмента МКС и определять их жизненный запас в реальный момент времени.

**Ключевые слова:** иллюминатор, метеороиды, частицы космического мусора, ресурсная прочность, Международная космическая станция, стекло, пролонгация, экспериментальнотеоретические исследования.

### THE EFFECT OF HIGH-VELOCITY IMPACTS OF METEOROIDS AND SPACE DEBRIS ON THE STRENGTH OF GLASS IN THE WINDOWS OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION MODULES

Vorobiev Yu.A.<sup>1</sup>, Magzhanov R.M.<sup>1</sup>, Semenov V.I.<sup>2</sup>, Ustinov V.V.<sup>2</sup>,

Feldshtein V.A.<sup>2</sup>, Chernyavsky A.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia) 4A Lenin Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru <sup>2</sup>Central Research Institute of Machine Building (TsNIImash) 4 Pionerskaya str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: corp@tsniimash.ru

The effect of meteoroid and space debris particles on spacecraft is one of the factors that have a significant impact on the reliable and safe operation of long-term manned space stations including the International Space Station (ISS). It is recognized that the required level of the ISS safety can only be achieved through the use of special protective aids (shields) in the module structures. It is impossible to use these shields on the windows of the ISS modules, since in the course of the mission some experiments involving imaging require that the windows stay open and their external panes are exposed to particles of micrometeoroids and space debris. In this connection, of special note is the estimate of the effects of the particle impacts on the damageability and the associated reduction in durability of the glasses, because only the understanding of the process of damage propagation can make it possible to predict the longevity of safe operation of windows and station as a whole. When the question of extending the station life was raised, the need arouse to conduct work to evaluate the probability of window glass failure in the presence of damage on glass surface. To address this problem, theoretical studies had to be conducted and confirmed through experiment. This paper presents the results of experimental and theoretical research in the strength of window glass damaged by particle impacts required for evaluating the remaining endurance. This research made it possible to provide a rationale, with a sufficient degree of confidence, for extending the life of windows on the Russian Segment of the ISS and determine their remaining life at an actual moment in time.

*Key words:* window, meteoroids, space debris particles, durability, International Space Station, glass, extension, experimental and theoretical research.



ВОРОБЬЕВ Ю.А.



МАГЖАНОВ Р.М.



СЕМЕНОВ В.И.



ФЕЛЬДШТЕЙН В.А.



ЧЕРНЯВСКИЙ А.Г.



УСТИНОВ В.В.

ВОРОБЬЕВ Юрий Андреевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник PKK «Энергия», e-mail: yury.vorobjov@rsce.ru VOROBIEV Yury Andreevich — Candidate of Science (Engineering), Lead Research Scientist at RSC

Energia, e-mail: yury.vorobjov@rsce.ru

МАГЖАНОВ Раис Мухтясибович — заместитель руководителя НТЦ – начальник отделения РКК «Энергия», e-mail: rais.magzhanov@rsce.ru MACZHANOV Rais Mukhtyasibovich — Deputy Head of STC – Head of Division at RSC Energia

MAGZHANOV Rais Mukhtyasibovich – Deputy Head of STC – Head of Division at RSC Energia, e-mail: rais.magzhanov@rsce.ru

СЕМЕНОВ Валерий Иванович — главный специалист ЦНИИмаш, e-mail: corp@tsniimash.ru SEMENOV Valery Ivanovich — Chief Specialist at TsNIImash, e-mail: corp@tsniimash.ru

УСТИНОВ Владимир Васильевич — кандидат технических наук, начальник сектора ЦНИИмаш, e-mail: corp@tsniimash.ru

USTINOV Vladimir Vasilyevich – Candidate of Science (Engineering), Head of Subdepartment at TsNIImash, e-mail: corp@tsniimash.ru

ФЕЛЬДШТЕЙН Валерий Адольфович — доктор технических наук, начальник отдела ЦНИИмаш, e-mail: dinpro@mail.ru

FELDSHTEIN Valery Adolfovich – Doctor of Science (Engineering), Head of Department at TsNIImash, e-mail: dinpro@mail.ru

ЧЕРНЯВСКИЙ Александр Григорьевич — заместитель генерального конструктора РКК «Энергия», e-mail: alexander.cherniavsky@rsce.ru

CHERNYAVSKY Alexander Grigoryevich — Deputy General Designer at RSC Energia, e-mail: alexander.cherniavsky@rsce.ru

### Общая характеристика проблемы

Опыт эксплуатации МКС (около пятнадцати лет на орбите) показал, что ее поверхность имеет множественные следы соударений с метеороидами и частицами космического мусора. Согласно существующим моделям осколочно-метеороидной среды, годовые потоки частиц размером свыше 1 мм составляют  $10^{-3}...10^{-2}$  (шт./год·м<sup>2</sup>), а среднее число ударов N пропорционально площади элемента, времени его экспозиции и зависит от ориентации элемента на данной орбите. В дальнейшем рассматриваются мелкие частицы миллиметровых размеров, так как вероятность  $P_1 = N\exp(-N)$  одного удара крупной частицы невелика [1].

В составе модулей MKC в качестве остекления используются иллюминаторы типа TCK 316, наибольшее количество из них находится на служебном модуле (рис. 1), которые также подвергаются воздействию метеороидов и частиц космического мусора.



Рис. 1. Иллюминаторы служебного модуля (расположение, mun): 1 — TCK.316.02.000 (Ø228); 2 — TCK.316.02.000; 3 — TCK.316.02.000; 4 — TCK.316.03.000; 5 — TCK.316.02-1.000; 6 — TCK.316.02-1.000; 7 — TCK.316.02-1.000; 8 — TCK.316.02-1.000; 9 — TCK.316.01.000 (Ø426, без покрытия); 12 — TCK.316.02.000; 13 — TCK.316.02.000; 14 — TCK.316.02.000; 26 — TCK.316.03.000 (Ø80)

Иллюминатор представляет собой двухкамерную конструкцию (рис. 2), в ней внешнее стекло подвергается воздействию микрометеороидов и частиц космического мусора, в результате чего на его поверхности появляются каверны (рис. 3), которые снижают прочность стекла. По мере дальнейшей эксплуатации стекла под нагрузкой каверны увеличиваются, и с течением времени может произойти его разрушение. В соответствии с требованиями к Российскому сегменту (PC) SSP 50094 это недопустимо, поэтому в процессе полета МКС необходимо проводить постоянный контроль состояния внешних стекол иллюминаторов, чтобы иметь возможность при достижении каверной критических размеров, приводящих к разрушению стекла, провести необходимые работы по восстановлению двухбарьерного контура герметичности. Сегодня достоверные данные по оценке ресурсной прочности стекол с повреждениями отсутствуют, имеются лишь отдельные научные публикации по долговременной прочности стекол, но этого недостаточно для определения сроков дальнейшей безопасной эксплуатации иллюминаторов. Поэтому была поставлена задача — определить предельно допустимые параметры каверны для стеклянных дисков иллюминаторов, чтобы затем в процессе мониторинга иллюминаторов проводить оценку состояния каверны и по мере приближения ее к критическим размерам предпринимать необходимые меры по восстановлению второго контура герметичности, например, установить на иллюминатор герметизирующую крышку.

Контроль состояния иллюминаторов осуществляется экипажем с периодичностью два раза в год. На стеклах иллюминаторов обнаружены десятки мелкократерных повреждений размером до 1 мм от микрометеороидов и мелкой фракции орбитального космического мусора (ОКМ). Имеются также отдельные повреждения средних размеров (с кавернами до 4,5 мм) от субмиллиметровых частиц (рис. 3). Мелкократерная эрозия и каверны имеют масштаб, превышающий размеры дефектов трещиноватого слоя, образующегося при обработке поверхности стекол, и находятся на растянутой поверхности наружного стекла иллюминатора. В окрестности ударного кратера в каверне лицевого скола возникают сконцентрированные зоны микро- и макротрещин в диапазоне размеров от микронов до миллиметров, в т. ч. и невидимые, процесс развития которых во времени определяет прочностной ресурс поврежденного стекла.



**Рис. 2. Конструкция иллюминатора:** 1 — внутреннее стекло; 2 — внешнее стекло; 3 — межстекольное пространство



Рис. 3. Состояние иллюминатора МКС после десяти лет эксплуатации: 1 — каверна; 2 — царапина

Это может привести к разрушению стекла быстрому (в случае превышения действующими напряжениями остаточной прочности), либо в долговременном режиме продолжения его эксплуатации (от действующих напряжений ниже кратковременного уровня остаточной прочности поврежденного стекла).

Прогнозирование остаточного ресурса стекол иллюминаторов является комплексной проблемой, включающей *учет осколочно*- метеороидной обстановки на орбитах [1], оценку вероятности ударов, особенности прочности хрупкого стекла с кратерными повреждениями, а также проведение наземного экспериментального моделирования удара и последующего выдерживания поврежденных стекол под действующей нагрузкой.

Для решения вышеописанных проблем необходимо:

• определение минимального критического размера  $D^*$  ударной каверны, при котором происходит мгновенное разрушение стекла под действующей нагрузкой (по данным экспериментов [2] для силикатного стекла толщиной 15 мм  $D^* = 30...35$  мм при глубине кратера p = 4...5 мм от удара алюминиевой частицы размером  $d \approx 1,3$  мм со скоростью  $V \approx 7$  км/с).

• расчетно-экспериментальное определение временного ресурса  $\tau(D)$  (времени с момента появления каверн субкритических размеров  $D < D^*$  на стекле до его разрушения).

Эта программа начала реализовываться на экспериментальной базе ударной прочности ЦНИИмаш совместно с РКК «Энергия». Ниже излагаются полученные результаты.

#### Прочностные характеристики стекла

Разрушение стекла связано с возникновением в нем наблюдаемой трещины, в процессе ее развития происходит быстрое хрупкое разрушение стекла под статической нагрузкой. Хрупкость стекла характеризуется малыми значениями предельной деформации є<sub>щ</sub> = 0,11...0,13%. Прочность стекла определяется на стандартных образцах в виде круглых пластинок диаметром 22±0,1 мм и толщиной 1±0,05 мм, прошедших глубокое шлифование и полирование (ГШП), при стандартных для хрупких материалов испытаниях на осесимметричный чистый изгиб с кольцевой опорой диаметром 10 мм и кольцевым пуансоном диаметром 4 мм [3, 4] в течение 5...10 мин. Испытания проводятся на серии около 30 образцов одной поставки (плавки). При этом прочность стекла на изгиб, необходимая для обычных условий его применения, характеризуется математическим ожиданием (о); минимальное значение  $\sigma_{\min}$  характеризует безопасный уровень, а максимальное  $\sigma_{max}$  — возможный технологический резерв. Существенный для стекла разброс значений σ (~30%) характеризуется коэффициентом вариации V (отношение среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{vv}$  к математическому ожиданию  $\langle \sigma \rangle$ ). Разброс обусловлен наличием микротрещин, которые снижают реальную прочность стекла по сравнению с ее теоретическим значением.

В табл. 1 приведены прочностные параметры кварцевых стекол, используемых в иллюминаторах МКС, — отечественного марки КВ и американского марки *Corning* 7940.

Таблица 1

### Прочностные характеристики отечественных и американских кварцевых стекол иллюминаторов МКС

Марка стекла	σ <sub>min</sub> , ΜΠa	⟨σ⟩, МПа	σ <sub>max</sub> , ΜΠa	σ <sub>ск</sub> , МПа	V, %
КВ	48	122	265	40	32
Corning 7940	59	72	_	10	14

Отметим существенно более высокое (на 23%) значение  $\sigma_{\min}$  кварцевого стекла *Corning* 7940 по сравнению с КВ при вдвое меньшем разбросе и меньшее (на 43%) значение  $\langle \sigma \rangle$ .

Для оценки вероятности разрушения стекол иллюминаторов важны статистические распределения характеристик прочности кварцевых стекол. По приведенным характеристикам рассчитаны нормированные нормальные дифференциальное  $f(\sigma)$  и интегральное  $F(\sigma)$  распределения прочности рассматриваемых стекол. Интегральное распределение задает верхнюю оценку прочности квантилями высокого уровня. Например, квантиль уровня 0,95 — значение  $\sigma_{0.95}$  прочности, для которого  $F(\sigma_{0.95}) = 0.95$ . То есть, вероятность того, что прочность стекла не превышает квантиля, составляет 95% о. Тем самым определяется вероятность разрушения стекла при превышении расчетным значением напряжения этой верхней оценки. Интегральное распределение позволяет не только оценить степень опасности больших напряжений, но и установить степень безопасности малых напряжений расчетом квантилей низкого уровня. Например, квантиль уровня 0,05 — это значение  $\sigma_{0.05}$  прочности, для которого  $F(\sigma_{0.05}) = 0.05$ . То есть, вероятность того, что прочность стекла не превышает квантиля, составляет всего лишь 5%, так что с надежностью 95% этот квантиль можно считать безопасным уровнем напряжений. Распределения прочности кварцевых стекол КВ и Corning 7940, оптического стекла К8 и силикатного ФП представлены на рис. 4.

Соответствующие безопасные (с надежностью 99%) напряжения  $\sigma_{0,01}$  составляют 34 и 48,7 МПа. Видно, что оба распределения для кварцевого стекла КВ занимают промежуточное положение между распределениями оптического стекла К8 и силикатного ФП. Безопасное напряжение 34 МПа для КВ также находится между его значениями 30,6 МПа для К8 и 36,6 МПа для ФП.



Рис. 4. Нормальные распределения прочности различных стекол: а — дифференцальное f (Corning 7940 — по правой оси ординат; слева — стекла отечественного производства); б — интегральное F; 1 — Corning 7940; 2 — ФП силикатное; 3 — KB; 4 — K8

Распределения для стекла *Corning* 7940 отличаются меньшим разбросом показателей прочности, что свидетельствует о высокой стабильности технологии производства. Из интегрального распределения видно, что максимальная прочность этого стекла находится в диапазоне 100...105 МПа, т. е. вдвое ниже ее расчетных значений (240...260 МПа) для рассмотренных отечественных стекол. Экспериментальные значения о<sub>тах</sub> составляют 196, 265 и 220 МПа для ФП, КВ и К8 соответственно. Несмотря на это, а также невзирая на меньшие средние значения прочности, стекло Corning 7940 следует считать наиболее прочным, так как уровень 48,7 МПа безопасного напряжения, основного параметра при оценках риска разрушения стекла, для него значительно выше, чем для стекла КВ (34 МПа). При этом безопасное напряжение для силикатного стекла ФП 36,6 МПа несколько выше, чем для стекла КВ. Анализ результатов показывает, что безопасные (с надежностью 99%) напряжения в зоне растяжения при изгибе располагаются в порядке возрастания следующим образом:

• 34 МПа (отечественное кварцевое стекло марки КВ иллюминаторов РС МКС);

• 36,6 МПа (термополированное силикатное стекло ФП); • 48,7 МПа (американское кварцевое стекло марки *Corning* 7940 для остекления *Shuttle*).

Таким образом, прочность силикатного стекла на 8%, а американского кварцевого стекла на 43% выше, чем стекла КВ.

Стекла иллюминаторов МКС рассчитаны на длительный и подлежаший пролонгации период эксплуатации станции. Поэтому рассмотренные выше уровни кратковременной прочности нельзя использовать для определения запасов прочности стекол в реальных условиях их функционирования, так как уровни долговременной прочности значительно ниже. В стекольной промышленности для периода эксплуатации в десятки лет принимается обычно коэффициент долговременности ≥4, так что безопасные напряжения при неограниченной длительности использования стекол находятся на уровнях: 7,6 (К8); 8,5 (КВ); 9,2 (ФП) и 12,2 МПа (Corning 7940). Расчетные значения максимальных прогибов W, изгибных напряжений σ в наружных стеклах иллюминаторов РС МКС под действием эксплуатационного давления в камере между стеклами (в предположении свободного опирания по контуру) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные расчетные прогибы и напряжения в стеклах иллюминаторов РС МКС

Иллюминатор (тип)	ТСК-316.03	ТСК-316.02	ТСК-316.01
Прогиб <i>W</i> , мкм	1,25,7	20,490,6	19,586,4
Радиальное напряжение σ <sub>r</sub> , МПа	02,6	09,1	05,28
Окружное напряжение $\sigma_{_{\!\!\!\!\!\phi}},$ МПа	1,22,75	4,89,1	2,785,28

На рис. 5 представлены эпюры распределения по радиальной координате окружных и радиальных напряжений, на растянутой поверхности стекол иллюминаторов, а также прогиба под штатным давлением 0,1 МПа для свободного опирания стекла. Экспериментальные исследования по прочности поврежденных стекол необходимо проводить на штатных сборках иллюминаторов. При давлении между стеклами на уровне 0,07 МПа штатные напряжения в стеклах большинства иллюминаторов СМ находятся на уровне не более 7 МПа при коэффициенте безопасности, равном 1,2.

Главной особенностью хрупкого стекла является его низкая трещиностойкость, обусловливающая высокую чувствительность прочности стекла к состоянию поверхности, на которую влияют степень шлифовки и полировки [4]. При обработке абразивом со средним размером зерна d на поверхности стекла возникает нарушенный трещиноватый слой толщиной (2,5...3)d. Теория трещин дает связь прочности стекла с размером повреждения:

$$\sigma L^{0,5} \approx \alpha K_{1c}$$

где L — размер трещины в направлении ее распространения, параметр  $\alpha$  включает коэффициент концентрации напряжений на дефекте. Экспериментальные исследования подтвердили эту зависимость прочности стекла в диапазоне  $\sigma = 15...200$  МПа при размерах дефектов в диапазоне 5 мкм...5 мм.



Рис. 5. Главные напряжения и прогиб наружного стекла иллюминаторов (стекло D = 256 мм;  $\sigma$  = 14 мм): — – радиальное напряжение; — – тангенциальное напряжение; — – прогиб стекла

Коэффициент трещиностойкости стекла $K_{1c} = [e_{\Pi}E/(1-v^2)]^{0.5}$ 

определяется упругими характеристиками ( $e_{\Pi}$ , v) и удельной энергией *E* развития трещины.

Показатель критической интенсивности напряжений

$$K_{1c} = [2\gamma_{2}E/(1-\nu^{2})]^{0.5}$$

для кварцевых стекол, используемых в российских иллюминаторах, в сухом азоте равен 0,73 МПа  $\sqrt{m}$  (для щелочного стекла 0,68...0,74 МПа при толщинах 10...15 мм и 0,54...0,58 МПа при толщинах 2...5 мм).

Величина эффективной поверхностной энергии

$$\gamma_{2} = 0.5K_{1c}^{2}(1-v^{2})/E$$

равна 2,33 мкДж/мм<sup>2</sup> для стекла КВ (3,43 мкДж/мм<sup>2</sup> для щелочного стекла), т. е. удельная энергия образования свободной поверхности у силикатного стекла примерно в полтора раза выше по сравнению с кварцевым.

Орбитальная температура стекол иллюминаторов находится в пределах ±200 °С на солнечной и затененной сторонах Земли. Тепловые свойства кварцевого стекла: удельная теплоемкость  $c = 0,60...0,77 \ Дж/г·К$ в интервале  $\pm 100 \ ^{\circ}C$  (на уровне алюминия); теплопроводность  $\lambda = 0,74 \ Br/м·К$ (на уровне кирпича); коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6} \ K^{-1}$ (на порядок ниже, чем у обычных материалов). Температурные напряжения в стекле не могут превысить уровня 3,8 МПа (в худшем случае жесткого защемления стеклянного диска по контуру).

Стойкость плавленого кварца к тепловому удару характеризуется высоким показателем термостойкости — перепадом температур, при котором происходит разрушение цилиндрического образца диаметром и длиной по 10 мм при быстром перемещении из печи в воду. Этот показатель составляет ≈1 000 °C. Отметим, что температурные изменения упругих характеристик стекол в интервале температур -65...+120 °C не превышают 1...2%.

Данные по микротвердости стекла дают представление о температурных изменениях его прочностных свойств (обычно аморфной структуры). Для кварцевого стекла микротвердость при охлаждении от 700 °С (начало размягчения) до -100 °С возрастает всего на 7%, а нагрев до 100 °С понижает ее только на 20%. Прочность полированного (ГШП) кварцевого стекла падает от 160 МПа при -200 °С до 90 МПа при 160 °С; последующее восстановление прочности до нормального значения (105 МПа) при нагреве до 400 °С, возможно, связано с уменьшением концентрации напряжений в вершинах микротрещин. В этом плане ударный нагрев стекла (в идеале с оплавлением кратера) может снизить опасность повреждения его поверхности. Следует отметить, что многократное термоциклирование стекол иллюминаторов, несмотря на невысокий уровень

температурных напряжений в стекле, наряду с бортовыми вибрациями может со временем способствовать прорастанию трещин в стеклах из зон ударных повреждений.

### Длительная прочность стекол иллюминаторов с кратерными повреждениями в осколочно-метеороидной среде

Расчетные оценки долговременной прочности стекол иллюминаторов основаны на экспериментальных данных по временной зависимости прочности стекла КВ. Имеющиеся экспериментальные данные [3, 5] для стекол КВ и ФП получены на образцах 100×100×5 мм при выдержках до 500 ч в нормальных условиях температуры (20±5) °С и влажности (60±10)%. Временная зависимость прочности стекла в обычной степенной форме  $\tau_{[cek]} = (\sigma_1 / \sigma)^{\gamma}$  получается из аппроксимации экспериментальных данных  $\lg \tau = \alpha - \gamma \lg \sigma_{[\kappa r/mn^2]}$ . При этом показатель  $\gamma$ зависит только от химического состава и структуры стекла, а коэффициент  $\alpha = \gamma \lg \sigma_1$  определяется состоянием поверхности и размером образца (здесь σ<sub>1</sub> — прочность образца при длительности нагружения τ = 1 с). Для стекла КВ получены значения  $\gamma = 20$  и  $\alpha = 12$  ( $\sigma_1 = 39$  МПа) при уровне надежности 99%. При этом вероятность разрушения стекла (задаваемый уровень надежности временного ресурса его прочности) определяется через коэффициент α по соответствующему квантилю в распределении характеристики σ<sub>1</sub>. Долговременная прочность стекла марки КВ определяется обратной аппроксимацией  $\lg \sigma_{_{[K\Gamma/MM^2]}} = 0,60 - 0,05 \lg \tau_{_{(c)}}$ . Расчетные данные для отечественных и американских стекол приведены в табл. З вместе с грубой экстраполяцией на годы.

Таблица 3

Стекла /Время	0,1 c	1 c	30 c	60 c	300 c	600 с	10 <sup>3</sup> c	1ч	1 сут	1 мес.	1 г.	10 лет
Кварцевое (Россия)	43,8	39	33	31,8	29,3	28,3	27,6	26	22	18,6	16,4	14,7
Кварцевое (США)	159	136	112	108	100	97	95	90	80	71	66	61
Силикатное (Россия)	41,8	37	31	29,8	27,4	26,4	25,7	24	20,3	17	14,9	13,2
Силикатное (США)	106	86	67	64	59	56	55	52	44	39	36	33

Долговременная прочность российских и американских кварцевых и силикатных стекол (МПа)

Видно, что переход с суточной выдержки нагрузки на годы уменьшает ресурсную прочность стекол не более, чем на 35% (отечественных) и на 25% (американских). Во всем рассмотренном диапазоне длительностей коэффициент долговременности нагружения лежит в интервале 3,1...4,2. Существенные

различия абсолютных значений прочности для отечественных и американских стекол объясняются тем, что для первых приведены безопасные уровни прочности, а для вторых их средние значения. Следует отметить, что переход в испытаниях с секундных выдержек нагрузок на минутные может дать падение экспериментальных значений прочности более чем на 20%, что может объяснять различия результатов из разных источников. Полученные расчетные оценки показывают, что ресурсная прочность стекла КВ на срок 30 лет находится на уровне 13,9 МПа (ниже кратковременной прочности на 59%), так что даже внутреннему давлению 0,1 МПа на наружное стекло иллюминатора соответствует коэффициент безопасности около 1,4.

Отметим, однако, что как ресурсная, так и кратковременная прочности характеризуют критический уровень растягивающих максимальных радиальных напряжений осесимметричного чистого изгиба в стандартной схеме испытаний стекла. Тогда как в штатных условиях нагружения стекол иллюминаторов имеет место поперечный изгиб с максимальными окружными напряжениями при меньших радиальных напряжениях. То есть, если в стандартных испытаниях поверхности стекла находятся в условиях одноосного растяжения сжатия, то в реальных условиях внешняя поверхность наружного стекла иллюминатора находится в условиях двухстороннего растяжения, а внутренняя — в условиях двухстороннего сжатия.

Для оценки прочности стекол иллюминаторов с учетом специфики ударных воздействий мелких высокоскоростных частиц необходимо экспериментально моделировать удар частиц по образцам стекла для получения повреждений, хотя бы качественно адекватных натурным (орбитальным), а затем испытывать поврежденные образцы на воздействие статических штатных нагрузок.

В отличие от пластичных материалов с кратерами относительно плавных очертаний, почти полным выносом из них материала и выступающей над поверхностью кромкой, поверхность стекла при высокоскоростном ударе образует мелкие осколки и кратер, располагающийся внутри выемки от поверхностного лицевого скола, частично незавершенного и часто неправильной формы, особенно при косых ударах. При этом кратер под поверхностью скола окружает зона отходящих мелких трещин (нарушающих прозрачность стекла), распространяющихся не только вдоль поверхности, но и в глубину слоя. Микротрещины простирания, при очень малом изгибе стекла от удара, развиваются в магистральные, пронизывающие всю толщину слоя. В тонких стеклах трещины по толщине после выхода на тыльную поверхность образуют зону пробоя, большая часть которой остается заполненной сцепленными мелкими осколками неправильной формы, а в более толстых стеклах

возможно возникновение тыльного откола под зоной растрескивания.

Приведем эмпирические зависимости параметров кратеризации (диаметр и глубина кратера, размер каверны лицевого скола) от параметров ударного воздействия. На практике масштаб малого повреждения удобнее всего характеризовать измеряемым средним размером D (мм) каверны. Анализ экспериментальных данных [6, 7, 8, 9] для кварцевых стекол марок *Corning* 7940 и КВ показывает, что в диапазонах параметров D = 6...56 мм и импульсов частицы I = 0,2...10,0 мг·км/с между ними существует удовлетворительная (с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,928$ ) корреляция вида  $D = 18,556I^{0.4795}$ .

Глубина каверны обычно составляет 10...20% ее диаметра. Установлена [8] также корреляция диаметра каверны лицевого скола D с энергией E частицы в диапазоне E = 0,2...32 Дж (при уровне детерминации  $R^2 = 0,882$ ):  $D = 13,3E^{0,4152}$ .

Эта зависимость позволяет идентифицировать энергию частицы, образовавшей кратер, наблюдаемый при бортовом мониторинге, и планировать эксперимент по имитации обнаруженного повреждения в наземных условиях. При одинаковых параметрах удара каверны в силикате существенно меньше, чем в кварце. Установленные зависимости могут быть использованы при планировании экспериментов по нанесению повреждений с необходимыми параметрами на образцы, предназначенные для последующих испытаний на длительную прочность.

Остановимся детальнее на проблеме остаточной прочности стекол с ударными кратерными повреждениями поверхности. Изгибную жесткость пластины в целом при малой зоне мелкого повреждения (глубина каверны лицевого скола на порядок меньше ее размера) можно считать ненарушенной, и по экспериментально находимой несущей способности пластины можно расчетом оценить изгибную остаточную прочность стекла в поврежденной зоне. Имея в виду также концентрацию напряжений в поврежденной зоне, следует считать остаточную прочность некоторой эффективной определяемой характеристикой. Статистическая нижняя оценка остаточной прочности стекла о, с нахождением по экспериментальным данным квантиля низкого уровня требует испытаний не менее 30 пластин стекла с близкими картинами повреждений (прежде всего размерами каверн D), не говоря уже об установлении корреляции σ<sub>0</sub> в нужном диапазоне значений D. С учетом немалых затрат на большие образцы (300×300×14 мм) кварцевого стекла с глубокой шлифовкой и полировкой поверхностей и на эксперименты по высокоскоростному удару такая экспериментальная программа требует серьезного материального обеспечения и поэтапной реализации. Полученные совместно со специалистами НИИ технического стекла экспериментальные результаты для стекла марки КВ на малых образцах  $100 \times 100 \times 5$  мм с кавернами D = 9...39 мм, полученными от удара алюминиевой частицей диаметром d (мм), характеризуются большим разбросом при малом количестве испытаний и дают лишь предварительные оценки масштаба падения прочности стекол с ударными кавернами (табл. 4).

### Таблица 4

Остаточная прочность образцов

№ эксп.	<i>d</i> , мм	Повреждение <i>D/p</i> , мм	σ <sub>ост</sub> , МПа
1	0,6	21/0,4	24,5
2	0,6	9/1	29,4
3	0,6	23/0,4	24,5
4	0,7	14/2,8	16,7
5	1,0	11/1,3	28,4
6	1,0	23×18/1,3	28,4
7	1,0	39/2,3	24,5*
8	1,0	31/1,6	23,5
9	1,0	39	22,5
10	1,0	35/1,6	23,5

Примечание. \* — остаточная прочность необъяснимо велика (ср. с экспериментом 4). Прочность неповрежденного кварцевого стекла характеризуется значениями 48...127...265 МПа при среднеквадратичном отклонении 40,2 МПа.

Видно, что остаточная прочность кварцевого стекла падает на 14...34% относительно нижнего уровня (34 МПа) его прочности. Однако для отечественных стекол отсутствует статистически репрезентативный набор данных по остаточной прочности образцов с ударными кавернами. Для стекла марки *Corning* 7940 большой объем испытаний (сотни образцов) позволил установить эмпирическую зависимость остаточной прочности (в МПа) от размера каверны (в мм) с надежностью 0,9 [6]:

$$\sigma_0(D) = 25,862D^{-0,3563}.$$
 (1)

В частности, по результатам испытаний уникальных образцов стекла с натурными (орбитальными) кратерными повреждениями остекления  $p \approx 0,2...0,3$  мм иллюминаторов *Shuttle* в экспедициях *STS*-20, 31, 310, 410 и 416 установлено падение прочности стекла *Corning* 7940 с нижнего уровня 49 МПа до остаточных величин 26...39 МПа. На основе проведенных экспериментов получены расчетные верхние оценки энергетических затрат на повреждение (дробление и трещинообразование в окрестности каверны) кварцевого стекла при ударных испытаниях путем вычитания только энергии разрушения алюминиевой частицы из энергии удара. Результаты расчетов дают зависимость энергии (мДж) от размера каверны (мм):

$$E_{\rm gp} = 5,35D^{2,0764} \tag{2}$$

с детерминацией  $R^2 = 0,841$ , причем близость к двойке показателя степени размера каверны подтверждает затраты энергии в стекле на трещинообразование свободных поверхностей. Исходя из удельной энергии образования поверхности  $\gamma_{2} = 2,33$  мкДж/мм<sup>2</sup>, находим для каверны миллиметрового размера верхнюю оценку масштаба трещинообразования в ее окрестности (~10 см<sup>2</sup>). По-видимому, такие оценки завышены из-за неучета энергии выброса алюминия и стекла из каверны и волнового уноса. С другой стороны, подстановка обратной зависимости  $D = 0,4459 E_{m}^{0,4816}$  в представленную выше корреляцию остаточной прочности с размером каверны (1) дает оценки зависимости остаточной прочности кварцевого стекла Corning 7940 от энергии его дробления в ударной каверне (в принятых размерностях)

$$\sigma_0(E_{\rm AP}) = 34,486E_{\rm AP}^{-0.1716}.$$
 (3)

Эта зависимость получена экспериментально и может использоваться в диапазоне  $E_{\rm дp} = 100$  мДж...10 Дж. Сравнение со значениями прочности неповрежденного стекла *Corning* 7940 свидетельствует о том, что некоторый небольшой кратер на поверхности стекла является концентратором напряжений и инициатором развития трещин в хрупком стекле под нагрузкой. При этом увеличение размера кратера понижает прочность стеклянной пластины не столь значительно, как сам факт возникновения кратера.

При известных штатных напряжениях в стеклах иллюминаторов приведенные зависимости позволяют оценить критические уровни кратерных повреждений, приводящие к быстрому разрушению наружного стекла конкретного иллюминатора в случае превышения фактическими напряжениями остаточной прочности поврежденного стекла.

# Экспериментальное моделирование ударов частиц по образцам стекол иллюминаторов

При имитации высокоскоростных ударов орбитальных частиц по образцам стекла наиболее сложной является разработка экспериментальных схем и средств метания со скоростями до 10 км/с алюминиевых и боросиликатных частиц субмиллиметрового размера. Эту проблему нельзя считать решенной, если учитывать необходимость контроля параметров удара (сохранность, размер и скорость частицы) и сохранения целостности образца стекла после удара наряду с чистотой единичного мелкого кратера. Каждое такое испытание требует немалых затрат (особенно на дорогостоящие образцы кварцевого стекла) и в некотором смысле уникально, а зависимость прочности стекла от набранной статистики требует испытаний десятков образцов на каждый режим. Экспериментальные трудности ускорения частиц размером 0,1...1 мм до скоростей уровня 7 км/с общеизвестны, поэтому возникает вопрос о возможностях моделирования нужных повреждений поверхности стекла при других условиях удара. В работе [8] предлагается методика энергетического моделирования кратерных повреждений на поверхности стекла переходом на удар частицами с большей массой и меньшей скоростью соударения, основанная на полученных выше энергетических зависимостях (1–3). Меньшая скорость удара при моделировании приводит, естественно, к уменьшению давления в проходящей по толщине стекла ударной волне. Максимальные давления и массовые скорости, возникающие в кварцевом стекле в зоне удара алюминиевой частицы со скоростью *V*, иллюстрирует рис. 6.



Рис. 6. Зависимость скорости U и давления P в кварцевом стекле от скорости удара алюминиевых и стальных частиц

Испытания проводились на пороховой баллистической установке (ПБУ) (рис. 7). Установка обеспечивает испытания при скоростях 0,1...2,0 км/с для частиц 0,1...5,0 г (размером 2...12 мм).





**Рис. 7. Пороховая баллистическая установка:** *а* – *схема; б* – общий вид



Для субмиллиметровых частиц диапазон скоростей разгона может быть расширен до 3...4 км/с. Для имитации ударов ОКМ по стеклу использовались шарообразные частицы из алюминиевого сплава 2017-Т4 ( $\sigma_{\rm B}$  = 425 МПа) и компактные цилиндрические частицы из сплава Д-16Т ( $\sigma_{\rm B}$  = 450 МПа). Удары производились по нормали к поверхности образца. Отработка режимов соударения проводилась на малых (100×100×15 мм) образцах силикатного стекла и перед зачетными испытаниями на больших (300×300×15 мм) образцах.

Для достижения скоростей в диапазоне 2...5 км/с применяется двухступенчатая схема разгона частицы, где в качестве второй ступени используется отсекатель поддонов со специальным сужающимся коническим каналом.

По высокоскоростным испытаниям кварцевых стекол (V = 6,78...7,3 км/с частицами размера d = 0,4 мм) имеются только данные [7]. Энергия и импульсы ударов уменьшаются на порядок (по сравнению с ударом V = 7,11 км/с частицы d = 0,8 мм по силикатному стеклу) до значений E = 2,15...2,5 Дж и  $I = (6,5...7) \cdot 10^{-3}$  кПа·с·см<sup>2</sup>, что приводит к уменьшению размеров каверн до значений D = 10,2 мм (для частицы d = 0,8 мм – каверна D = 25 мм) для силикатного стекла, D = 13,5 мм для стекла *Corning* 7940 и D = 15,5 мм для стекла KB (больше, чем в силикатном стекле и американском кварцевом) (рис. 8).



Рис. 8. Ударные повреждения различных стекол: a - сили $катное стекло марки ФП; <math>E = 2,154 \ Дж/I = 0,00648 \ \kappa\Pi a \cdot c \cdot c m^2;$  $V = 6,78 \ \kappa m/c; D = 10...10,5 \ ms; слубина кратера <math>h_{xp} = 0,71 \ ms;$ диаметр кратера  $d_{xp} = 3,5 \ ms; 6 - \kappa варцевое стекло марки KB;$  $E = 2,289 \ Дж/I = 0,00668 \ \kappa\Pi a \cdot c \cdot c m^2; V = 6,99 \ \kappa m/c; D = 14,2...17 \ ms;$  $h_{xp} = 0,67 \ ms, d_{xp} = 3 \ ms; 8 - \kappa варцевое стекло марки Corning 7940;$  $E = 2,496 \ Дж/I = 0,00698 \ \kappa\Pi a \cdot c \cdot c m^2; V = 7,3 \ \kappa m/c; D = 13,5 \ ms;$  $h_{xp} = 0,765 \ ms; d_{xp} = 3,3 \ ms$ 

В экспериментах на ПБУ основные испытания проводились на штатных кварцевых стеклах иллюминаторов при ударах со скоростями V = 2,4; 2,6; 2,7 км/с частицами размеров d = 2,8 (их осколками); 2,0; 1,1 мм с энергиями ударов E = 93; 40; 7 Дж и импульсами I = 0,79; 0,31; 0,054 кПа·с·см<sup>2</sup>. Ударные повреждения стекол иллюминаторов находились в диапазоне D = 17...36 мм. Данные этих экспериментов приведены в следующем разделе.

## Испытания на штатное нагружение стекол иллюминаторов с кратерными повреждениями

Испытания образцов стекол с кратерными повреждениями на штатную нагрузку проводились на стенде, обеспечивающем поддержание вакуума на поврежденной поверхности образца, размещенного в штатной обойме иллюминатора. Целью первого этапа испытаний было нахождение критических размеров ударных каверн, при которых происходит быстрое разрушение кварцевых стекол под штатной нагрузкой. Образцы устанавливались на переходный фланец ресивера, соединение которого с вакуумной камерой осуществлялось через клапан с ручным управлением. Переходный фланец допускает установку стекол формата 300×300 мм с прижимом по контуру Ø245 мм через резиновый уплотнитель (рис. 9, 10). Испытания на вакуум проводились следующим образом. Воздух из вакуумной камеры откачивался до давления 0,5...0,7 мм рт. ст. Затем приоткрывался вакуумный клапан и плавно в течение 5 с происходило вакуумирование ресивера до 1...2 мм рт. ст. Если образец сразу не разрушался, его выдерживали под нагрузкой еще в течение 5...10 мин.



Рис. 9. Схема нагружения образца стекла односторонним атмосферным давлением: 1 — образец стекла; 2 — ресивер; 3 — вакуумный клапан; 4 — вакуумная камера



Рис. 10. Общий вид образца при испытаниях

На установке ПБУ на кварцевых стеклах смоделированы ударные каверны размеров D = 10...36 мм с простиранием зоны растрескивания на визуальные глубины до 7 мм.

Картины ударных повреждений поверхности кварцевого стекла при убывании интенсивности ударов показаны на рис. 11, а; 12, а; 13, а.

На рис. 11, б; 12, б; 13, б показаны результаты испытаний на одностороннее атмосферное давление соответствующих кварцевых стекол иллюминаторов, поврежденных ударами частиц.



a)



Рис. 11. Ударные повреждения поверхности кварцевого стекла частицей размером 1,1 мм при скорости удара V = 2,7 км/с (E = 7,1 Дж, I = 0,0537 кПа-с-см<sup>2</sup>): а — ударная каверна размером 28...30 мм; 6 — результаты испытаний после нагружения

Результаты экспериментов по моделированию крупных каверн в силикатных и кварцевых стеклах, а также испытаний стекол с кавернами на фактическое нагружение атмосферным давлением свидетельствуют о правильности моделирования повреждений стекол и дают первые оценки критических размеров каверн в них.





б)

Рис. 12. Ударные повреждения поверхности кварцевого стекла алюминиевой частицей размером 2 мм при скорости удара V = 2,54 км/с (E = 39,6 Дж, I = 0,311 кПа-с-см<sup>2</sup>): а – ударная каверна размером 36 мм; б – результаты испытаний после нагружения

По результатам испытаний поврежденных стекол на штатную нагрузку атмосферным давлением установлены критические размеры каверн (для силикатных стекол  $\leq 40$  мм), приводящие к быстрому разрушению стекла. Для штатных кварцевых стекол иллюминаторов критические размеры каверн находятся в диапазоне 28...32 мм при скоростях удара V = 2,6...2,7 км/с и параметрах удара внутри диапазонов по энергиям E = 7...17 Дж и по импульсам I = 0,054...0,134 кПа·с·см<sup>2</sup>.



a)



б)

Рис. 13. Ударные повреждения поверхности кварцевого стекла алюминиевой частицей размером 2,8 мм при скорости V = 2,4 км/с (E = 92,6 Дж, I = 0,787 кПа-с·см<sup>2</sup>): а — множественное повреждение поверхности осколками разрушившейся частицы (между крупными кавернами размеров D = 10 и 17 мм образовался глубокий скол размером 8 мм); 6 — результаты испытаний после нагружения

### Результаты проведенных исследований

Воздействие осколочно-метеороидной среды на стекла иллюминаторов долговременных пилотируемых станций является фактором, который необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации станций.

В ходе проведенных исследований определены факторы, влияющие на ресурсную прочность стеклянных дисков иллюминаторов, в основном это повреждения от воздействия метеороидов и частиц космического мусора. С использованием теории трещиностойкости и степенной зависимости длительности роста трещины определены параметры критической каверны.

Проведены эксперименты на ПБУ, подтверждающие расчетные данные по оценке параметров критической каверны.

Для оценки состояния и прочностного ресурса стекол иллюминаторов МКС и будущих подобных орбитальных станций необходим регулярный бортовой мониторинг повреждений, имитация ударных повреждений в лабораторных условиях и экспериментальное определение остаточного ресурса путем испытаний на штатный (или форсированный) режим нагружения.

Необходимо создание комплексного стенда для реализации этой программы, включающего установку для высокоскоростного метания имитаторов частиц космического мусора и метеороидов и устройство для создания штатных нагрузок на поврежденные образцы стекол иллюминаторов, закрепленные в штатной обойме с имитацией вакуума.

### Список литературы

1. Protection Manual, IADC-WD-00-03, vers.3.2 rev. 12 September, 2003.

2. Nagy K., Christiansen E., Lear D., Davis B.A. ISS Russian window HVI test series (Ver.8), Phase 1: Stressed and unstressed soda lime glass // NASA/ JSC, 28 April 2010. 15 p.

3. Брест В.А., Шелюбский В.И. Прогнозирование долговечности стеклянных изделий при действии длительных переменных нагрузок // Стекло и керамика. 1991. № 9. С. 7–8.

4. Иванов А.В. Прочность оптических материалов // Л.: Машиностроение, 1989. 144 с.

5. Брест В.А., Шелюбский В.И. Прочность стекла при длительном нагружении // Стекло и керамика. 1991. № 6. С. 14–16.

6. Edelstein K.S. Strength and life analysis of service module window 13 // NASA/JSC ES2, 2009. 4 p.

7. Bernhard R., Christiansen E.L. HVI Testing of Russian glass, LMSEAT 34370 –JSC 62771, JSCHITF/NASA & Lockheed Martin, August 2004. 20 p.

8. Власов Ф. Ю., Воробъев Ю. А., Семенов В. И., Устинов В. В. Идентификация кратерных повреждений стекол иллюминаторов в осколочно-метеоритной среде // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 2(67). С. 165–171.

9. McMagon J., Christiansen E., Williams B., Lear D., Davis D.A. ISS Russian KE HVI Test Program, ver. 5 // NASA/JSC, June 2012. 28 p. Статья поступила в редакцию 11.11.2014 г.

### References

1. Protection Manual, IADC-WD-00-03, vers. 3.2 rev. 12 September 2003.

2. Nagy K., Christiansen E., Lear D., Davis B.A. ISS Russian window HVI test series (Ver.8), Phase 1: Stressed and unstressed soda lime glass. NASA/JSC, 28 April 2010, 15 p.

3. Brest V.A., Shelyubskii V.I. Prognozirovanie dolgovechnosti steklyannykh izdelii pri deistvii dlitel'nykh peremennykh nagruzok [Life prediction of glass products under the sustained variable loads]. Steklo i keramika, 1991, no. 9, pp. 7–8.

4. Ivanov A.V. Prochnost' opticheskikh materialov [Optical material strength]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1989. 144 p.

5. Brest V.A., Shelyubskii V.I. Prochnost' stekla pri dlitel'nom nagruzhenii [Glass strength under the sustained loading]. Steklo i keramika, 1991, no. 6, pp. 14–16.

6. Edelstein K.S. Strength and life analysis of service module window 13. NASA/JSC ES2, 2009, 4 p.

7. Bernhard R., Christiansen E.L. HVI Testing of Russian glass, LMSEAT 34370 – JSC 62771, JSCHITF/ NASA & Lockheed Martin, August 2004, 20 p.

8. Vlasov F.Yu., Vorob'ev Yu.A., Semenov V.I., Ustinov V.V. Identifikatsiya kraternykh povrezhdenii stekol illyuminatorov v oskolochno-meteoritnoi srede [Identification of the crater damages of the window glass in the debris-meteorite environment]. Kosmonavtika i raketostroenie, 2012, no. 2(67), pp. 165–171.

9. McMagon J., Christiansen É., Williams B., Lear D., Davis D.A. ISS Russian KE HVI Test Program, ver. 5. NASA/JSC, June 2012, 28 p.

УДК 629.78.048

### ВЫБОР КОМПЛЕКСА ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЭКИПАЖЕЙ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

© 2015 г. Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Романов С.Ю., Телегин А.А., Юргин А.В.

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

Существующий комплекс систем жизнеобеспечения Российского сегмента Международной космической станции (PC MKC) обеспечивает только частичную регенерацию воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности человека, поэтому для обеспечения эксплуатации MKC необходима доставка грузовыми кораблями дополнительных запасов воды, кислорода, пищи и ресурсных агрегатов систем жизнеобеспечения. Данная ситуация определяет необходимость создания замкнутого комплекса регенерационных систем. В статье обоснован метод выбора комплекса систем жизнеобеспечения с повышенной степенью регенерации воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности космонавтов на основе переменной массы доставляемого оборудования для последующей стадии развития MKC. При этом приведены структурные схемы работающих на борту MKC регенерационных систем жизнеобеспечения.

Основные результаты летной эксплуатации этих систем с конца 2000 г. до середины 2014 г. при обеспечении трех членов экипажа подтвердили правильность метода выбора комплекса систем жизнеобеспечения.

Рекомендовано для окончательного состава модулей РС МКС увеличить степень регенерации воды и кислорода из продуктов выделения экипажа за счет получения кислорода из диоксида углерода с использованием процесса Сабатье и регенерации воды из урины и всех влагосодержащих элементов.

**Ключевые слова:** человек, космический полет, среда обитания, комплекс систем жизнеобеспечения, регенерация воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности, переменная масса доставляемого оборудования, международные стандарты.

### SELECTING LIFE SUPPORT SYSTEM FOR THE CREWS OF LONG DURATION SPACE STATIONS

Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Romanov S.Yu., Telegin A.A., Yurgin A.V.

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

The existing life support systems on the Russian Segment of the International Space Station (RS ISS) only provide a partial recycling of water and oxygen from human waste products, and therefore, in order to support the ISS operations, additional supplies of water, oxygen, food and life-support hardware with limited service life need to be delivered by cargo vehicles. This situation makes it necessary to develop life-support systems with closed-loop recycling. The paper provides a rationale for the method of selecting a life support system with an increased efficiency of water and oxygen recycling from waste products based on the variable mass of deliverable equipment for the next stage in the ISS development. It also provides block diagrams of the recycling life support systems operating onboard the ISS.

The principal results of flight operation of these systems since the end of 2000 through mid-2014 when supporting a crew of three validated the method for selecting the life support system.

Recommendation is made for the final configuration of the ISS RS modules to increase the efficiency of water and oxygen recycling from the crew waste products by extracting oxygen from the carbon dioxide using the Sabatier process and reclaiming water from urine and all elements containing moisture.

**Key words:** human, spaceflight, habitat, life support system, water and oxygen recycling from waste products, variable mass of deliverable equipment, international standards.



ГУЗЕНБЕРГ А.С.



ЖЕЛЕЗНЯКОВ А.Г.



РОМАНОВ С.Ю.



ТЕЛЕГИН А.А.



ЮРГИН А.В.

ГУЗЕНБЕРГ Аркадий Самуилович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru

GUZENBERG Arkady Samuilovich – Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Григорьевич — руководитель НТЦ РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru ZHELEZNYAKOV Alexander Grigoryevich — Director of STC at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

РОМАНОВ Сергей Юрьевич — кандидат технических наук, генеральный конструктор пилотируемых космических комплексов РКК «Энергия», e-mail: sergey.romanov@rsce.ru ROMANOV Sergey Yurievich — Candidate of Science (Engineering), General Designer of manned space systems at RSC Energia, e-mail: sergey.romanov@rsce.ru

ТЕЛЕГИН Александр Анатольевич — начальник отдела РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru TELEGIN Alexander Anatolievich — Head of Department at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

ЮРГИН Алексей Викторович — и. о. начальника сектора РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru YURGIN Alexey Viktorovich — Acting Head of Subdepartment at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

### Введение

В ходе кратковременных космических полетов регенерация воздуха и обеспечение водой осуществляется на основе запасов, но их масса увеличивается прямо пропорционально продолжительности полета и количеству членов экипажа [1]. Поэтому в длительных орбитальных космических полетах для уменьшения грузопотока грузовых кораблей необходимо использовать системы, основанные на регенерации кислорода и воды из продуктов жизнедеятельности человека. Это — регенерация питьевой воды из конденсата атмосферной влаги и урины, удаление диоксида углерода с помощью регенерируемых поглотителей, получение кислорода за счет электролиза очищенного конденсата или урины экипажа, использование диоксида углерода для получения кислорода.

Принципиальная возможность регенерационного жизнеобеспечения человека, находящегося в замкнутом ограниченном пространстве, была экспериментально подтверждена в длительных наземных испытаниях [2].

Эти исследования позволили создать первые летные регенерационные системы. На станциях «Салют-4» (запущена на орбиту в конце 1974 г.), «Салют-6», «Салют-7» отрабатывалась первая летная система регенерации — регенерации воды из конденсата атмосферной влаги. Дальнейшие работы по созданию и эксплуатации летных систем позволили определить основные методы регенерации продуктов жизнедеятельности экипажа для разработки отечественных космических систем жизнеобеспечения (СЖО). Первый комплекс регенерационных СЖО эксплуатировался на космической станции «Мир».

# Комплекс СЖО орбитальной космической станции «Мир»

Станция «Мир» существовала с 1986 по 2001 г. Всего на станции работало 104 человека из 12 стран. Базовый блок был выведен на орбиту в феврале 1986 г. Затем в течение 10 лет были присоединены еще шесть модулей: пять обитаемых с научным оборудованием («Квант», «Квант-2», «Кристалл», «Спектр», «Природа») и шестой — стыковочный. Непрерывное пребывание трех членов одного экипажа на станции «Мир» составляло в основном 6...12 мес., а его снабжение запасами продуктов и сменными агрегатами осуществлялось с помощью грузовых кораблей. Трудность задачи жизнеобеспечения экипажа заключалась в присоединении к станции обитаемых модулей с перерывами в несколько лет, что потребовало наличия в разных модулях нескольких систем, выполняющих одну и ту же задачу, для обеспечения надежной работы при экипаже до шести человек (при экспедициях посещения) и возможности ремонта оборудования.

В случае использования СЖО только на запасах необходима была доставка грузов массой не менее 9,3 кг/сут на каждого члена экипажа для обеспечения кислородом, водой, пищей и удаления диоксида углерода, или ежегодная доставка 10 185 кг для экипажа из трех человек [3]. Использование регенерации воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности экипажа позволяет уменьшить величину доставляемых продуктов в несколько раз.

Поэтому разработка долговременной орбитальной станции «Мир» с непрерывным пребыванием экипажа на борту потребовала создания комплекса регенерационных СЖО.

По соображениям преемственности со станциями «Салют», надежного обеспечения экипажа и сроков запуска было принято решение использовать в базовом блоке станции «Мир» в основном СЖО на запасах веществ и продуктов. На базовом блоке была установлена только система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги (СРВ-К) [4]. Остальные регенерационные системы были установлены на модулях «Квант» и «Квант-2». Они должны были быть отработаны на Земле, функционально собраны в единый комплекс и доставлены на станцию «Мир» на этих модулях.

Основные функции средств обеспечения газового состава [5]:

• обеспечение экипажа кислородом за счет системы электролиза воды «Электрон-В» в модулях «Квант» и «Квант-2»; резервной системы на основе твердых источников кислорода в базовом блоке и в модуле «Квант» и доставки кислорода в баллонах грузовыми кораблями «Прогресс»;

• очистка от диоксида углерода при помощи системы «Воздух» на основе регенерируемых в забортный вакуум поглотителей в модуле «Квант» и в базовом блоке (в последнем — с 1998 г.), а также агрегатов на основе запасов нерегенерируемых поглотителей, доставляемых на корабле «Прогресс»;

• очистка от вредных микропримесей при помощи регенерационных средств удаления вредных примесей (БМП — блок удаления микропримесей) с термовакуумной регенерацией угольных поглотителей в модуле «Квант», нерегенерируемого фильтра вредных примесей на запасах в базовом блоке.

Аналогично проектировались средства водообеспечения комплекса СЖО станции «Мир»:

• система регенерации питьевой воды из конденсата атмосферной влаги на базовом блоке;

• система регенерации воды из урины;

• система регенерации воды из санитарногигиенической воды (обе системы на модуле «Квант-2»);

• система хранения запасов воды «Родник» (на модулях «Квант-2» и «Кристалл»);

• средства водообеспечения на запасах на всех указанных модулях.

Наземные испытания в полноразмерных макетах модулей и летная эксплуатация комплекса СЖО на модулях станции «Мир» позволили выработать основные требования к комплексу СЖО орбитальной космической станции и разработать комплекс регенерационных систем для Российского сегмента Международной космической станции.

## Основные требования к комплексу систем жизнеобеспечения

Опыт разработки и эксплуатации станции «Мир» показал, что комплекс СЖО должен разрабатываться на основе системного подхода как безопасный и надежный комплекс взаимосвязанных систем, взаимодействующий с другими системами космического объекта, совместимый с условиями космического полета, управляемый автоматически и вручную. При системном подходе необходимо учитывать [6]:

• массовый баланс комплекса и распределение его между системами;

• совместимость со всеми факторами космического полета;

• взаимодействие отдельных СЖО между собой в составе комплекса, возможность расширения их функций, возможность их замены на системы, основанные на других принципах;

• взаимодействие комплекса с бортовым комплексом управления и системой телеметрии;

• взаимодействие комплекса с другими системами космического объекта (система энергопитания, система терморегулирования и т. д.);

• взаимодействие экипажа с комплексом СЖО по управлению, техническому обслуживанию, устранению нештатных ситуаций.

Комплекс СЖО должен создаваться, исходя из минимума расходных материалов, оборудования и продуктов, для чего необходимо:

 максимальное использование продуктов жизнедеятельности экипажа — максимальная замкнутость регенерационных циклов жизнеобеспечения (для уменьшения массы грузов, доставляемых на космические станции на орбите Земли);

 максимальное уменьшение массы и объема запасаемых продуктов питания при необходимом качестве пищи;

• максимальное уменьшение запасных частей и агрегатов при необходимой надежности и безопасности полетов.

Максимальное использование продуктов жизнедеятельности решается за счет регенерации воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности человека.

Максимальное уменьшение массы и объема пищевых рационов — за счет их обезвоживания и разработки съедобных упаковочных материалов.

Максимальное уменьшение массы запасных частей и агрегатов определяется надежностью физико-химических процессов, ресурсом оборудования, оптимальным делением на заменяемые блоки, распределением холодного и горячего дублирования, наземной и летной отработкой, многофункциональностью систем, а также критерием неизвестности в космическом полете.

### Исследование массового баланса и выбор комплекса регенерационных систем жизнеобеспечения

Для сравнения различных вариантов массового баланса комплексов СЖО и выбора комплекса для долговременных орбитальных станций СЖО можно условно разделить на две группы: • системы обеспечения массообмена человека (обеспечения кислородом, очистки от диоксида углерода, водообеспечения, удаления вредных примесей, обеспечения продуктами питания);

• системы обеспечения параметров и комфортных условий среды обитания (системы контроля газовой среды, контроля и регулирования общего давления атмосферы; системы хранения, приготовления и приема пищи; системы санитарно-гигиенического обеспечения, включая удаление продуктов жизнедеятельности экипажа, средства индивидуальной защиты) [1].

Именно системы первой группы обеспечивают регенерацию воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности человека и в первую очередь определяют переменную массу комплекса СЖО. Выбор конкретных систем и реализуемых процессов в группе систем обеспечения массообмена человека определяет степень замкнутости регенерационного комплекса СЖО.

Любые СЖО, независимо от того, регенерационные они или нет, включают элементы с ограниченным ресурсом и расходуемые материалы, требующие замены или восполнения в длительном полете. Регенерационные системы, в отличие от систем на запасах, требуют дополнительных массо-энергетических затрат на процессы собственно регенерации, но одновременно значительно уменьшают массу расходуемых элементов и экономят средства на удаление отходов жизнедеятельности.

 $M_{oбщ} = M_{nocr} + M_{энерr} + M_{стр} + nM_{перем}$ , где  $M_{oбщ}$  — общая масса системы;  $M_{nocr}$  — постоянная масса оборудования системы;  $M_{энерr}$  — эквивалентная масса энергии, затрачиваемой на работу системы;  $M_{стр}$  — эквивалентная масса тепла, сбрасываемого (подводимого) при работе системы;  $M_{перем}$  — переменная масса оборудования на одни сутки полета; n — количество суток полета.

Под переменной массой (кг/чел в сутки) понимаются массовые затраты на расходуемые элементы (запасы с конструкцией хранения), которые восполняются доставкой на орбитальную станцию грузовыми кораблями. По приблизительным оценкам требуется 0,4 кг/вт энергии и 0,6 кг/вт на сброс (подвод) тепла из системы терморегулирования. Постоянная масса регенерационной системы на одного человека не превышает 50-60 кг (системы разрабатывались производительностью на трех-четырех человек с соответствующим запасом). С учетом энергопотребления и сброса тепла эти цифры увеличатся примерно вдвое. Постоянная масса системы на запасах при тех же условиях в 10-15 раз меньше массы регенерационной системы, но переменная масса в несколько раз больше. При трех членах экипажа уже при длительности ~20 сут массы систем (регенерационной и на запасах) сравниваются, и при дальнейшем увеличении длительности нарастание общей массы определяется ее переменной составляющей.

По нашим расчетам общая масса расходуемых веществ (продуктов) с конструкцией комплекса СЖО на запасах составляет 10,10 кг/чел в сутки, тогда как суточный расход при регенерации всей воды и кислорода будет определяться запасом обезвоженных продуктов питания и сборниками обезвоженных твердых отходов и составит 1,25 кг/чел в сутки.

В качестве критериев, определяющих рациональный выбор комплекса СЖО для длительных пилотируемых полетов, предлагаются переменная масса (массовые затраты на расходуемые элементы и оборудование) и степень сложности процессов регенерации. При этом принято, что массы запасных агрегатов одинаковы для всех комплексов.

При общем требовании максимальных ресурсов и минимальной массы оборудования СЖО принципиально важен анализ массового баланса и выбор на его основе регенерационного комплекса и используемых процессов регенерации для обеспечения максимальной замкнутости по составляющим массообменного баланса человека.

Физико-химический регенерационный комплекс СЖО не может быть полностью замкнутым в настоящее время, так как возможны только регенерация воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности человека, а процесс регенерации пищи отсутствует, и потому необходимо использование запасов пищи и удаление части неперерабатываемых отходов жизнедеятельности. Степень замкнутости физико-химического регенерационного комплекса, кроме реализации и эффективности процессов регенерации, определяется составом рациона питания и количеством воды, присутствующей в рационе. Применяемый на орбитальных станциях «Мир» и МКС рацион питания содержит в среднем 0,6 кг сухой массы и 0,5 кг воды на человека в сутки. Разработка съедобной упаковки уменьшит массу сухой составляющей пищи.

В комплексе регенерационных систем воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности человека существуют две различающихся проблемы — для регенерации воды необходим прежде всего выбор способа очистки ее от примесей, тогда как для регенерации кислорода (извлечения его из диоксида углерода и воды) необходим прежде всего выбор химического процесса (реакции).

Проект комплекса жизнеобеспечения долговременного космического полета человека основывается на балансе массообмена потребляемых и выделяемых человеком веществ (ГОСТ Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате»), на основе которого представлены данные в нашей статье [7].

Выбор комплекса СЖО осуществляется по следующему предложенному нами алгоритму (рис. 1). При этом для МКС, как для станции, ограниченной сроками эксплуатации, выбор процесса был ограничен реакцией Сабатье, дающей возможность улучшить массовые характеристики доставляемого оборудования как минимум в полтора раза.



Рис. 1. Алгоритм выбора комплекса систем жизнеобеспечения

Общее количество кислорода, содержащееся в выдыхаемом человеком диоксиде углерода, составляет 0,70 кг/чел в сутки, что составляет 81% от необходимого человеку кислорода для дыхания. Остальные 19% кислорода (0,16 кг/чел в сутки) должны быть получены из выделяемой человеком воды (0,18 кг/чел в сутки), что согласуется с балансом, так как человек выделяет в сутки 0,35 кг метаболической («лишней») воды. Теоретически полное использование выделяемой экипажем воды оставляет запас воды 0,17 кг/чел в сутки.

Аналог частично замкнутого регенерационного комплекса СЖО впервые был создан и функционировал на станции «Мир» и функционирует на МКС (с системой регенерации урины после доставки ее на многоцелевом лабораторном модуле (МЛМ)). В нем осуществляется регенерация воды из атмосферной влаги и урины, а также электролизное получение кислорода из запасов воды и воды из урины и использование регенерируемых в вакуум поглотителей диоксида углерода [5, 8, 9]. Схема массообмена этого комплекса приведена в табл. 1.

### Таблица 1

Выделение	Обеспечение потребностей			Отходы
	Вода для питья и приготовления пищи <b>2,00 кг/сут</b>			В салфетках
Влага с потом и респирацией (конденсат) <b>1,50 кг/сут</b>	грация 51 из 1держа- гходов	Регенерация воды из конденсата атмосферной влаги вода 1,40 кг/сут Регенерация воды из урины (90%) вода 1,08 кг/сут		и одежде 0,10 кг/сут ————————————————————————————————————
Урина <b>1,20 кг/сут</b>	Регене вод влагосс щих от			Остаток урины <b>0,12 кг/сут</b>
Фекалии <b>0,30 кг/сут</b>				Фекалии <b>0,30 кг/сут</b> , (из них 0,15 кг воды) ————————————————————————————————————
Диоксид углерода <b>0,96 кг/сут</b>				Диоксид углерода <b>0,96 кг/сут</b>
	Вода для электролиза 0,97 кг/сут 🔸			
	Электролизная генерация кислорода из воды: $2\mathrm{H_2O} = \mathrm{O_2}{+}2\mathrm{H_2}$		слорода из воды: І <sub>2</sub>	Водород <b>0,11 кг/сут</b> →
		Кислород 0,86 кг	/сут	
3,96 кг/сут		По воде 2,48 кг/	′сут	1,58 кг/сут
омплекса на 1чел:	Получено в — регенери — из пищи Всего Расход води — для пить: — с пищей — для прои Всего Недостатор	юды: рованной воды <u>ы:</u> я и приготовления пищи зводства кислорода <b>к волы: 2.98 – 3.47 = –0.4</b>	2,48 кг/сут 0,50 кг/сут 2,98 кг/сут 2,00 кг/сут 0,50 кг/сут 0,50 кг/сут 3,47 кг/сут 9 кг/сут	
	Выделение Влага с потом и респирацией (конденсат) <b>1,50 кг/сут</b> Урина <b>1,20 кг/сут</b> Фекалии <b>0,30 кг/сут</b> Диоксид углерода <b>0,96 кг/сут</b> <b>3,96 кг/сут</b>	Выделение Вода д   Влага с потом и респирацией (конденсат) 1,50 кг/сут вотохио и гех do roout и и do rectain и 1,20 кг/сут вотохио то и do rectain и и d	Выделение Обеспечение потреб   Влага с потом и респирацией (конденсат) 1,50 кг/сут вода для питья и приготовлени вода 1,4   Урина 1,20 кг/сут вода для питья и приготовления вода 1,4   Фекалии 0,30 кг/сут Регенерация вода вода 1,4   Фекалии 0,30 кг/сут Регенерация вода вода 1,0   Фекалии 0,30 кг/сут Вода для электро вода для электро Электролизная генерация кие 2H <sub>2</sub> O = O <sub>2</sub> +2F   Сонски углерода 0,96 кг/сут Электролизная генерация кие 2H <sub>2</sub> O = O <sub>2</sub> +2F   Обесго Кислород 0,86 кг   З,96 кг/сут Получено воды: – регенерированной воды – из пищи   Омплекса на 1чел: Раскод воды: – для питья и приготовления пищи – с пищей – для производства кислорода Всего   Недостаток воды: 2.98 – 3.47 = -0.4	Выделение Обеспечение потребностей   Вода для нитья и приготовления ници 2,00 кг/сут   Влага с потом и респирацией (конденсат) 1,50 кг/сут вода для нитья и приготовления пици 2,00 кг/сут   Урина 1,20 кг/сут вода 1,40 кг/сут   Фекалин 0,30 кг/сут Регенерация воды из урины (90%) вода 1,08 кг/сут   Фекалин 0,30 кг/сут Вода для электролиза 0,97 кг/сут   Диоксид углерода 0,96 кг/сут Вода для электролиза 0,97 кг/сут   Электролизная генерация кислород из воды: 2H <sub>2</sub> O = O <sub>2</sub> +2H <sub>2</sub> Соруд 0,86 кг/сут Получено воды: - регенерированной воды 2,48 кг/сут   Получено воды: 2H <sub>2</sub> O = O <sub>2</sub> +2H <sub>2</sub> Омплекса на 1чел: Раскод воды: - для питья и приготовления пици 2,00 кг/сут   Раскод воды: - для питья и приготовления пици 2,00 кг/сут   Всего 2,98 кг/сут   Всего 2,98 кг/сут   Сул всего 2,08 кг/сут   - для питья и приготовления пици 2,00 кг/сут   - для питья и приготовления пици 2,00 кг/сут   - для питья и приготовления пици 2,07 кг/сут   Всего 3,47 кг/сут

#### Массообмен в комплексе СЖО с регенерацией воды («Мир», МКС начальный)

Степень замкнутости по воде (соотношение регенерируемой массы к выделяемой) — 87% при количестве воды в рационе питания 0,5 кг при непрерывной работе системы. Доставляемые запасы воды — 0,49 кг/чел в сутки (по расчету для МКС без системы регенерации урины доставляемые запасы воды должны составлять 1,57 кг/чел в сутки). В этом комплексе происходит потеря воды с фекалиями, с салфетками и одеждой, а также за счет неполной регенерации урины (потери — 10%).

На станции «Мир» по процессу регенерировалось 80% воды из урины, количество регенерированной воды при непрерывной работе системы должно было составлять 2,36 кг/сут, степень замкнутости по воде — 83%. Реальная степень замкнутости составила 56%, так как система работала ограниченное время, в основном из-за лимита энергопотребления.

Наиболее простым процессом регенерации кислорода из диоксида углерода является реакция Сабатье с дальнейшим электролизом образующейся воды [4, 10].

 $CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O$  — реакция Сабатье при (260...300) °C (с использованием катализатора), с удалением метана и частично диоксида углерода.  $2H_2O = 2H_2 + O_2 -$ **электролиз**  $H_2O$  с возвращением водорода в реакцию с диоксидом углерода.

В связи с потерей части водорода с метаном, диоксид углерода не может быть использован полностью для получения воды с целью извлечения из нее кислорода.

С целью возврата водорода была рассмотрена реакция пиролиза метана  $CH_4 = C + 2H_2$  при температуре (1 030...1 100) °С (с использованием катализатора). Однако при этом на конструкции реактора образуется трудно удаляемый углерод, поэтому процесс по этой реакции не рекомендован к использованию.

Реакция Сабатье легко осуществима за один проход газового потока, это самый распространенный способ извлечения кислорода из диоксида углерода с получением первоначально воды и ее дальнейшим электролизом. При отсутствии пиролиза метана при реакции Сабатье можно использовать только 61% выделяемого человеком диоксида углерода (с учетом водорода, образующегося при разложении дополнительных к диоксиду углерода 0,18 кг/сут воды), потери кислорода в этом случае составят 39% (0,27 кг/чел в сутки) от имеющегося в диоксиде углерода или 31,5% от всего необходимого человеку кислорода
для дыхания. То есть при использовании процесса Сабатье необходим дополнительно электролиз воды 0,18 + 0,30 = 0,48 кг/чел в сутки.

В табл. 2 приведена схема массообмена в частично замкнутом регенерационном комплексе СЖО, основа которого – искусственный круговорот воды за счет переработки всех влагосодержащих отходов и регенерация кислорода из диоксида углерода с помощью процесса Сабатье с промежуточной выработкой воды. Все средства массообмена человека в этом комплексе являются регенерационными (система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги, система регенерации воды из урины, средства регенерации воды из фекалий, система концентрирования диоксида углерода, система гидрирования диоксида углерода, система кислородообеспечения на основе электролиза воды). Степень замкнутости по воде – 100%, при существующем количестве воды в рационе питания (0,5 кг), степень замкнутости по кислороду — 50%. В этом случае по балансу воды имеется избыток 0,36 кг/сут на одного человека, который позволяет отказаться от доставки воды на станцию. Кроме того, обезвоживание фекалий практически останавливает их разложение, что значительно повышает безопасность их хранения и позволит в будущем уменьшить содержание воды в рационе питания и, соответственно, массу рациона питания.

Из диоксида углерода получают только 61% содержащегося в нем кислорода, что составляет 0,43 кг/сут или 50% от всего необходимого человеку количества в сутки. Весь недостающий кислород — оставшиеся 50% получается за счет электролиза воды.

В табл. З представлена схема массообмена аналогичного комплекса СЖО, но с полностью обезвоженным рационом питания. В этом случае мы имеем такую же степень замкнутости по воде — 100%, как и в табл. 2, но масса рациона питания уменьшается на 0,5 кг/сут, а недостаток воды составляет лишь 0,14 кг/сут. Недостающая в балансе вода может быть получена при полном извлечении кислорода из диоксида углерода.

Таблица 2

Массообмен в комплексе СЖО с регенерацией воды и частичной регенерацией кислорода при обводненном рационе питания (МКС окончательный)

Потребности	Выделение	Обеспечение потребностей			Отходы
		Вода для приготовления пищи и питья 2,00 кг/сут			
	Влага с потом и респирацией (конденсат) <b>1,50 кг/сут</b>	Регенерация воды из конденсата атмосферной влаги (100%) вода 1,50 кг/сут		з конденсата ги (100%) г/ <b>сут</b>	
Вода для питья и приготовления пищи <b>2,00 кг/сут</b>	Урина <b>1,20 кг/сут</b>	нерация 1 госодерж отходов	Регенерация воды из урины (100%) вода 1,20 кг/сут		
Пища <b>1,10 кг/сут</b> (в т. ч. 0,50 кг/сут воды)	Фекалии <b>0,30 кг/сут</b> (в т. ч. <b>0,15 кг/сут воды</b> )	Реге из вла	Регенерация воды из фекалий вода 0,15 кг/сут		Сухая масса фекалий <b>0,15 кг/сут</b>
Кислород <b>0,86 кг/сут</b>	Диоксид углерода <b>0,96 кг/сут</b>	орода из газа	Переработка углекислого газа по реакции Сабатье: CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> = CH <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O вода 0,48 кг/сут		СО <sub>2</sub> 0,37 кг/сут СН <sub>4</sub> 0,21 кг/сут
*		ация кисл текислого	Водород 0,1 кг/сут	Вода для электролиза <b>0,97 кг/сут</b>	
		Ренера угу	$\begin{array}{c} \overrightarrow{O} & \overrightarrow{H} \\ \overrightarrow{O} & \overrightarrow{H} \\ \overrightarrow{O} & \overrightarrow{O} \end{array}$ Электролизная генерация кислорода из воды: $2H_2O = O_2 + 2H_2$		
i		Кислород 0,86 кг/сут			
∑ 3,96 кг/сут	3,96 кг/сут	По воде 3,33 кг/сут			0,73 кг/сут
Водный баланс комплекса:		<u>Получено воды:</u> — регенерированной воды — из пищи — воды из двуокиси углерода <b>Всего</b> <u>Расход воды:</u> — для питья и приготовления пищи — с пищей		2,85 кг/сут 0,50 кг/сут 0,48 кг/сут <b>3,83 кг/сут</b> 2,00 кг/сут 0,50 кг/сут	
		— для производства кислорода Всего Избыток воды: 3,83 – 3,47 = +0,36 г		0,97 кг/сут <b>3,47 кг/сут</b> кг/сут	

В табл. 4 обобщены результаты суточных расходов элементов в рассмотренных комплексах СЖО. При расчете суточных расходов элементов в случаях избытка воды в комплексах учитывалась только масса требуемой конструкции для хранения избытка воды.

Анализ приведенных данных свидетельствует о следующем. Только реакция Сабатье легко осуществима за один проход (табл. 4, столб. 3 и 4). Для Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) в качестве окончательного рекомендуется комплекс СЖО с этим процессом при максимальном извлечении воды из продуктов жизнедеятельности. Использование этого процесса уменьшает переменную массу в полтора раза. Обезвоживание рациона питания в сочетании с реакцией Сабатье позволит уменьшить переменную массу еще в 1,4 раза, однако это требует большого объема длительной экспериментальной отработки и может быть применено для перспективных орбитальных космических станций.

Таблица 3

# Массообмен в комплексе СЖО с регенерацией воды и частичной регенерацией кислорода при обезвоженном рационе питания (перспективный — для орбитальных станций)

Потребности	Выделение	Обеспечение потребностей			Отходы
		Вода для приготовления пищи и питья <b>2,50 кг/сут</b>			
	Влага с потом и респи- рацией (конденсат) <b>1,50 кг/сут</b>	г из вла- гходов	Регенерация в атмосферно вода 1	оды из конденсата ой влаги (100%) <b>,50 кг/сут</b>	
Вода для питья и приготовления пищи <b>2,50 кг/сут</b>	Урина <b>1,20 кг/сут</b>	ция воды жащих оʻ	Регенерация во, вода 1	ды из урины (100%) , <b>20 кг/сут</b>	
Пища <b>0,60 кг/сут</b>	Фекалии <b>0,30 кг/сут</b> (в т.ч. <b>0,15 кг/сут</b> воды)	Регенера	Регенерация вода 0	воды из фекалий <b>),15 кг/сут</b>	Сухая масса фекалий <b>0,15 кг/сут</b>
Кислород <b>0,86 кг/сут</b>	Диоксид углерода <b>0,96 кг/сут</b>	ация ца из го газа	Переработка диоксида углерода по реакции Сабатье: $CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O$ вода 0,48 кг/сут		СО <sub>2</sub> 0,37 кг/сут СН <sub>4</sub> 0,21 кг/сут,
1		тенера слоро; кисло	Водород <b>1</b> 0,1 кг/сут	Вода для электролиза 1,0 кг/сут	
		Ре ки	Электролизная генерация кислорода из воды: $2\mathrm{H_2O}=\mathrm{O_2}+2\mathrm{H_2}$		
L			Кислород 0,86	кг/сут	
∑ 3,96 кг/сут	3,96 кг/сут		По воде 3,33 кг/сут		0,73 кг/сут
Водный баланс комплекса:		<u>Получено воды:</u> — регенерированной воды — воды из диоксида углерода <b>Всего</b> <u>Расход воды:</u> — для питья и приготовления пищи — для производства кислорода <b>Всего</b> <b>Недостаток воды:</b> 3.33 – 3.47 = -0.1		2,85 кг/сут 0,48 кг/сут <b>3,33 кг/сут</b> 2,50 кг/сут 0,97 кг/сут <b>3,47 кг/сут</b> 14 кг/сут	

Таблица 4

#### Суточный расход элементов на одного члена экипажа в комплексах СЖО

№ п/п	1	2	3	4	
Варианты комплексов СЖО	Запасы H <sub>2</sub> O и O <sub>2</sub>	ОК «Мир», МКС начальная	МКС окончательная	Орбитальная станция перспективная	
		Регенерация $\mathrm{H_2O}$ , электролиз $\mathrm{H_2O}$ для $\mathrm{O_2}$			
			Переработка $\mathrm{CO}_2$ в $\mathrm{H_2O}$ (Реакция Сабатье)		
		Удаление $CO_2$ и $H_2$ полностью	Удаление $\mathrm{CH_4}$ и части $\mathrm{CO_2}$		
		Пища с водой		Пища без воды	
Переменная масса (с кон- струкцией), кг/чел в сутки	10,09	2,93	1,99	1,39	

Следует отметить, что проведенный анализ является теоретическим. Реальные балансы имеют разброс вокруг приведенных величин. Баланс потребления и выделения продуктов у разных людей различен и зависит как от массы тела, типа пищи, физической деятельности, температуры атмосферы космического объекта, так и от индивидуальных характеристик организма. Так, например, из-за большего, чем 2,5 л, суточного потребления воды большинством американских космонавтов приведенный баланс для МКС сдвинут в большую сторону. Поэтому даже при положительном теоретическом балансе на борту должен быть предусмотрен в виде «аккумулятора» запас воды с учетом производства кислорода.

Запас этот должен быть определен по результатам реальной жизнедеятельности экипажа в космическом полете. Величины в табл. 4, столб. 4 являются условно переменными, так как практически масса конструкции емкостей для воды будет заложена в массу запасов воды как постоянная величина, которая будет определяться по максимальному запасу воды, а пополняемая масса запасов явится величиной переменной.

# Состав и модернизация регенерационных систем для комплекса СЖО МКС

Начальный состав регенерационных систем комплекса СЖО МКС. МКС состоит из двух сегментов — Российского и Американского. Люки всех модулей обоих сегментов открыты, постоянно работающая межмодульная вентиляция должна обеспечивать общую одинаковую для всей станции атмосферу. Комплексы СЖО каждого из сегментов должны обслуживать трех членов экипажа.

На основании проведенного анализа выбора типа комплексов СЖО и оценки их массовых характеристик, опыта разработки систем жизнеобеспечения для станции «Мир» и их летной эксплуатации для МКС был определен состав систем комплекса СЖО, обеспечивающих регенерацию воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности человека. В связи с тем, что на МКС, так же, как на станции «Мир», должно происходить постепенное наращивание модулей, были определены начальный и максимальный окончательный составы этих систем для комплекса СЖО.

Начальный состав комплекса СЖО МКС в основном соответствует составу на станции «Мир» с учетом его летной эксплуатации и модернизации систем путем увеличения их производительности, снижения энергопотребления, введения автоматического управления с помощью бортового компьютера. При этом начальный состав систем устанавливался в выводимом одним из первых обитаемом модуле Российского сегмента — служебном модуле (СМ).

В состав регенерационных систем комплекса СЖО МКС, установленных в СМ, входили:

• система регенерации конденсата атмосферной влаги СРВК-2М;

• система кислородообеспечения на основе электролиза воды «Электрон-ВМ»;

• система очистки атмосферы от диоксида углерода на основе регенерируемых поглотителей «Воздух»;

• система удаления вредных примесей на основе регенерируемых угольных поглотителей СБМП.

Модернизация регенерационных систем для комплекса СЖО МКС. Принципиальной особенностью водообеспечения МКС является сочетание систем регенерации воды с запасами воды, пополняемыми за счет доставки на грузовых кораблях с Земли. С целью максимального извлечения конденсата для системы регенерации он собирается на всех модулях МКС и на пристыкованных кораблях.

Основным итогом модернизации системы регенерации конденсата атмосферной влаги СРВК-2М является введение в ее состав фильтра-реактора для окисления органических примесей (что увеличило почти в три раза ресурс сорбционного блока очистки) и нового блока сепарации мембранного фильтра-разделителя (увеличен ресурс разделителей почти в пять раз). Структурная схема системы представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема регенерации воды из конденсата: 3К — запорный клапан; БРПК-1, БРПК-2 — блоки разделения и перекачки конденсата; БКО — блок колонок очистки; БКВ — блок кондиционирования воды; БРП-М — блок раздачи и подогрева; КПВ — контейнер питьевой воды; ЕДВ — емкость для воды; БДД — блок датчиков давления; КТВ — контейнер технической воды; ФГС — фильтр очистки смеси; ФР — фильтр-реактор; 1, 2 — контейнер технической воды; 3 — блок раздачи и подогрева; 4 — выдача питьевой воды; 5 — вход конденсата

В комплексе СЖО МКС установлена система приема и консервации урины СПК-У совместно с элементами ассенизационной установки АСУ-8А, обеспечивающая сбор, консервацию, сепарацию урины от транспортного воздуха, подачу урины на удаление, а также сбор, изоляцию и хранение твердых отходов экипажа. Обеспечение кислородом на МКС осуществлялось за счет использования российских и американских систем электролиза, доставляемых запасов кислорода и российской резервной системы на основе запасов твердых источников кислорода.

Система электролиза воды для обеспечения кислородом «Электрон-ВМ» являлась основным источником кислорода для дыхания экипажа на борту МКС до 2008 г.

На МКС установлена модернизированная система «Электрон-ВМ» с увеличенной производительностью по кислороду 80...160 л/ч, что позволяет обеспечивать кислородом до шести человек (на станции «Мир» обеспечивалось до трех), при этом по показаниям газоанализатора регулируется производительность системы в зависимости от реального потребления кислорода. Увеличена надежность работы системы «Электрон-ВМ» за счет установки в магистраль подачи воды разделительного устройства, обеспечивающего отделение воздуха, содержащегося в водяной магистрали.

Американская система электролиза воды OGS для получения кислорода была доставлена на Американский сегмент МКС в 2008 г. Система основана на твердых полимерных электролитах. Ее преимущество — не содержит жидкой щелочи, основной недостаток по сравнению с щелочной системой — требует дополнительной очистки воды.

Схема системы кислородообеспечения PC МКС представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема средств кислородообеспечения: 1 — система «Электрон»; 2 — блок визуального контроля давления; 3 — гермокапсула блока жидкостного; 4 — вентилируемая капсула блока жидкостного; 5 — блок управления; 6 — теплоноситель системы терморегулирования; 7 — электролизер; 8 — теплообменник: 9 разделители фаз; 10 — сигнализатор жидкой фазы; 11 — кислород; 12 — водород; 13 — блок датчиков давления; 14 — водород; 15 — вход воздуха; 16 — фильтр гидрофобный; 17 — буферная емкость; 18 насосы; 19 — подача азота; 20 — блок продувки азотом; 21 — выход азота; 22 — выход воздуха; 23 — газоанализатор водорода; 24 — клапан водородный; 25 — газоанализатор кислорода в водороде; 26 регулятор перепада давления; 27 — клапан вакуумный водородный; 28 — корпус орбитальной станции; 29 — выброс водорода в вакуум; 30 — безмоментный насадок; 31 — кислород; 32 — газоанализатор водорода в кислороде; 33 — емкость для воды; 34 — блок дожигания; 35 — выход кислорода в гермоотсеки; 36 — стабилизатор тока

Очистка атмосферы МКС от диоксида углерода осуществляется российскими и американскими регенерационными системами и резервными запасами нерегенерируемых поглотителей. Для системы «Воздух», помимо ручных режимов, введены автоматические режимы изменения расхода воздуха и времени циклов, повышена надежность блока вакуумных клапанов и блока автоматики. Структурная схема системы представлена на рис. 4.



Рис. 4. Структурная схема системы очистки атмосферы от диоксида углерода: 1 — воздух из кабины; 2, 22 — осушительный патрон; 3 — блок предварительной осушки; 4, 21 — электронагреватель; 5 — система терморегулирования; 6 — газожидкостный теплообменный агрегат; 7, 20 — фильтр механический; 8 — микронагнетатель; 9, 19, 29 — поглотительный патрон; 10,18, 28 — блок вакуумных клапанов; 11 — блок очистки атмосферы; 12, 17, 27 аварийные вакуумные клапаны; 13 — корпус орбитальной станции; 14 — CO<sub>2</sub> в вакуум; 15 — безмоментный насадок; 16 — аварийный вакуумный клапан системы; 23 — воздух в кабину; 24 — перекидной клапан; 25 — вакуумный насос; 26 — клапан предохранительный

На Американском сегменте МКС для очистки атмосферы от диоксида углерода установлена система *CDRA* с регенерируемыми поглотителями — цеолитами. Цеолиты обладают существенным недостатком — они теряют свои свойства по поглощению СО, при попадании влаги.

Основная система удаления вредных примесей — российская СБМП — сорбционнокаталитическая с регенерацией угольных сорбентов и каталитическим фильтром удаления моноксида углерода и водорода при температуре обитаемой атмосферы. В состав средств удаления вредных примесей для удаления метана и углеводородов введен термокаталитический фильтр. Структурная схема системы представлена на рис. 5.

Удаление вредных микропримесей на Американском сегменте обеспечивает система *TCCS* на запасах — с нерегенерируемым заменяемым угольным поглотителем и высокотемпературным термокаталитическим фильтром. Эта система не рассчитана на удаление вредных примесей в случае пожара или выброса токсичных веществ при разгерметизации оборудования.



Рис. 5. Структурная схема системы средств удаления вредных примесей: 1 — вход воздуха из модуля в систему; 2 — фильтр предварительной очистки; 3 — вентилятор; 4 — фильтр нерегенерируемый; 5 — датчик расхода; 6 — блок микропримесей; 7, 8 — фильтры регенерируемые; 9, 10 — блоки вакуумных клапанов; 11, 12, 13 — аварийные вакуумные клапаны; 14 — каталитический фильтр; 15 — выход воздуха из системы в модуль; 16 — термокаталитический фильтр; 17 — воздух (часть потока); 18 — выброс вредных примесей в вакуум; 19 — безмоментный насадок; 20 — корпус орбитальной станции

При создании средств обеспечения газового состава МКС были заложены два основных принципа, оправдавших себя при эксплуатации на станции «Мир», особенно в нештатных ситуациях — это многофункциональность и независимость систем, не связанных функционально, друг от друга. Но к этой основной концепции добавились и новые положения повышенные комфорт и безопасность среды обитания космонавтов.

Основные результаты эксплуатации комплекса СЖО МКС. С ноября 2000 г. до июля 2014 г. система СРВ-К обеспечила ~16 500 л воды, регенерированной из конденсата атмосферной влаги. Это составило 57% потребностей экипажа в питьевой воде и 39% общих потребностей в воде на борту станции. Качество регенерированной воды полностью соответствует техническим требованиям для СМ МКС. Удельная масса расходуемых элементов для регенерации воды из конденсата атмосферной влаги составила 0,09 кг на литр регенерированной воды. Экономия массы доставляемой на МКС воды составила 19 100 кг.

Всего с августа 2000 г. до июля 2014 г. общая продолжительность работы системы «Электрон-ВМ» составила 3 547 сут, при этом было произведено 6 063 м<sup>3</sup> кислорода из 9 967 л воды, что соответствует обеспечению трех членов экипажа кислородом в течение 9,2 лет из 13,5 лет эксплуатации системы на борту МКС.

Система «Воздух» с ноября 2000 г. до июля 2014 г. (с ресурсной заменой в 2011 г.) удалила не менее 12 700 кг диоксида углерода. Эта величина соответствует удалению диоксида углерода, выделяемого тремя членами экипажа, в течение 12,0 лет из 13,5 лет эксплуатации системы на борту МКС.

Экономия массы доставляемых на МКС химических продуктов за счет работы систем «Воздух» и «Электрон-ВМ» составила ~32 000...34 000 кг.

Окончательный состав регенерационных систем комплекса СЖО МКС. В максимальный окончательный состав систем, обеспечивающих регенерацию воды и кислорода, помимо перечисленных выше систем должны входить:

• система регенерации воды из урины;

• система концентрирования диоксида углерода;

• система переработки (гидрирования) диоксида углерода по процессу Сабатье;

• система извлечения воды из фекалий;

• система извлечения воды из бытовых отходов.

Эти системы должны устанавливаться на последующих модулях по мере строительства Международной космической станции.

Требования к окончательному составу регенерационных систем МКС приведены в табл. 5.

```
Таблица 5
```

# Требования к окончательному составу регенерационных систем МКС

Системы	Производительность	
Регенерация воды из конденсата атмосферной влаги системой СРВ-К	1,50 кг·чел/сут	
Регенерация воды из урины	1,20 кг·чел/сут	
Регенерация воды из фекалий и влагосодержащих отходов	0,15 кг·чел/сут	
Переработка диоксида углерода по реакции Сабатье с получением воды	0,48 кг·чел/сут	
Электролизная генерация кислорода из воды системой «Электрон»	0,86 кг·чел/сут	
Удаление вредных примесей системой СБМП	Поддержание требуемых концентраций	
Межмодульная вентиляция	Обеспечение равномер- ного газового состава по всем модулям станции	

При построении многомодульной орбитальной станции, когда системы комплекса жизнеобеспечения расположены в разных модулях, которые к тому же соединяются со станцией с многомесячными перерывами, особое значение приобретает межмодульная вентиляция для обеспечения необходимого состава основных газов воздуха в МКС, допустимого уровня вредных примесей, нормальной температуры и влажности атмосферы. Для МКС разработана новая система регенерации воды из урины (СРВ-УМ), установленная на МЛМ. В системе СРВ-УМ вместо принципа испарения воды из урины мембранным дистиллятором при атмосферном давлении (система СРВ-У на станции «Мир») использован принцип многоступенчатой вакуумной дистилляции воды с дополнительной рекуперацией энергии в термоэлектрическом тепловом насосе. Применение этой системы позволит:

• уменьшить продолжительность цикла дистилляции;

• снизить удельное и суммарное энергопотребление в ~10 раз;

• увеличить процент извлечения воды из исходной смеси на 10% (с 80 до 90%).

Для системы концентрирования диоксида углерода и системы переработки (гидрирования) диоксида углерода по процессу Сабатье разработаны экспериментальные образцы. По системам извлечения воды из фекалий и бытовых расходов проведены только лабораторные исследования.

Предлагаемый окончательный состав регенерационного комплекса СЖО Российского сегмента МКС представлен на рис. 6.

Сложной является проблема создания обезвоженных рационов питания экипажа, которая должна решаться для последующих космических проектов.

Следует отметить, что Международной организацией по стандартизации принята разработанная российскими специалистами трехуровневая структура стандартов по интеграции человека с системами комплекса СЖО в космическом полете. Такой подход позволяет быстро разрабатывать и согласовывать отдельные стандарты по каждому виду систем жизнеобеспечения человека в космическом полете [11].



*Рис. 6. Окончательный состав регенерационного комплекса систем жизнеобеспечения РС МКС Примечание.* — – системы в многоцелевом лабораторном (МЛМ) и научно-экспериментальном (НЭМ) модулях, которые должны быть присоединены к МКС в последующие годы; — – связи систем внутри комплекса систем жизнеобеспечения.

#### Выводы

Показана необходимость максимального использования продуктов жизнедеятельности экипажа для регенерации воды и кислорода в длительных пилотируемых космических полетах.

Рассмотрен состав комплекса СЖО станции «Мир».

Предложен алгоритм выбора комплекса регенерационных СЖО для длительных пилотируемых орбитальных полетов на основе переменной массы доставляемого оборудования и степени сложности процессов регенерации.

Рассмотрен состав первоначального комплекса регенерационных СЖО МКС и на основе предложенного алгоритма с учетом реальных сроков полета станции рекомендован выбор окончательного комплекса СЖО для РС МКС.

Представлены основные результаты эксплуатации комплекса СЖО РС МКС в части использования продуктов жизнедеятельности экипажа, подтверждающие метод выбора комплекса при обеспечении трех членов экипажа в течение 13,5 лет (до июля 2014 г.):

• система СРВ-К2М произвела ~16 500 л воды, что составило 57% потребностей экипажа в питьевой воде, при этом экономия массы доставляемой на МКС воды составила 19 100 кг;

система «Электрон-ВМ» произвела
6 063 м<sup>3</sup> кислорода из 9 967 л воды, что составило 68% потребностей экипажа в кислороде;

• система «Воздух» (с ресурсной заменой в 2011 г.) удалила не менее 12 700 кг диоксида углерода, что составило 89% от выделенного экипажем диоксида углерода.

Экономия массы доставляемых на МКС продуктов за счет работы этих систем составила ~51 000...53 000 кг.

Рекомендовано для окончательного состава модулей РС МКС увеличить степень регенерации воды и кислорода из продуктов выделения экипажа за счет получения кислорода из диоксида углерода с использованием процесса Сабатье и регенерации воды из урины и всех влагосодержащих элементов.

#### Список литературы

1. Романов С.Ю., Гузенберг А.С. Космические системы жизнеобеспечения: основные требования к разработке средств жизнеобеспечения экипажей длительных космических экспедиций // Инженерная экология. 2013. № 2 (110). С. 2–15.

2. Самсонов Н.М., Бобе Л.С., Гаврилов Л.И., Кочетков А.А., Курмазенко Э.А., Томашпольский М.Ю., Романов С.Ю., Андрейчук П.О., Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Протасов Н.Н., Рябкин А.М., Телегин А.А., Григорьев А.И., Баранов В.М., Синяк Ю.Е. Опыт работы регенерационных систем жизнеобеспечения экипажей на космических станциях «Салют», «Мир» и МКС // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2008. Т. 41. № 6/1. С. 10–12.

3. Гузенберг А.С. Регенерация и кондиционирование воздуха // Космическая биология и медицина. Обитаемость космических летательных аппаратов. Т. 2. М.– Вашингтон: Наука – AIAA. 1994. Гл. 9. С. 252–296.

4. Самсонов Н.М., Бобе Л.С., Гаврилов Л.И, Кочетков А.А., Курмазенко Э.А., Томашпольский М.Ю., Романов С.Ю., Андрейчук П.О., Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Протасов Н.Н., Рябкин А.М., Телегин А.А., Григорьев А.И., Баранов В.М., Синяк Ю.Е. Опыт работы регенерационных систем жизнеобеспечения экипажей на космических станциях «Салют», «Мир» и МКС // Материалы международной конференции «Системы жизнеобеспечения как способ освоения человеком дальнего космоса». Москва. 24–27 сентября 2008 г. С. 80–81.

5. Абрамов И.П., Брюханов Н.А., Григорьев Ю.И., Зеленщиков Н.И., Романов С.Ю., Самсонов Н.М., Соколов Б.А. Системы жизнеобеспечения орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции // Известия РАН. Энергетика. 2003. № 3. С. 33–52.

6. Прошкин В.Ю., Курмазенко Э.А., Гаврилов Л.И. Системный подход к созданию комплекса регенерационных систем жизнеобеспечения для обитаемых космических станций. // 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2010». Москва. 16–18 ноября 2010 г. Тезисы докладов. СПб.: Мастерская печати. 2010. С. 145–146.

7. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования. М.: Госстандарт России, 1995. 118 с.

8. Бобе Л.С., Кочетков А.А., Самсонов Н.М., Романов С.Ю., Андрейчук П.О., Железняков А.Г., Синяк Ю.Е. Космические системы жизнеобеспечения: регенерация воды на космических станциях // Инженерная экология. 2013. № 2 (110). С. 34–50.

9. Романов С.Ю. Системы жизнеобеспечения МКС // Аэрокосмический курьер. 1999. № 2. С. 54–56.

10. Bobe L., Gavrilov L., Kochetkov A., KurmazenkoE., Andreychuk P., Zheleznyakov A., Romanov S., Sinyak Ju. Regeneration of water and atmosphere at space station: the experience gained on the Space Stations Salut, MIR, ISS and development prospects. 61th International Astronautical Congress, Prague, CZ. Copyright 2010 by the International Astronautical Federation. All rights reserved. P. 1-12.

11. Гузенберг А.С., Романов С.Ю., Телегин А.А., Юргин А.В. Разработка международного стандарта по системам обеспечения жизнедеятельности в космическом полете. // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 66–78. Статья поступила в редакцию 14.11.2014 г.

## References

1. Romanov S.Yu., Guzenberg A.S. Kosmicheskie sistemy zhizneobespecheniya: osnovnye trebovaniya k razrabotke sredstv zhizneobespecheniya ekipazhei dlitel'nykh kosmicheskikh ekspeditsii [Space Life-Support Systems: Basic requirements for the development of life-support equipment for crews of long – duration space expeditions]. Inzhenernaya ekologiya, 2013, no. 2 (110), pp. 2–15.

2. Samsonov N.M., Bobe L.S., Gavrilov L.I., Kochetkov A.A., Kurmazenko E.A., Tomashpol'skii M.Yu., Romanov S.Yu., Andreichuk P.O., Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Protasov N.N., Ryabkin A.M., Telegin A.A., Grigor'ev A.I., Baranov V.M., Sinyak Yu.E. Opyt raboty regenerationnykh sistem zhizneobespecheniya ekipazhei na kosmicheskikh stantsiyakh «Salyut», «Mir» i MKS [Operation experience of regenerative lifesupport systems of crews on Space Stations Salyut, Mir and ISS]. Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina, 2008, vol. 41, no 6/1, pp. 10–12.

3. Guzenberg A.S. Regeneratsiya i konditsionirovanie vozdukha [Air regeneration and conditioning]. Kosmicheskaya biologiya i meditsina. Obitaemost' kosmicheskikh letatel' nykh apparatov. Moscow – Washington, Nauka – AIAA publ., 1994. Vol. 2, ch. 9, pp. 252–296.

4. Samsonov N.M., Bobe L.S., Gavrilov L.I, Kochetkov A.A., Kurmazenko E.A., Tomashpol'skii M.Yu., Romanov S.Yu., Andreichuk P.O., Guzenberg A.S., Zheleznyakov A.G., Protasov N.N., Ryabkin A.M., Telegin A.A., Grigor'ev A.I., Baranov V.M., Sinyak Yu.E. Opyt raboty regenerationnykh sistem zhizneobespecheniya ekipazhei na kosmicheskikh stantsiyakh «Salyut», «Mir» i MKS [Operation experience of regenerative lifesupport systems of crews on Space Stations Salyut, Mir and ISS]. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii «Sistemy zhizneobespecheniya kak sposob osvoeniya chelovekom dal'nego kosmosa», Moscow, 24–27 september 2008, pp. 80–81.

5. Abramov I.P., Bryukhanov N.A., Grigor'ev Yu.I., Zelenshchikov N.I., Romanov S.Yu., Samsonov N.M., Sokolov B.A. Sistemy zhizneobespecheniya orbital'noi stantsii «Mir» i Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii [Life-support systems for the Mir Orbital Station and International Space Station]. Izvestiya RAN. Energetika, 2003, no. 3, pp. 33–52.

6. Proshkin V.Yu., Kurmazenko E.A., Gavrilov L.I. Sistemnyi podkhod k sozdaniyu kompleksa regeneratsionnykh sistem zhizneobespecheniya dlya obitaemykh kosmicheskikh stantsii [System approach to the development of regenerative life-support system complex for inhabited space stations]. 9-th Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika – 2010», Moscow, 16–18 november 2010. Tezisy dokladov. St.-Petersburg, Masterskaya pechati publ., 2010. Pp. 145–146.

7. GOST R 50804-95. Sreda obitaniya kosmonavta v pilotiruemom kosmicheskom apparate. Obshchie mediko-tekhnicheskie trebovaniya [Habitable Environment of a cosmonaut in the manned spacecraft. General medical and technical requirements]. Moscow, Gosstandart Rossii publ., 1995. 118 p.

8. Bobe L.S., Kochetkov A.A., Samsonov N.M., Romanov S.Yu., Andreichuk P.O., Zheleznyakov A.G., Sinyak Yu.E. Kosmicheskie sistemy zhizneobespecheniya: regeneratsiya vody na kosmicheskikh stantsiyakh [Space Life-Support Systems: water regeneration on Space Stations]. Inzhenernaya ekologiya, 2013, no. 2 (110), pp. 34–50.

9. Romanov S.Yu. Sistemy zhizneobespecheniya MKS [ISS Life-Support Systems]. Aerokosmicheskii kur'er, 1999, no. 2, pp. 54–56.

10. Bobe L., Gavrilov L., Kochetkov A., KurmazenkoE., Andreychuk P., Zheleznyakov A., Romanov S., Sinyak Ju. Regeneration of water and atmosphere at space station: the experience gained on the Space Stations SALUT, MIR, ISS and development prospects. 61th Internationa Astronautical Congress, Prague, CZ. Copyright 2010 by the International Astronautical Federation. All rights reserved. Pp. 1–12.

11. Guzenberg A.S., Romanov S.Yu., Telegin A.A., Yurgin A.V. Razrabotka mezhdunarodnogo standarta po sistemam obespecheniya zhiznedeyatel'nosti v kosmicheskom polete [Development of the international standard on life support systems for space flight]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii, 2013, no. 1, pp. 66–78.

УДК 629.78.072.8

# РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ПОДГОТОВКЕ ЭКИПАЖЕЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

#### © 2015 г. Бронников С.В.

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

Для того, чтобы подготовить экипаж космической станции к выполнению космического полета, необходимо создать систему подготовки экипажей (СПЭ) и обеспечить ее функционирование. Эти задачи могут быть решены, если заданы цели функционирования СПЭ. В статье приведены результаты выполняемых РКК «Энергия» работ по определению целей СПЭ, разработке требований к технической подготовке экипажей космической станции. Показано, что старшей системой по отношению к СПЭ является автоматизированная система управления космическим полетом, которая определяет цель функционирования СПЭ. На основе анализа процессов управления делается вывод о том, что взаимодействие между автоматизированной системой управления космическим полетом и СПЭ должно осуществляться на этапе их проектирования и эксплуатации. Рассмотрена структура целей подготовки, форма спецификатора, задающего цель, основные источники исходных данных для разработки целей. Введено понятие уровня квалификации космонавта по выполняемой задаче. Описан процесс разработки целей, критерий качества этого процесса, способы повышения его эффективности.

**Ключевые слова:** система подготовки экипажей, автоматизированная система управления космическими полетами, космическая станция, цель системы, квалификационные требования.

# DEVELOPING REQUIREMENTS FOR SPACE STATION CREW TRAINING

#### Bronnikov S.V.

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

In order to prepare a space station crew for a space mission, it is necessary to establish and support the operations of the crew training system (CTS). These tasks can be fulfilled, if the CTS operational objectives are defined. The paper provides results of the work performed at RSC Energia to define the CTS objectives, and to develop requirements for technical training of the crews of Space Station. It was shown that the system of a higher tier with respect to the CTS is the automated spacecraft mission management system (ASCMMS), which drives the objectives of the CTS operation. Based on the analysis of the management processes, a conclusion is drawn that there should communication between ASCMMS and CTS at both design and operational phases. The paper addresses the structure of the training objectives, the objective specifier format, major sources of input for the development of the objectives. The notion of the level of crew competency in the task at hand is introduced. The process of objectives development, criterion for the quality of this process, the methods for improving its efficiency are described.

*Key words:* crew training system, automated space missions management system, space station, system objective, qualification requirements.



БРОННИКОВ С.В.

БРОННИКОВ Сергей Васильевич — кандидат технических наук, начальник отделения РКК «Энергия», e-mail: sergey.bronnikov@rsce.ru BRONNIKOV Sergey Vasilievich — Candidate of Science (Engineering), Head of Department at RSC Energia, e-mail: sergey.bronnikov@rsce.ru

#### Введение

Для того чтобы подготовить экипаж космической станции (КС) к выполнению космического полета, необходимо создать и обеспечить функционирование системы подготовки экипажей (СПЭ). Под СПЭ понимается совокупность функционально взаимосвязанных учебно-тренировочных средств и обучающего персонала, обеспечивающего подготовку экипажей КС к выполнению космического полета по заданной программе.

Как и на основании чего должны формироваться и функционировать СПЭ КС, входящей в состав космического комплекса (КК) [1], разрабатываться цели и требования к СПЭ? Актуальность этого вопроса связана с тем, что от ответа на него зависит порядок проектирования, разработки и функционирования системы в составе КК, в т. ч. организация работ между предприятиями, обеспечивающими создание и эксплуатацию КК, что влияет на эффективность КК в целом.

Научные публикации по теме взаимодействия СПЭ с другими системами в составе КК, рациональной организации процесса разработки целей и задач подготовки экипажей нам неизвестны. Однако на практике этот вопрос, конечно, решался, причем по-разному на различных этапах развития космонавтики. В данной работе впервые на основе системного подхода рассмотрена технология определения целей СПЭ.

## Связи СПЭ

СПЭ, как любая другая система, может быть создана, если ей задана цель. Цель обусловливает структуру и поведение системы [2]. СПЭ — это самостоятельная система, которая должна создаваться и функционировать независимо. С другой стороны, в соответствии с принципами системного подхода, СПЭ является составной частью системы более высокого уровня. Для правильного определения цели должна быть установлена иерархия подчиненности, так как цель задает старшая система.

Выходом, продукцией СПЭ являются экипажи, которые должны функционировать в составе автоматизированной системы управления космическим полетом (АСУКП) [3], она является старшей системой по отношению к СПЭ и задает цель функционирования СПЭ [4]: сколько, к какому сроку, каких экипажей должно быть подготовлено.

КК является развивающейся системой, в которую на всем протяжении его эксплуатации вводятся новые элементы (корабли, модули, научно-исследовательское оборудование, их составные части). Программа полета КС существенно изменяется от экспедиции к экспедиции.

В этих условиях обеспечение необходимого согласования целей и задач СПЭ и АСУКП может быть осуществлено на основе обобшенной концепции обратной связи, заключающейся в следующем: «процедура, используемая в процессе проектирования, распространяется на все время реальной работы с учетом информации о свойствах управляемого процесса, которая была неизвестна априори» [5]. Таким образом, взаимодействие между АСУКП и СПЭ является не разовым (только на этапе проектирования), а постоянным (включая этап эксплуатации), и поэтому система подготовки должна рассматриваться как подсистема АСУКП. Из АСУКП в СПЭ в процессе взаимодействия должна поступать информация, определяющая ее цели и задачи, а обратно в АСУКП должна поступать информация о степени достижения этих целей, результаты решения поставленных задач.

Связь между АСУКП и СПЭ может быть представлена в виде, приведенном на рис. 1. Для изображения механизма управления при графическом описании структуры системы используется модуль управляемого контура [2]. Уступ смещения изображения младшей системы по вертикали вниз графически отображает временную иерархию: исследуемая система может рассматриваться только после того, как будут рассмотрены действия старшей системы. Параметры цели передаются по линиям прямой связи (сплошные линии). По линиям обратной связи (пунктир) передаются данные о фактическом выполнении заданной цели. По управляющему входу 3 в СПЭ поступает информация из старшей системы – АСУКП, включающая количество и состав необходимых для обеспечения эксплуатации КК экипажей, требования к экипажам, описание задач экипажей и т. д.



Рис. 1. Связи системы подготовки экипажа (СПЭ): 1 — результаты работы автоматизированной системы управления космическим полетом (АСУКП); 2 — цели работы АСУКП; 3 — цели работы СПЭ; 4 — результаты работы СПЭ; 5 — цели работы подсистем СПЭ; 6 — результаты работы подсистем СПЭ

По линиям обратной связи (связь 4) из СПЭ в АСУКП передаются результаты подготовки экипажей, заключения о степени готовности каждого космонавта и экипажа в целом к работе. На основании поставленных целей (связь 3), информации о результатах работы подсистем СПЭ, включающей данные о текущей степени подготовленности космонавтов (связь 6), СПЭ разрабатывает и корректирует план работы своих подсистем (связь 5). В состав СПЭ могут входить подсистемы эксплуатации учебно-тренировочных средств, подсистемы теоретического обучения, обеспечения тренажной, медицинской подготовок и др.

Взаимное влияние СПЭ и АСУКП проявляется, например, в том, что при возникновении во время полета случайного отказа какоголибо бортового оборудования из АСУКП в СПЭ направляется новая цель подготовки — ремонт этого оборудования. В СПЭ корректируется программа подготовки экипажа для того, чтобы очередной экипаж был в состоянии выполнить эту работу. И, наоборот, при разработке в АСУКП плана полета распределение полетных задач выполняется с учетом конкретных результатов подготовки космонавтов в СПЭ.

## Структура цели

В математическом виде глобальная цель работы СПЭ может быть сформулирована в следующем виде. Должны быть подготовлены экипажи  $C = \{C_1, ..., C_N\}$ , где C — множество экипажей; N — количество экипажей, находящихся на подготовке.

Глобальная цель (*первый уровень*) порождает множество локальных целей, достижение которых обеспечивает ее осуществление. Локальные цели должны охватывать подготовку экипажей к выполнению множества оперативных задач, которые могут возникнуть во время полета (рис. 2).

На втором уровне цель подготовки экипажа задается в виде спецификатора ответственности членов экипажа, в котором указывается функциональная позиция  $F_{\beta}$  для каждого члена *i*-го экипажа. Например, на МКС может использоваться пять функциональных позиций члена экипажа:  $F_i \in \{$ командир экипажа, бортинженер, врач экипажа, ответственный за сегмент, специалист по полезной нагрузке $\}$ , т. е.  $\beta = 1, ..., 5$ .

На *третьем уровне* цель подготовки задается в виде состава задач, которые предстоит выполнять экипажу в полете, включая потенциальные задачи, которые могут быть обусловлены возможными нештатными ситуациями.

Деятельность экипажа охватывает P бортовых комплексов  $\{S_j\}$ : бортовых систем, полетных операций, полезных нагрузок, профилактических и ремонтных работ. Множество  $\{S_j\}$  задается в виде списка, включающего следующие непересекающиеся подмножества:

• множество бортовых систем  $K^1$ ;

• множество типовых работ, которые выполняются экипажами на борту *K*<sup>2</sup>;

• множество работ по дооснащению и ремонту бортового оборудования, выполняемых данным экипажем в течение своего полета  $K_c^3$ ;

• множество полетных операций, запланированных в период полета данного экипажа  $K_{c_i}^4$ ;

• перечень нештатных ситуаций  $K^5$ .



Рис. 2. Структура целей подготовки

На четвертом уровне определяются квалификационные требования к членам экипажа. На начальном этапе пилотируемых полетов до 1980-х гг. все члены экипажа готовились, в основном, по одной программе, различия в квалификационных требованиях к членам экипажа отсутствовали. В связи с ростом количества и сложности бортовых комплексов для снижения объема подготовки каждого космонавта при эксплуатации КС «Мир» впервые были введены квалификационные уровни по бортовым комплексам: уровень 1 (наиболее низкая квалификация), уровень 2 (средняя квалификация), уровень 3 (наиболее высокая квалификация). Под квалификацией понимается совокупность свойств космонавта, характеризующих объем его профессиональных знаний и навыков, которыми он должен обладать для выполнения деятельности во время полета на КС. Квалификация уровня 1 позволяет члену экипажа пользоваться при необходимости данным бортовым комплексом в тех режимах, которые требуются для его безопасного нахождения на борту. например, пользоваться системой связи или жизнеобеспечения. Квалификация уровня 2 предусматривает выполнение членом экипажа штатных операций и технического обслуживания соответствующего бортового комплекса, а также выполнение оперативных действий при возникновении нештатной ситуации, требующей немедленного реагирования для обеспечения безопасности экипажа, живучести КС. Квалификация уровня 3 — это наивысшая квалификация по данному бортовому комплексу. Она предусматривает выполнение космонавтом всех задач по управлению в штатных и нештатных ситуациях, техническому обслуживанию и ремонту. В случае возникновения нерассмотренной в бортовой документации нештатной ситуации космонавт с квалификацией уровня 3 должен обладать достаточными знаниями и умениями, чтобы самостоятельно перевести бортовой комплекс в безопасный режим. Дальнейшее развитие дифференциация подготовки членов экипажа получила в программе Международной космической станции (МКС) в процессе совместной работы международных партнеров. Уровни квалификации были уточнены и получили наименования: уровень 1 стал называться «пользователь  $(\Pi)$ », **уровень 2** — «оператор (O)», **уровень 3** — «специалист (С)».

Каждому бортовому комплексу соответствует множество задач экипажа  $D_j = \{d_{j1}, ..., d_{jZj}\}, (j = 1, ..., P), Z_j - число задач экипажа по j-му$ бортовому комплексу. Состав задач экипажаопределяется путем анализа конструкторской документации на КС, в частности, проектной документации по конструкции и компоновке КС, технического описания и инструкции по эксплуатации бортовых систем. Каждой α-ой квалификации по *j*-му бортовому комплексу  $Q_{iq}$  соответствует множество задач  $D_{iq}$ , которые может выполнять космонавт, имеющий данную квалификацию. Причем задачи более низкой квалификации являются подмножеством более высокой, т. е.  $\forall l \ge \alpha; D_{jl} \supset D_{j\alpha}; l, \alpha \in 1, ..., 3;$  т. е.  $\bigcup_{\alpha=1}^{3} D_{j\alpha} = D_{j3}$ . Для того, чтобы назначить требуемую квалификацию для каждого космонавта, сначала на основе анализа состава и объема работ экипажа в соответствии с планируемой программой полета для *i*-го экипажа по *j*-му бортовому комплексу определяется минимальное требуемое количество космонавтов α-ой квалификации  $n_{i\alpha}^i$ .

На основе этих данных далее разрабатываются требования к квалификациям каждого члена экипажа по каждому бортовому комплексу таким образом, чтобы обеспечить требуемое количество космонавтов каждой квалификации по всем бортовым комплексам. Локальная цель «минимальное количество космонавтов требуемой квалификации» задается для обеспечения гибкости в работе СПЭ. В процессе подготовки в зависимости от ситуации квалификация члена экипажа может быть пересмотрена при выполнении локальной цели более высокого уровня — по минимальному количеству квалификаций.

## Документация

Все цели подготовки объединяются в обобщенный перечень требований, или исходных данных, в проектной документации КС, которая используется как техническое задание в процессе выполнения подготовки.

Для представления целей СПЭ используются два типа проектных документов: постоянно действующий документ № 1 «Организация деятельности экипажей» и серия временно действующих документов № 2: «Требования к технической подготовке экипажей».

На этапе создания КК выпускается документ № 1, определяющий цели подготовки:

- состав задач экипажа;
- уровни квалификации;

 распределение функций между членами экипажа;

• требования к подготовке экипажей, которые включают общие требования;

• требования к особенностям проведения работ, оценке уровня подготовленности, к изучению нормативной документации по деятельности экипажа. Этот документ действует в течение всего этапа эксплуатации КК.

Цели и структура функционирующей СПЭ не являются неизменными. В зависимости от складывающейся обстановки, возникновения новых задач, вариаций характеристик внешней среды и других факторов они могут и должны меняться. Для учета изменений на каждом крупном этапе эксплуатации КС (например, этапе экспедиции) выпускается документ № 2, в котором определяются цели подготовки: составы экипажей, сроки подготовки, а также уточняются данные, приведенные в документе № 1. Также определяются задачи экипажа по конкретному полету, новые задачи экипажа, требования к подготовке с учетом опыта эксплуатации КС. Документ № 2 действует до окончания подготовки экипажей по данному этапу полета. Однако этот документ также корректируется несколько раз в течение подготовки экипажа, так как изменения возникают непосредственно во время подготовки.

Периодически документ № 1 дорабатывается, в него переносят требования из документа № 2, имеющие долговременный характер, удаляются требования, потерявшие свою актуальность.

# Критерий качества процесса разработки целей

Основным критерием качества методики разработки целей подготовки является степень соответствия проектных целей подготовки задачам реального полета по итогам многих полетов. Имеется два независимых направления максимизации этого показателя. Первое — это анализ и определение состава конструкторской документации, которая должна быть проработана с целью получения исходных данных для формирования целей. Для первоначального формирования целей на этапе создания КС, а также для их корректировки в процессе эксплуатации должна подвергаться анализу конструкторская документация, в которой имеются данные по деятельности экипажа: схема деления КС, программа полета, нештатные ситуации, руководство по эксплуатации, бортовые инструкции экипажа, технические решения по доработкам/модернизации КС, заключения по анализу отклонений, возникших в ходе полета.

Второе направление — это организация анализа деятельности экипажа во время полета, предложений экипажа по совершенствованию КК по результатам полета. Одна из основных целей анализа деятельности экипажа — выявление предпосылок ошибок или затруднений в деятельности экипажа во время полета [6], обусловленных недостатками процесса подготовки космонавтов.

# Пример

Представленная методика использовалась при обеспечении полетов космонавтов на КС «Салют», «Мир», применяется в настоящее время в программе МКС. В целом спецификатор целей подготовки реального экипажа КС это документ, содержащий сотни страниц. Поэтому в качестве примера в табл. 1–3 приведены фрагменты реальных спецификаторов для Российского сегмента МКС.

#### Таблица 1

Фрагмент спецификатора по заданию
количества космонавтов каждой квалификации
одного из экипажей МКС

№ п/п	Бортовой комплекс	Минимальное количест космонавтов требуемо квалификации		оличество ебуемой ции
		С	0	П
1	Срочное покидание в аварийных ситуациях	_	3	_
2	Расконсервация/консервация	_	2	_
3	Система инвентарного учета	_	_	3
4	Перенос грузов	_	2	_
5	Информационно- управляющая система	2	_	_
6	Бортовая вычислительная система	2	_	1
7	Система управления бортовым комплексом/бортовой аппаратурой	2		1
8	Система бортовых измерений	2	_	1
9	Средства радиосвязи	2	_	1
10	Телевизионная система	2		1
11	Средства обеспечения газового состава	1	1	1
12	Средства противопожарной защиты	1	1	1
13	Средства водообеспечения	1	1	1
14	Средства санитарно-гигиенического обеспечения	1	1	1
15	Двигательные установки	1	_	_
16	Конструкция и компоновка	_	2	1
17	Система обеспечения теплового режима	1	1	1
<i>Примечание.</i> С — специалист; О — оператор; П — пользователь.				

# Таблица 2

#### Фрагмент спецификатора по заданию минимальной квалификации членов одного из экипажей МКС

№ п/п	Бортовой комплекс	Минимальная требуемая квалификация членов экипаж Член экипаж 1 2 3		ьная ая ация пажа ажа
				3
1	Срочное покидание в аварийных ситуациях	0	0	0
2	Расконсервация/консервация	0	0	_
3	Система инвентарного учета	П	П	П
4	Перенос грузов	0	0	_
5	Информационно-управляющая система	С	С	_
6	Бортовая вычислительная система	С	С	П
7	Система управления бортовым комплексом/бортовой аппаратурой	С	С	П
8	Система бортовых измерений	С	С	П
9	Средства радиосвязи	С	С	П
10	Телевизионная система	С	С	П
11	Средства обеспечения газового состава	С	0	П
12	Средства противопожарной защиты	С	0	П
13	Средства водообеспечения	С	0	П
14	Средства санитарно-гигиенического обеспечения	С	0	П
15	Двигательные установки	С	С	П
16	Конструкция и компоновка	C	C	П
17	Система обеспечения теплового режима РС	С	С	0

*Примечание*. С – специалист; О – оператор; П – пользователь.

#### Таблица З

#### Фрагмент спецификатора по заданию квалификационных уровней одного из экипажей МКС для системы управления бортовым комплексом

№ п/п	Название задачи	Минимальный уровень квалификации
1	Контроль состояния системы по информации бортовых дисплеев на основе визуального осмотра и доклад в ЦУП	С
2	Открытие панели клавиатуры	С
3	Проведение ремонтных работ, замена блоков, аккумуляторов, жестких дисков, кабелей, версий программного обеспечения	С
4	Распознавание нештатных ситуаций и выработка мер по их ликвидации	С

# Продолжение таблицы 3

№ п/п	Название задачи	Минимальный уровень квалификации
5	Анализ сообщений пульта: несуществующая команда, нажата неправильная клавиша, связь не установлена, связи нет, связь прервана, абонент занят	Ο
6	Выбор режима работы пульта: выбор форматов, режим «управление», режим «контроль», режим «тестирование», режим «регистрация», режим дистанционного управления, смена языка отображения	Ο
7	Диагностика отказа светового блока, замена светового блока светильников	0
8	Контроль и управление пультом сигнализации систем: включение/ отключение режима управления пультом от бортового компьютера, маскирование (размаскирование) аварий, установка времени отдыха экипажа	Ο
9	Распознавание и ликвидация отказа предохранителя защиты цепи питания	0
10	Тестирование пульта: контроль исправности аппаратно-программных средств пульта	0
11	Установка и корректировка текущего времени	0
12	Выполнение действия при появлении аварийных, предупредительных сообщений на пульте сигнализации	П
13	Использование розеток бортовой сети (подключение бортовой аппаратуры, научной аппаратуры, целевых нагрузок, оборудования, переносимого из другого сегмента)	П
14	Контроль и управление пультом сигнализации с бортового компьютера экипажа: вызов требуемого формата пульта сигнализации, контроль работоспособности пульта сигнализации	П
15	Определение источника аварий по моду- лям (в случае одновременного срабатыва- ния двух или трех аварий)	П
16	Ручная выдача аварий. Отбой аварий, выданных вручную	П
17	Управление светильниками	П
18	Управление часами: включение часов, корректировка времени, работа с секундомером	П

*Примечание*. С – специалист; О – оператор; П – пользователь.

Эффективность методики подтверждается тем, что в процессе многолетнего ее применения не зафиксировано ситуаций, когда вследствие неправильного (неполного) определения целей подготовки и, следовательно, отсутствия соответствующей подготовки, экипаж не выполнил конкретные полетные задачи, что привело к существенным последствиям, т. е. к невыполнению значительной части программы полета или возникновению реальной угрозы безопасности экипажа и работоспособности станции, или к выходу из строя жизненно важных бортовых систем.

## Заключение

Статья обобщает результаты работ РКК «Энергия» по подготовке экипажей КА. Впервые в математической постановке сформулирована цель работы СПЭ. Исследованы связи СПЭ. Введено понятие уровня квалификации космонавта по выполняемой задаче. Показано, что СПЭ является подсистемой АСУКП и должна проектироваться и эксплуатироваться во взаимодействии с ней.

Представленные материалы могут использоваться для повышения качества и эффективности процесса подготовки экипажей, создания соответствующих интерактивных автоматизированных рабочих мест, разработки соответствующей нормативной документации, специального руководства, описывающего правила разработки целей СПЭ.

Предложенная методика может применяться при подготовке операторов сложных систем различных отраслей, например, военных систем, автоматизированных систем управления технологическими процессами и других.

#### Список литературы

1. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 28 с.

2. Дымарский Я.С., Морозов В.П. Элементы теории управления ГАП. Л.: Машиностроение, 1984. 334 с.

3. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. Управление космическими полетами. Учеб. пособие. Ч. 1. / Под общ. ред. Лысенко Л. Н. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 478 с.

4. Бронников С.В. Вопросы системного подхода к системе подготовки оперативного персонала // XXXI Научные чтения, посвященные разработке творческого наследия К.Э. Циолковского (Калуга, 17–20 сентября 1996 г.). Изд-во Российской академии наук, комиссия по разработке научного наследия К.Э. Циолковского. С. 146–147.

5. *Саридис Дж.* Самоорганизующиеся стохастические системы управления. М.: Наука, 1980. 401 с.

6. Bronnikov S.V., Nechaev A.P., Isaev G.F. Metodological approach to study of cosmonauts errors and its instrumental support // 12-th Man in space Symposium, 8–13 June 1997, Washington, D.C. P. 169.

Статья поступила в редакцию 04.12.2014 г.

## References

1. GOST R 53802-2010. Sistemy i kompleksy kosmicheskie. Terminy i opredeleniya [Space systems and complexes. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform publ., 2011. 28 p.

2. Dymarskii Ya.S., Morozov V.P. Elementy teorii upravleniya GAP [Elements of AFM management theory]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1984. 334 p.

3. Soloviev V. A., Lysenko L. N., Lyubinskii V. E. Upravlenie kosmicheskimi poletami. Ucheb. posobie [Space Flight Control: Text-Book]. Part 1. Ed. Lysenko L. N. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2009. 478 p.

4. Bronnikov S.V. Voprosy sistemnogo podhoda k sisteme podgotovki operativnogo personala [Issues of the system approach to the operating personnel training system]. XXXI Nauchnye chteniya, posvyashhennye razrabotke tvorcheskogo naslediya K.E. Tsiolkovskogo (Kaluga, 17–20 september 1996). Rossiiskaya akademiya nauk publ., komissiya po razrabotke nauchnogo naslediya K.E. Tsiolkovskogo, pp. 146–147.

5. Saridis Dzh. Samoorganizuyushchiesya stohasticheskie sistemy upravleniya [Self-organizing stochastic control systems]. Moscow, Nauka publ., 1980. 401 p.

6. Bronnikov S.V., Nechaev A.P., Isaev G.F. Metodological approach to study of cosmonauts errors and its instrumental support. 12-th Man in space Symposium, 8–13 June 1997, Washington, D.C., p. 169.

# ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ

1. К публикации в журнале «Космическая техника и технологии» принимаются оригинальные, ранее не публиковавшиеся научно-технические статьи, отвечающие профилю журнала и соответствующие настоящим требованиям.

2. Объем статьи не должен превышать 20 страниц печатного текста, включая таблицы. Статья должна содержать не более 10 рисунков, графиков, иллюстраций. Все страницы должны быть пронумерованы. В тексте статьи должны содержаться рисунки, таблицы, графики и иллюстрации, если они есть по тексту.

3. Изложение материала должно быть в следующей последовательности (ГОСТ Р 7.0.7-2009, требования ВАК):

- индекс УДК (слева);
- название статьи на русском и английском языках;
- фамилия, имя, отчество полностью всех авторов на русском и английском языках;
- контактная информация: *e-mail*;

• аннотация на русском и английском языках, причем на английском языке не менее 100 слов (ГОСТ 7.9-95);

- ключевые слова на русском и английском языках;
- основной текст;
- выводы (или заключение);
- список литературы.

4. Рисунки, таблицы и графики оформляются согласно ГОСТ 7.32-2001. Размер рисунка, графика должен обеспечивать ясность передачи всех деталей. Таблицы должны содержать заголовки.

Иллюстративный материал предоставляется в цветном изображении в форматах *jpeg (jpg)* или *tiff* (*tif*) с разрешением не менее 300 *dpi*. Размер иллюстраций должен быть не более формата A4.

Рисунки, таблицы, графики, иллюстративный материал и подрисуночные подписи дополнительно предоставляются в виде отдельных файлов.

5. Набирать текст необходимо в *MS Word*, используя стандартный шрифт *Times New Roman*, размер – 12, интервал – полтора. Поля со всех сторон – 25 мм.

6. Для набора формул следует использовать редактор формул *Math Equation* или встраиваемый формульный процессор *Math Type*. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте согласно ГОСТ 2.105-95.

7. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы.

8. Размерность величин должна соответствовать системе СИ.

9. Элементы списка литературы должны содержать фамилии и инициалы авторов, полное название работы.

Для книг указывается место издания, издательство, год издания, количество страниц.

Для статей – название журнала или сборника, год выпуска, том, номер, номера первой и последней страниц согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008, ГОСТ 7.82-2001.

Для патентов – страна, номер, название, автор, заявитель и патентообладатель, дата подачи заявки, дата приоритета, название издания и его номер, дата публикации.

Автор несет ответственность за правильность данных, приведенных в списке литературы.

- 10. К статье должны быть приложены сведения об авторах:
- фамилия, имя, отчество полностью всех авторов;
- ученое звание и ученая степень каждого из авторов на русском языке;

• должность, место работы (полное название организации, страна, город) на русском и английском языках;

- контактная информация: *e-mail*, телефон;
- корреспондентский почтовый адрес (можно один на всех авторов)

• фотографии авторов (в форматах *jpeg (jpg)* или *tiff (tif)* с разрешением не менее 300 *dpi*, размер не менее 60×40 мм).

Указать сферу профессиональных интересов (не более 7 слов) и общее количество публикаций каждого из авторов.

В сведениях об авторах должен быть указан ответственный автор (автор, которому делегированы полномочия представлять интересы группы авторов), с кем редакция будет взаимодействовать при работе над статьей. 11. Материалы для публикации, оформленные с нарушением указанных правил, не рассматриваются и возвращаются автору на доработку.

12. В редакцию статья представляется с полным комплектом следующих документов:

• представление (сопроводительное письмо) руководителя организации или члена редколлегии журнала;

• рукопись статьи в двух экземплярах, напечатанных на принтере на одной стороне стандартного листа формата А4, подписанная всеми ее авторами;

• подписанный лицензионный договор;

• оригинал экспертного заключения о возможности открытой публикации;

• *CD* или *DVD*-диск, содержащий файлы: текст статьи в формате *doc* с рисунками, графиками, таблицами, иллюстрациями; сведения об авторах; фотографии авторов; файлы иллюстраций, рисунков, таблиц, графиков.

13. Каждая рукопись статьи проходит предварительную экспертизу для определения:

• является ли материал научной или научно-технической статьей;

• является ли статья оригинальной (не публиковавшейся ранее или частично опубликованной и где), результаты получены автором или заимствованы, имеются ли соответствующие ссылки на литературные источники;

• актуальности, новизны и/или практической значимости работы.

По результатам предварительной экспертизы ответственному автору направляются рекомендации по возможности предоставления ее в редакцию или необходимости доработки статьи.

14. Зарегистрированная статья направляется на рецензирование специалистам по тематике статьи. При положительной рецензии с замечаниями авторы обязаны доработать статью в соответствии с рекомендациями рецензента, после чего представить в редакцию доработанный вариант с ответом на рецензию, подписанным авторами (ответственным автором по поручению авторов) с указанием даты. В этом случае датой поступления статьи в редакцию считается дата регистрации доработанного варианта статьи.

Авторы могут не согласиться с рецензентом и представить мотивированное обоснование о нецелесообразности полной или частичной доработки. При несогласии рецензента редколлегия может направить статью другому рецензенту или согласиться с мнением авторов и принять статью к публикации. При двух отрицательных рецензиях статья не может быть опубликована в настоящем журнале.

15. Отредактированная и сверстанная статья для оригинал-макета номера журнала (корректура статьи) в электронном виде по электронной почте или другим способом высылается автору (ответственному автору) вместе с правилами работы с корректурой. Автор обязан в срок до 5 рабочих дней по электронной почте выслать в редакцию предложения об исправлении ошибок, подготовленные в соответствии с правилами работы с корректурой. Автор в указанный срок может лично в редакции внести исправления в корректуру.

При отсутствии замечаний автор должен известить об этом редакцию.

При не поступлении в редакцию замечаний в течение 5 рабочих дней корректура считается согласованной и ответственность за возможные ошибки несут авторы. Замечания после этого срока не принимаются.

# Консультации по правильному оформлению подаваемых материалов можно получить в редакции журнала по тел.:8(495) 513-87-46 или по e-mail: ktt@rsce.ru.

Электронную версию журнала «Космическая техника и технологии» можно найти на сайте *http://www.energia.ru/ktt/index.html*.

#### Издатель

Четырежды ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королёва»

#### <u>Научный редактор</u> Синявский В.В.

Cumochuu D.D.

# Редакторская группа

Черных О.А. Лосикова А.А.

<u>Технический редактор</u> Бушуева Е.С.

# Дизайн и верстка

Кузнецова Т.В. Паук Е.В.

# Разработка макета и дизайн обложки

Алексеева Т.А. Колесникова М.В. Милехин Ю.Н. Осипова М.С. Паук Е.В.

# <u>Фотограф</u>

Григоренко Н.А.

#### <u>Перевод</u>

Сектор переводов контрактной документации РКК «Энергия»

#### Адрес редакции

Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская область, Россия, 141070 Тел. 8(495)513-87-46 E-mail: ktt@rsce.ru

Подписано в печать 05.03.20104 г. Формат 60×84/8. Бумага мелованная. Цифровая печать. Объем 11,75 печ.л. Тираж 200 экз. Заказ № 3101

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ОАО «РКК "Энергия" им. С.П. Королёва»